



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ  
INSTITUT FÜR PHYSIK

22S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2 LU  
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

### III. Wirkungsgrad

Michael Bitzan      Fabian Michael Dixer  
12014662            12005188  
Gruppe 19

Betreut von  
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Peter BANZER

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2 Voraussetzungen und Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Solarzelle . . . . .	3
2.2 Wärmepumpe . . . . .	4
<b>3 Beschreibung der Versuchsanordnung</b>	<b>5</b>
3.1 Versuchsanordnung - Solarzelle . . . . .	5
3.2 Versuchsanordnung - Wärmepumpe . . . . .	7
<b>4 Geräteliste</b>	<b>9</b>
<b>5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse</b>	<b>10</b>
5.1 Versuchsdurchführung - Solarzelle . . . . .	10
5.1.1 Manuelle Bestimmung der Kennlinie der Solarzellenmodule . . . . .	10
5.1.2 Automatisierte Bestimmung der Kennlinie einer Solarzelle. . . . .	13
5.2 Versuchsdurchführung - Wärmepumpe . . . . .	16
<b>6 Auswertung</b>	<b>17</b>
6.1 Auswertung - Solarzelle . . . . .	18
6.1.1 Auswertung - Manuelle Bestimmung der Kennlinie . . . . .	18
6.1.2 Auswertung - Automatische Aufzeichnung der Kennlinie . . . . .	19
6.2 Auswertung - Wärmepumpe . . . . .	23
<b>7 Diskussion</b>	<b>26</b>
7.1 Diskussion - Solarzelle . . . . .	26
7.2 Diskussion - Wärmepumpe . . . . .	27
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>28</b>
8.1 Zusammenfassung - Solarzelle . . . . .	28
8.2 Zusammenfassung - Wärmepumpe . . . . .	28
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>30</b>
10.1 Python-Code . . . . .	30

## 1 Aufgabenstellung

### 1. Solarzelle

- Bestimmen der Diodenkennlinie einer Solarzelle in parallel, seriell und partiell abgedeckten Betrieb.
- Bestimmen von verschiedenen Kenndaten der Solarzelle.
- Messung der Dunkel- und Hellkennlinie einer Solarzelle. Aus diesen Bestimmung des Wirkungsgrads und der Diodenparameter.

### 2. Wärmepumpe

- Messung des Temperaturverlaufes von zwei Wasserbehältern bei der Wärmepumpe.
- Bestimmung der Leistungszahl  $\varepsilon$  und des Gütegrades  $\eta$  in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes  $\Delta T$ .
- Eintragen des Kreisprozesses in das  $p$ - $H$ -Diagramm.

## 2 Vorraussetzungen und Grundlagen

### 2.1 Solarzelle

Eine Solarzelle besteht aus einer n-dotierten Schicht mit vielen frei beweglichen Ladungsträgern (negativ) und einer p-dotierten Schicht mit vielen Elektronenlöchern (positive Ladungsträger). In diesem Versuch handelt es sich um eine monokristalline Siliziumsolarzelle, wobei die n-Schicht durch Phosphor-Atome dotiert ist. Zwischen der sehr dünnen n-Schicht (ca. 0,001 mm) und der p-Schicht (ca. 0,6 mm) befindet sich eine Grenzschicht, welche als p/n Übergang bekannt ist. Durch die Dotierung der Schichten wandern Ladungsträger in die jeweilig andere Schicht, was zu einer verarmten Sperrsicht am Übergang führt, das p-Gebiet bekommt eine negative und das n-Gebiet eine positive Raumladungszone. Diese verhindert weitere Diffusion der Ladungsträger.

Durch Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung kann die Potentialbarriere überwunden werden und Strom fließen. Umgekehrt bei negativer Spannung vergrößert sich die Raumladungszone und das Bauteil sperrt, dieser Effekt ist mit einer Diode oder einem Gleichrichter zu vergleichen. Gelangen Photonen mit genügend Energie in die Sperrsicht, entstehen zusätzliche Elektronen-Lochpaare welche die Energiebarriere überwinden können. Somit entsteht ein Photostrom, welcher in Sperrrichtung der Diode fließt, welcher wiederum zur Stromerzeugung aus Lichtstrahlung verwendet wird.

Bei der Photodiode können aus der Messung der  $U/I$  Kennlinie verschiedenste Parameter bestimmt werden. Die Leerlaufspannung  $U_L$  ist die Spannung im Diagramm, an der Stelle wo der Strom  $I$  null ist, äquivalent dazu gibt es auch den Kurzschlussstrom  $I_K$ , bei dem die Spannung  $U$  den Wert null hat. Auch die Leistung kann mit der Formel

$$P = UI \quad (1)$$

berechnet werden. Stellt man die Leistung abhängig von der Spannung  $U$  in einem Diagramm dar, kann der Betriebspunkt maximaler Leistung  $P_{\max}$  bei maximaler Spannung  $U_{\max}$  und maximalen Strom  $I_{\max}$  herausgelesen werden. Aus diesen Größen kann der Füllfaktor  $FF$  berechnet werden.

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

Er beschreibt das Verhältnis der Fläche unter der maximalen Leistung  $P_{\max}$  und der Fläche aus Kurzschlussstrom  $I_K$  und Leerlaufspannung  $U_L$ , was dem Energieverlust aufgrund der Kennlinienkrümmung entspricht (siehe Abbildung 1).

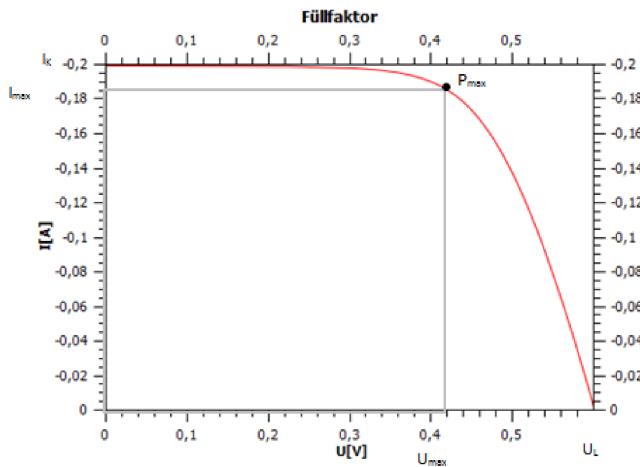


Abbildung 1: Grafische Interpretation des Füllfaktors. [7]

Die von der Lichtquelle ausgestrahlte Leistung  $P_{\text{Licht}}$  lässt sich über

$$P_{\text{Licht}} = AI_{\text{Licht}} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 I_{\text{Licht}} = lbI_{\text{Licht}} \quad (3)$$

berechnen, wobei  $A$  die aktiv bestrahlte Fläche der Solarzelle ( $d \dots$  Durchmesser des Detektors,  $l, b \dots$  Länge und Breite der Solarzelle) und  $I_{\text{Licht}}$  die Intensität der Lichtquelle ist. Setzt man die maximale Ausgangsleistung der Solarzelle  $P_{\text{max}}$  in Relation zu dieser Leistung  $P_{\text{Licht}}$ , erhält man den Wirkungsgrad  $\eta$  des Gesamtsystems. Er beschreibt, wie viel Eingangsleistung tatsächlich umgesetzt werden kann.

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{Licht}}} \quad (4)$$

Ein idealisierter p/n Übergang kann mit der Strom-Spannungs-Charakteristik  $I(U)$  mithilfe der Shockley-Gleichung beschrieben werden

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

wobei  $e$  die Elektronenladung,  $T$  die Temperatur,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante,  $I_{ph}$  der Photostrom und  $I_S$  der Sättigungsstrom ist.

## 2.2 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe dient dazu, mithilfe eines thermodynamischen Prozesses Wärme von einem Körper niedriger Temperatur zu einem Körper höherer Temperatur zu transportieren. Hierfür wird Arbeit verrichtet, dies geschieht mit dem Arbeitsmedium R143a, welches als Kältemittel ausgeführt ist. Zu Beginn wird dieses Medium vom Druck  $p_1$  auf den Druck  $p_2$  isentrop und adiabatisch komprimiert. Dies hat eine Erwärmung des Mediums auf die Temperatur  $T_K$  zur Folge, welches über einen Wärmetauscher isobar Wärme an den Körper höherer Temperatur abgibt. Dies kühlt das Medium auf dessen Temperatur  $T_2$  ab, wodurch es zu kondensieren beginnt. Das nun flüssige, jedoch mit Gasblasen durchsetzte Medium wird gereinigt und mit einer Drossel beziehungsweise einem Expansionsventil auf den Druck  $p_1$  entspannt. Das kalte Medium nimmt nun erneut mit einem Wärmetauscher isobar Temperatur vom kühlen Körper auf bis es die Temperatur  $T_1$  erreicht, wobei das Medium wieder verdampft. Anschließend läuft das Medium wieder zur Druckpumpe und der Vorgang wird wiederholt. Der Kreisprozess des Mediums R134a kann optimal in einem  $p$ - $H$  Diagramm dargestellt werden (Abbildung 2),  $p$  ist hierbei der Druck und  $H$  die Enthalpie.

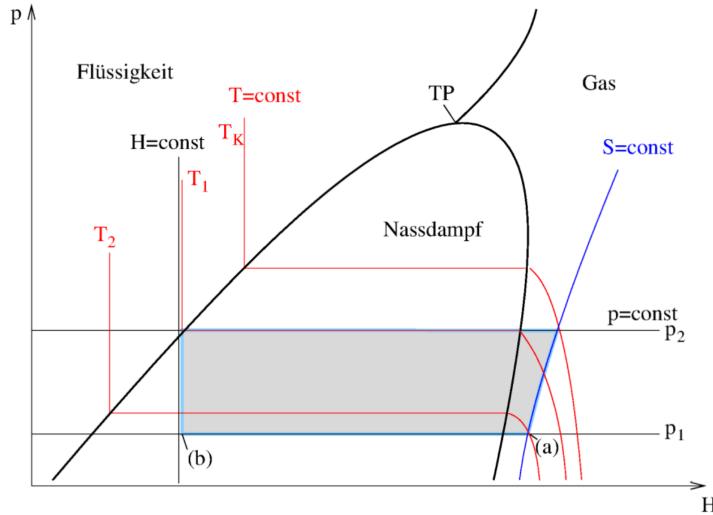


Abbildung 2:  $p$ - $H$  Diagramm des Arbeitsmediums R134a. [5]

Der Kreisprozess beginnt bei (a), wobei hier eine isentrope Kompression auf  $p_2$  erfolgt, gefolgt von einer isobaren Abkühlung und Kondensation auf  $T_1$ . Auf die isenthalpe Drosselung auf den Druck  $p_2$  folgt die

isobare Erwärmung auf  $T_2$  (b).

Bei der Wärmepumpe kann die Leistungszahl  $\varepsilon$  definiert werden. Sie beschreibt das Verhältnis der Änderung der zugeführten Wärmemenge  $dQ/dt$  pro Zeiteinheit zu der benötigten Leistung  $P$  des Kompressors.

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{P} \quad \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = c \cdot m \frac{dT_2}{dt} \quad (6)$$

Wobei  $c$  die Wärmekapazität von Wasser und  $m$  dessen Masse ist. Aus der Leistungszahl kann anschließend der Wirkungsgrad der Wärmepumpe beschrieben werden, welcher auch als Gütegrad bekannt ist.

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \quad (7)$$

Die Größe  $\varepsilon_{\max}$  ist hierbei die maximal theoretisch erreichbare Leistungszahl. Sie tritt allgemein bei Wärme-kraftmaschinen wie dem Carnot-Prozess auf und lässt sich folgend bestimmen.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{1}{\eta_C} \quad (8)$$

Wobei  $T_1$  und  $T_2$  die Temperaturen der beiden Wasserreservoirs sind.

### 3 Beschreibung der Versuchsanordnung

In diesem Experiment wird zuerst der Versuch zur Solarzelle und anschließend der Versuch mit der Wärmepumpe durchgeführt. Diese zwei Teilexperimente benötigen einen komplett unterschiedlichen Aufbau, somit werden diese nacheinander genau beschrieben.

#### 3.1 Versuchsanordnung - Solarzelle

Bei dem Solarzellen Versuch wird zuerst die Kennlinie von zwei Solarzellen bestimmt und anschließend daraus die Kenngrößen bestimmt.

Als erstes werden zwei Solarzellen S1, S2 hergenommen und in Serie geschaltet. Ein Schaltbild des Aufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt.

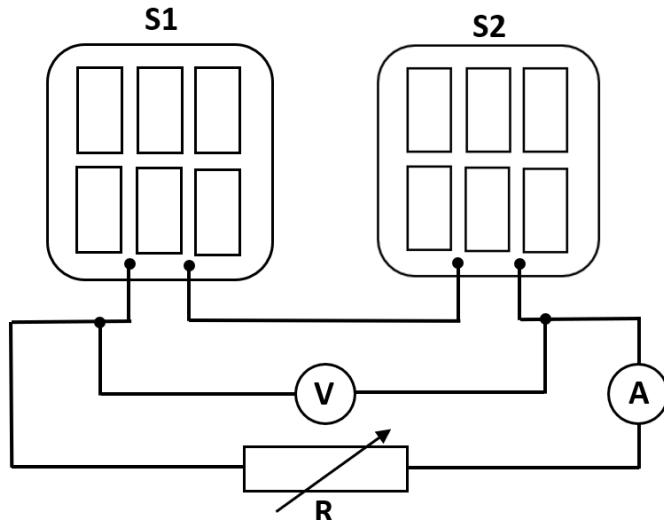


Abbildung 3: Schaltplan der Solarzellen im seriellen Betrieb.

Nach den beiden Modulen befindet sich ein Amperemeter A, über welchen der Strom  $I$  der Solarzellen gemessen werden kann. Weiters wird auch noch ein Voltmeter zur Spannungsmessung  $U$  in die Schaltung integriert. Nach dem Amperemeter befindet sich ein Potentiometer in der Schaltung, mit welchem der Widerstand  $R$  variiert werden kann, dies dient zur kompletten Abdeckung des Messbereichs der Kennlinie. In einem Abstand von ca. 30 cm wird eine Radium-Lampe platziert, welche das gesamte Solarzellenmodul gleichmäßig bestrahlt.

Weiters wird der Aufbau abgeändert, die Solarzellen werden nun parallel geschaltet. Der Schaltplan ist in Abbildung 4 dargestellt.

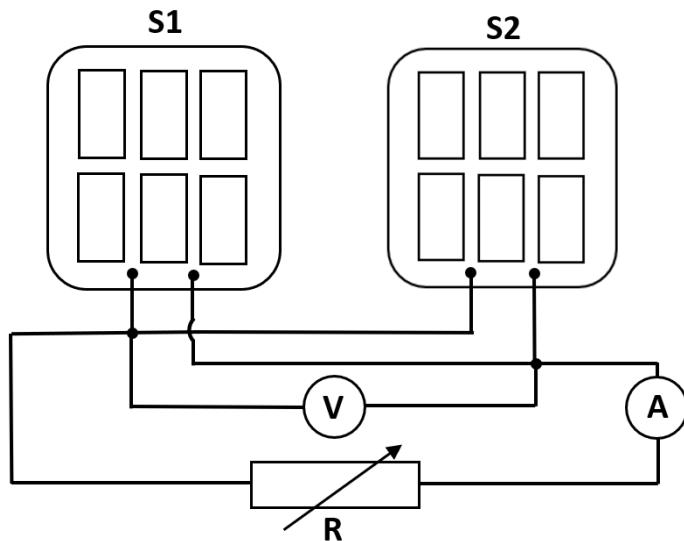


Abbildung 4: Schaltplan der Solarzellen im parallelen Betrieb.

Daraufhin wird wieder der serielle Aufbau aus Abbildung 3 hergenommen und zusätzlich die Hälfte einer der beiden Solarzellen mit einem dicken Blatt Papier abgedeckt. Dies führt zu einer partiellen Beleuchtung des Moduls, was eine Auswirkung auf die Kennlinie bewirkt.

Der praktische Aufbau der drei Schaltungen ist in Abbildung 5 dargestellt.

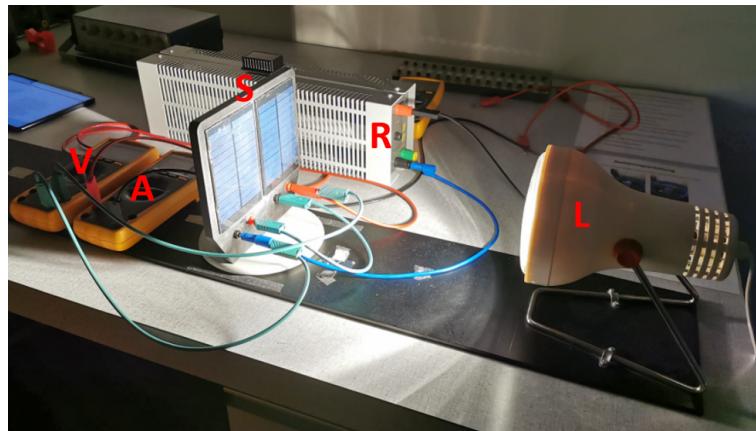


Abbildung 5: Praktischer Aufbau der Solarzellenmodule. V ... Voltmeter, A ... Amperemeter, S ... Solarzelle, R ... Potentiometer, L ... Radium-Lampe.

Anschließend wird eine weitere Kennlinie einer einzelnen Solarzelle bestimmt. In diesem Aufbau wird als Beleuchtungsquelle ein Sonnensimulator verwendet, welcher zwei verschiedene Intensitäten strahlt. Als Messgerät wird hier ein Quellmessgerät beziehungsweise Sourcemeter verwendet. Dies ermöglicht mithilfe der Software *Kickstart* die automatisierte Messung der gesamten Kennlinie. Für die Bestimmung und Einstellung der eingestrahlten Leistung wird zusätzlich noch ein Strahlungs-Messgerät beziehungsweise Powermeter verwendet, welches über den Detektor D die Lichtintensität misst. Nach dem Sonnensimulator ist das Licht abgedunkelt, um die Messung nicht zu verfälschen. Der praktische Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

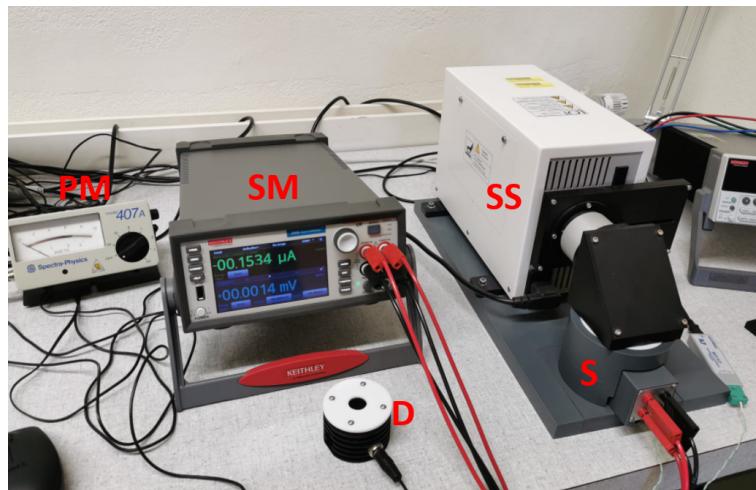


Abbildung 6: Praktischer Aufbau der Solarzelle mit dem Sonnensimulator. PM ... Powermeter, SM ... Sourcemeter, S ... Solarzelle, D ... Detektor, SS ... Sonnensimulator.

Das Sourcemeter arbeitet über die 4-Pol Technik, was bedeutet, dass das Messgerät als Quelle und Last dient. Dies ermöglicht es, die gesamte Strom-Spannungs-Kennlinie automatisiert aufzunehmen.

### 3.2 Versuchsanordnung - Wärmepumpe

In diesem Teilexperiment wird der Gesamtaufbau der Wärmepumpe von *Leybold Didactics* verwendet. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt.

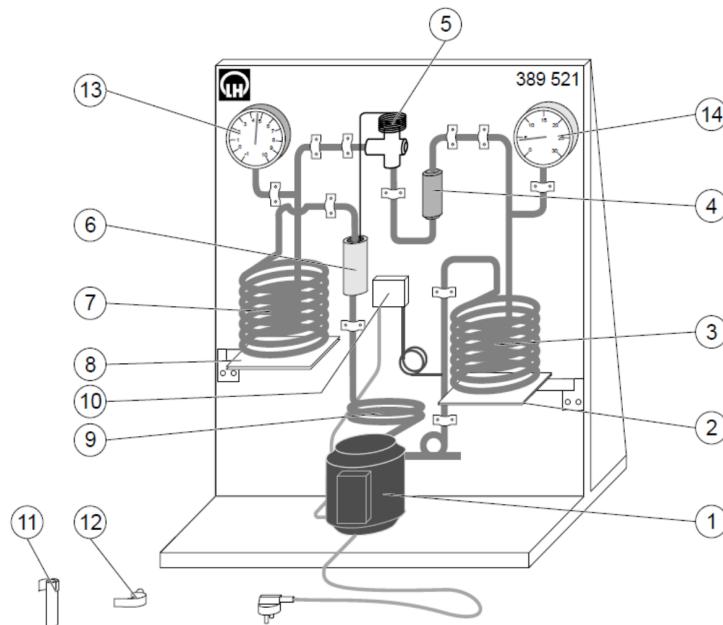


Abbildung 7: Funktionsprinzip der Wärmepumpe. 1: Kompressor, 2: ausschwenkbare Stellfläche für den warmen roten Behälters, 3: Verflüssiger, 4: Reiniger, 5: Expansionsventil, 6: Temperaturfühler des Expansionsventils, 7: Verdampfer, 8: ausschwenkbare Stellfläche des kalten blauen Behälters, 9: Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher, 10: Druckwächter, 11: Halter für Temperaturfühler, 12: Kupfer-Messschuh, 13: Manometer der Niederdruckseite, 14: Manometer der Hochdruckseite. [5]

Der Aufbau besteht aus einem Kompressor, welcher für den Prozess verantwortlich ist. Er wird über einen Netzanschluss mit Spannung versorgt und dient zur Kompression des zuerst gasförmigen Kältemittels. Direkt danach ist ein Druckwächter angeschlossen, welcher bei zu hohem Druck den Kompressor ausschaltet. Über Rohrleitungen wird das Kühlmittel R134a zu den beiden Wärmetauscher geführt, welche sich in den beiden 4 l Wasserbehältern rechts und links vom Aufbau befinden. Im blauen Behälter wird Wärme an das Kühlmittel abgegeben, wobei der rote Behälter Wärme aufnimmt. Die Behälter befinden sich auf einer ausschwenkbaren Fläche, um diese leichter in den Aufbau zu integrieren. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass sich der komplette Wärmetauscher in der Flüssigkeit befindet. Über den Behältern befinden sich jeweils ein Manometer, welcher zur Druckbestimmung bei der Niederdruck und Hochdruck Seite dient. Im Kältemittel Kreislauf befindet sich noch ein Verflüssiger, an dem das Kältemittel kondensiert, um übrige Gasblasen zu filtern wird anschließend ein Reiniger verwendet. Die Entspannung des Kältemittels erfolgt daraufhin mit einem Expansionsventil, welches mit Temperaturfühlern verbunden ist und somit das Kältemittel regelt. Ein folgender Verdampfer dient zur Verdampfung des Kältemittels nach Temperaturaufnahme im kalten blauen Behälter.

In den beiden Behältern befinden sich Temperaturfühler, welche mit einem digitalen Messgerät verbunden sind. Mit dem Programm *Cassy Lab 2* können die gemessenen Temperaturwerte über eine bestimmte Zeit als Temperaturverlauf ausgelesen und aufgezeichnet werden. Der praktische Aufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Praktischer Aufbau der Wärmepumpe.

## 4 Geräteliste

Die Geräte, welche im Solarzellen Experiment verwendet werden, sind in Tabelle 1 eingetragen. Die Messgerätsicherheiten werden aus [6], [4] und [9] entnommen.

Tabelle 1: Verwendete Geräte beim Solarzelle-Experiment.

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Messbereich & Fehler
Amperemeter	Fluke	175 TrueRMS	FP06	$\pm(1,0\% + 0,03 \text{ mA})$
Voltmeter	Fluke	175 TrueRMS	FP08	$\pm(0,15\% + 20 \text{ mV})$
Potentiometer	Arcol	VRH320	-	-
Lichtquelle	RHR	Radium-Lampe	PAR38-EC	230 V / 120 W
Verbindungskabel	-	-	-	-
Solarzellenmodul	-	-	-	7,5 cm × 10 cm
Quellenmessgerät	Keithley	SourceMeter 2450 SO	300032370000	Datenblatt [6]
Sonnensimulator	LQT QuantumDesign	-	310094100000	-
Leistungsmessgerät	Spectra Physics	SpektroMeter 407A	310041630000	Datenblatt [9]
Solarzelle	-	-	-	4 cm × 1,8 cm
Geodreieck	IASTE	-	-	$\pm 0,2 \text{ cm}$

Für die automatisierte Aufzeichnung der Kennlinie wird am Computer das Programm *Kickstart* verwendet. Der Trennstrich in der Liste dient zur Unterscheidung der beiden Teilversuche mit normaler Bestrahlung der Solarzellenmodule und mit Sonnensimulator und einer Solarzelle.

Die Geräte, welche im Wärmepumpe Experiment verwendet werden, sind in Tabelle 2 eingetragen. Die Messgerätsicherheit wird aus [2] übernommen.

Tabelle 2: Verwendete Geräte beim Wärmepumpe-Experiment.

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Messbereich & Fehler
Wärmepumpe	Leybold Didactics	-	31007054000	-
Temperaturmessgerät	Leybold Didactics	666193	-	$\pm 0,2^\circ$
Kompressor	Danfoss	TL3G/1024	AA6AA100	120 W
Filter	Danfoss	DML0825	023Z4560	-

## 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

In diesem Kapitel werden nacheinander die Versuchsdurchführungen der beiden Teilexperimente beschrieben.

### 5.1 Versuchsdurchführung - Solarzelle

Beim Solarzellen Experiment soll die Kennlinie von einem Solarzellenmodul manuell mittels Bestrahlung durch eine Radium Lampe und die Kennlinie einer einzelnen Solarzelle automatisiert mit Bestrahlung eines Sonnensimulators ermittelt werden.

#### 5.1.1 Manuelle Bestimmung der Kennlinie der Solarzellenmodule

Die manuelle Bestimmung der Kennlinie der beiden Solarzellenmodule erfolgt nacheinander über den seriellen, den parallelen und den partiell abgedeckten Aufbau. Die Messvorgangsweise bleibt jedoch bei allen drei Aufbauten gleich: Der Potentiometer-Widerstand wird ganz auf eine Seite gestellt und der Wert langsam erhöht und anschließend die Messwerte der Spannung  $U$  mit dem Voltmeter und der Strom  $I$  mit dem Ampermeter aufgenommen. Danach wird der Widerstand weiter erhöht, der Messvorgang wird solange wiederholt, bis das Potentiometer das Ende der Bahn erreicht. Bei den Messwerten sollte besonders darauf geachtet werden, dass im Bereich des Knicks der Kennlinie mehr Messpunkte aufgenommen werden, als bei dem Rest des Messbereiches.

Zu Beginn wird der parallele Aufbau aus Abbildung 4 hergenommen. Die erhaltenen Messwerte sind in Tabelle 3 dargestellt, die Unsicherheiten ergeben sich aus der Messgerätunsicherheit aus Tabelle 1.

Tabelle 3: Messwerte des Solarzellenmoduls beim parallelen Aufbau.

$U$  ... Gemessene Spannung ( $\Delta U = \pm(0,15\% + 0,02 \text{ V})$ )  
 $I$  ... Gemessener Strom ( $\Delta I = \pm(1,0\% + 0,03 \text{ mA})$ )

$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$	$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$
6,64	0,03	6,67	0,07	6,24	0,03	17,75	0,18
6,59	0,03	7,01	0,08	6,23	0,03	18,94	0,19
6,54	0,03	7,26	0,08	6,22	0,03	20,1	0,2
6,43	0,03	7,48	0,08	6,21	0,03	21,6	0,3
6,41	0,03	7,86	0,08	6,19	0,03	23,6	0,3
6,40	0,03	8,27	0,09	6,18	0,03	24,7	0,3
6,38	0,03	8,76	0,09	6,16	0,03	27,6	0,3
6,37	0,03	9,23	0,10	6,14	0,03	29,9	0,3
6,35	0,03	9,85	0,10	6,12	0,03	33,7	0,4
6,34	0,03	10,53	0,11	6,09	0,03	38,9	0,4
6,33	0,03	11,30	0,12	6,07	0,03	42,7	0,5
6,31	0,03	12,16	0,13	6,02	0,03	51,9	0,6
6,30	0,03	13,20	0,14	5,95	0,03	64,9	0,7
6,28	0,03	15,16	0,16	5,88	0,03	78,7	0,8
6,27	0,03	15,93	0,16	5,74	0,03	99,8	0,9
6,26	0,03	16,83	0,17				

Die verwendeten Messwerte werden zur Überprüfung in einem Diagramm 9 aufgetragen. Die Fehlerbalken entsprechen den Unsicherheiten der Messwerte.

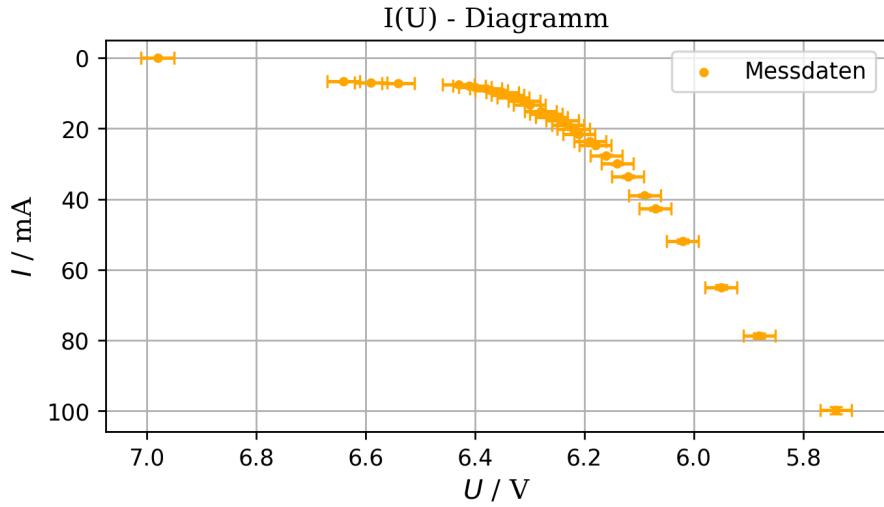


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Messwerte bei der parallelen Solarzellenschaltung.

Weiters wird für die folgende Berechnung noch der Kurzschlussstrom  $I_K$  benötigt. Um diesen zu messen, wird der Lastwiderstand  $R$  aus der Schaltung entfernt und die Solarzellen mithilfe des Ampermeters kurzgeschlossen. Zusätzlich muss auch die Leerlaufspannung  $U_L$  bestimmt werden, dies geschieht über die Spannungsmessung an den Solarzellen ohne Last und Ampermeter. Für die parallele Schaltung ergeben sich die Werte:

$$U_L = (6,67 \pm 0,04) \text{ V} \quad I_K = (145,2 \pm 1,5) \text{ mA}$$

Anschließend wird der Messaufbau aus Abbildung 3 verwendet, bei dem die Solarzellen in Serie geschaltet sind. Der Messvorgang wird wie bei der parallelen Schaltung durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tabelle 4

ersichtlich.

Tabelle 4: Messwerte des Solarzellenmoduls beim seriellen Aufbau.

$U$  ... Gemessene Spannung ( $\Delta U = \pm(0,15\% + 0,02 \text{ V})$ )

$I$  ... Gemessener Strom ( $\Delta I = \pm(1,0\% + 0,03 \text{ mA})$ )

$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$	$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$
12,66	0,04	12,72	0,13	11,89	0,04	28,0	0,3
12,56	0,04	12,78	0,13	11,85	0,04	29,3	0,4
12,51	0,04	13,39	0,14	11,78	0,04	31,0	0,4
12,48	0,04	13,99	0,14	11,76	0,04	32,6	0,4
12,44	0,04	14,65	0,15	11,70	0,04	34,0	0,4
12,40	0,04	15,35	0,16	11,63	0,04	36,6	0,4
12,35	0,04	16,16	0,17	11,55	0,04	39,0	0,5
12,30	0,04	17,10	0,18	11,47	0,04	41,3	0,5
12,27	0,04	17,45	0,18	11,37	0,04	44,2	0,5
12,24	0,04	18,21	0,19	11,24	0,04	47,8	0,6
12,20	0,04	18,75	0,19	11,02	0,04	51,9	0,6
12,18	0,04	19,4	0,2	10,36	0,04	55,7	0,6
12,14	0,04	20,2	0,3	9,80	0,04	56,5	0,6
12,10	0,04	21,3	0,3	8,20	0,04	55,6	0,6
12,07	0,04	22,1	0,3	7,26	0,04	56,1	0,6
12,03	0,04	23,3	0,3	5,84	0,03	56,8	0,6
11,99	0,04	24,6	0,3	4,94	0,03	57,6	0,6
11,96	0,04	25,9	0,3	3,81	0,03	58,4	0,7
11,93	0,04	27,0	0,3	2,34	0,03	60,4	0,7

Anschließend werden die Werte wieder grafisch in Abbildung 10 dargestellt.

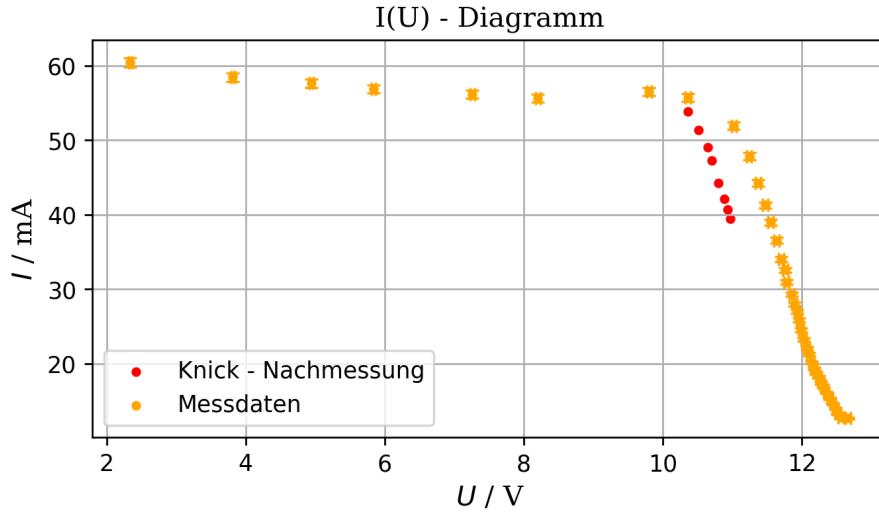


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Messwerte bei der seriellen Solarzellenschaltung.

Wie in der Grafik zu erkennen ist, werden weitere Messpunkte für den Bereich des Knicks aufgenommen. Da sich jedoch während der Messung die Solarzellen weiter erhitzten, sinkt die Spannung um einen gewissen Faktor und die Messwerte können nicht mit den zuvor gemessenen zusammengeführt werden. Daher muss besonders darauf geachtet werden, die Messreihe hintereinander zu machen und nicht zu lange zwischen den Messpunkten zu warten. Weiters wird die Leerlaufspannung  $U_L$  und der Kurzschlussstrom  $I_K$  gemessen.

$$U_L = (12,75 \pm 0,04) \text{ V} \quad I_K = (67,2 \pm 0,7) \text{ mA}$$

Abschließend wird eine der beiden Solarzellen partiell abgedeckt und die Messung wiederholt, die Ergebnisse sind in Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Messwerte des Solarzellenmoduls beim partieller Abdeckung und seriellem Aufbau.

$U$	...	Gemessene Spannung ( $\Delta U = \pm(0,15\% + 0,02 \text{ V})$ )
$I$	...	Gemessener Strom ( $\Delta I = \pm(1,0\% + 0,03 \text{ mA})$ )

$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$	$U / \text{V}$	$\Delta U / \text{V}$	$I / \text{mA}$	$\Delta I / \text{mA}$
2,15	0,03	2,16	0,03	0,95	0,03	2,22	0,03
2,07	0,03	2,15	0,03	0,87	0,03	2,23	0,03
1,98	0,03	2,17	0,03	0,78	0,03	2,23	0,03
1,89	0,03	2,15	0,03	0,68	0,03	2,24	0,03
1,79	0,03	2,16	0,03	0,64	0,03	2,26	0,03
1,72	0,03	2,18	0,03	0,51	0,03	2,27	0,03
1,50	0,03	2,18	0,03	0,45	0,03	2,27	0,03
1,41	0,03	2,20	0,03	0,41	0,03	2,28	0,03
1,31	0,03	2,21	0,03	0,35	0,03	2,29	0,03

Auch diese Werte werden wieder grafisch in Abbildung 11 dargestellt.

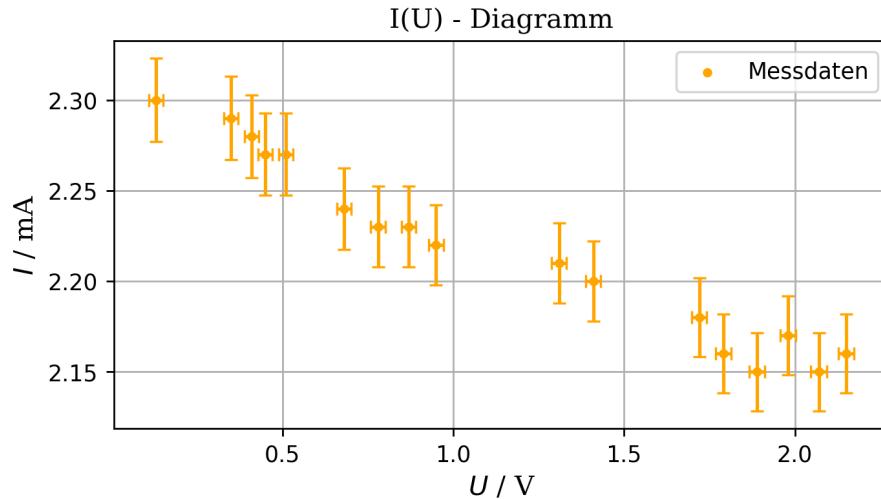


Abbildung 11: Grafische Darstellung der Messwerte bei der partiellen Abdeckung und serieller Solarzellen-Schaltung.

Für die Leerlaufspannung  $U_L$  und den Kurzschlussstrom  $I_K$  ergibt sich:

$$U_L = (4,45 \pm 0,03) \text{ V} \quad I_K = (2,05 \pm 0,02) \text{ mA}$$

### 5.1.2 Automatisierte Bestimmung der Kennlinie einer Solarzelle.

Als nächstes wird der Messaufbau aus Abbildung 5 hergenommen. Hier wird als Lichtquelle ein Sonnensimulator verwendet, welcher eine einzelne Solarzelle mit zwei verschiedenen Intensitäten  $I_{\text{Licht}}$  bestrahlt.

Zuerst wird hier die Intensität des Sonnensimulators eingestellt. Hierfür wird das Gerät gestartet und einige Minuten gewartet, damit sich die Betriebstemperatur des Gerätes einstellt. Das Power Meter wird anschließend hergenommen und dessen Detektor unter der Lichtquelle platziert. Um später die Lichtintensität  $I_{\text{Licht}}$  zu bestimmen, muss zuerst die Fläche des Detektors bestimmt werden, dies geschieht mit einer direkten Abmessung mit dem Geodreieck. Da es sich um ein rundes Objekt handelt muss jediglich der Durchmesser  $d$  gemessen werden.

$$d = (1,7 \pm 0,2) \text{ cm}$$

Mit dem Leistungsmessgerät kann anschließend die Leistung  $P_{\text{Licht}}$  gemessen werden. Um jedoch die gewünschte Lichtintensität  $I_{\text{Licht}}$  zu bestimmen, wird der theoretisch benötigte Leistungswert  $P_{\text{Licht}}$  mit Glg. (3) ausgerechnet. Anschließend wird am Sonnensimulator solange gedreht, bis am Power Meter die gewünschte Leistung  $P_{\text{Licht}}$  angezeigt wird. Da das Messgerät nicht so genau ist, wird bei der Intensität eine Unsicherheit von  $\Delta I_{\text{Licht}} = 20 \text{ W m}^{-2}$  angenommen. Für die Leistungen ergibt sich:

$$I_{\text{Licht}} = (400 \pm 20) \text{ W m}^{-2} \quad P_{\text{Licht}} = (0,091 \pm 0,016) \text{ W}$$

Der selbe Vorgang wird später für die zweite Messung für eine Intensität von  $I_{\text{Licht}} = 1000 \text{ W m}^{-2}$  wiederholt.

$$I_{\text{Licht}} = (1000 \pm 20) \text{ W m}^{-2} \quad P_{\text{Licht}} = (0,23 \pm 0,04) \text{ W}$$

Die Unsicherheit der Leistung  $P_{\text{Licht}}$  wird mit der Größtfehlermethode bestimmt.

$$\Delta P_{\text{Licht}} = P_{\text{Licht}} \left( \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta I_{\text{Licht}}}{I_{\text{Licht}}} \right)$$

Daraufhin wird der Detektor aus dem Strahlengang genommen und die Solarzelle platziert. Auch diese wird für die spätere Berechnung abgemessen, da diese rechteckig ist, werden somit die Länge und Breite  $l$ ,  $b$  mit dem Geodreieck vermessen.

$$l = (4,0 \pm 0,2) \text{ cm} \quad b = (1,8 \pm 0,2) \text{ cm}$$

Anschließend wird das Programm *Kickstart* am Computer und das Sourcemeter Keithley 2450 gestartet. Nach Anlegen eines neuen Projektes wird unter *Select Instrument* das Keithley 2450 ausgewählt, woraufhin die Option *IV Characterizer* hergenommen wird. Für die Messung werden folgende Parameter eingestellt:

- Source Mode: Voltage Sweep.
- Start Voltage: -1 V.
- Stop Voltage: 1 V.
- Step Voltage: 0.02 V.
- # Of Steps: 101.
- Current Limit: 0.4 A.

Zusätzlich wird auch noch die Option *Measure Current* und *Measure Voltage* ausgewählt. Ein Screenshot von den Einstellungen ist in Abbildung 12 dargestellt.

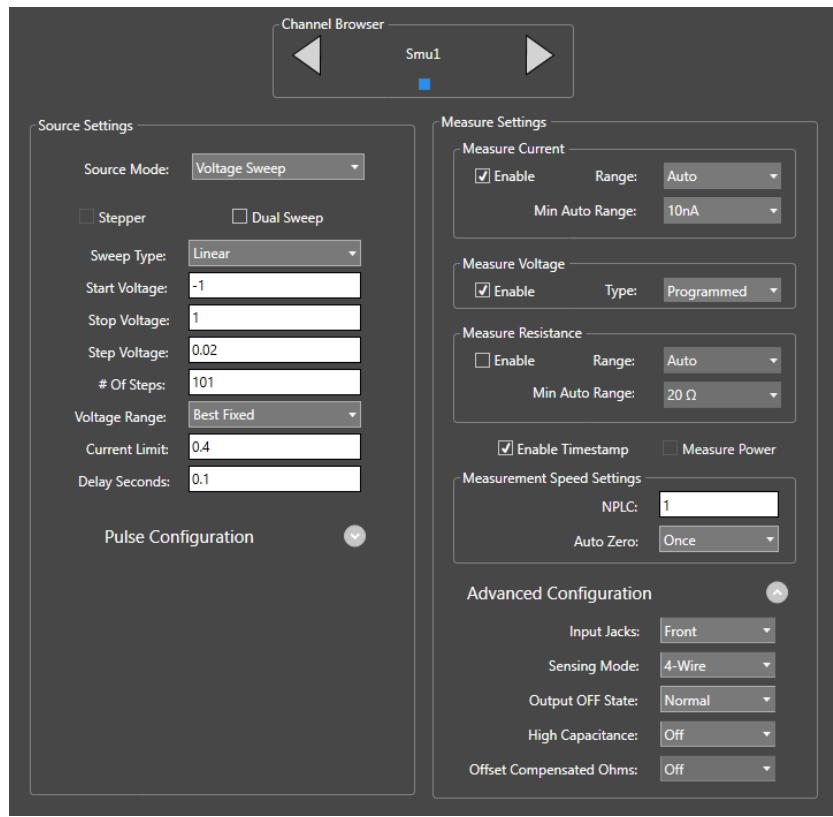


Abbildung 12: Parameterereinstellungen bei Kickstart.

Bei den Einstellungen muss darauf geachtet werden, dass der Computer als Dezimaltrennzeichen einen Punkt anstelle eines Kommas verwendet. Ist dies nicht der Fall muss dies unter Systemsteuerung/Zeit und Region/Datums- Uhrzeit- oder Zahlenformat ändern/weitere Einstellungen/Dezimal-Trennzeichen geändert werden. Für die Messung muss unter dem Reiter *Advanced Configuration* noch die Option *Sensing Mode* auf *4wire* umgestellt werden, um die volle Kennlinie messen zu können. Das Aufnehmen der Messwerte geschieht über den *Execute Test* Knopf.

Die Messung wird mit beiden Intensitäten  $I_{\text{Licht}}$  durchgeführt, weiters wird auch die Dunkelkennlinie ohne Beleuchtung aufgenommen. Die gemessenen Werte sind in Abbildung 13 dargestellt.

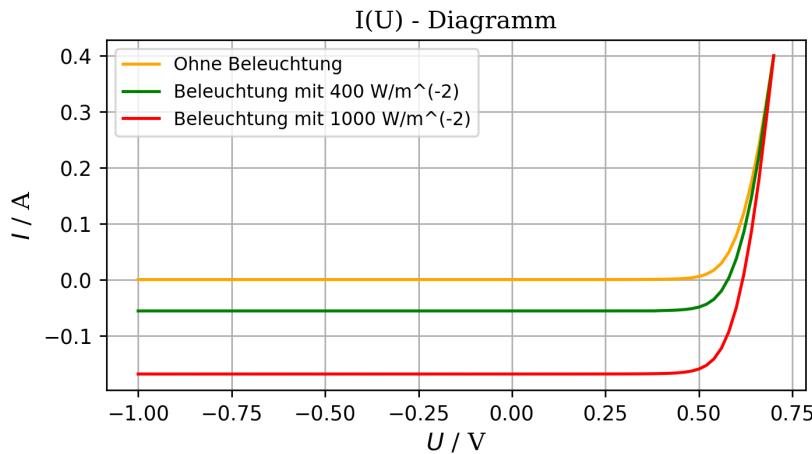


Abbildung 13: Automatisch aufgenommene Kennlinien mit unterschiedlichen Intensitäten  $I_{\text{Licht}}$ .

## 5.2 Versuchsdurchführung - Wärmepumpe

Für das zweite Experiment wird der Aufbau der Wärmepumpe aus 8 hergenommen. Die beiden Behälter werden jeweils mit 4 l Wasser gefüllt und auf die vorgesehenen Stellplatten platziert. Daraufhin wird der Kompressor gestartet und mit *Cassy Lab* am Computer die Messung gestartet. Die Eingangsleistung des Kompressors wird hierbei aus dem Datenblatt (siehe 2) entnommen. Da in der Angabedatei [5] jedoch eine andere Leistung angegeben ist, wird der halbe Abstand dieser beiden Werte als Unsicherheit angenommen.

$$P = (120 \pm 5) \text{ W}$$

Das Programm nimmt den Temperaturverlauf beider Behälter  $T_1$  und  $T_2$  über eine bestimmte Zeit  $t$  auf. Das Zeitfenster wird so gewählt, dass die Messung bis nach dem Knick der kalten Temperaturlinie (Zeitpunkt der Eisbildung) geht, dies beträgt in diesem Versuch  $t = 2050$  s. Um eine homogene Temperaturverteilung in den beiden Behältern zu erreichen, wird mit einem Stab das Wasser ständig umgerührt. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 14 dargestellt.

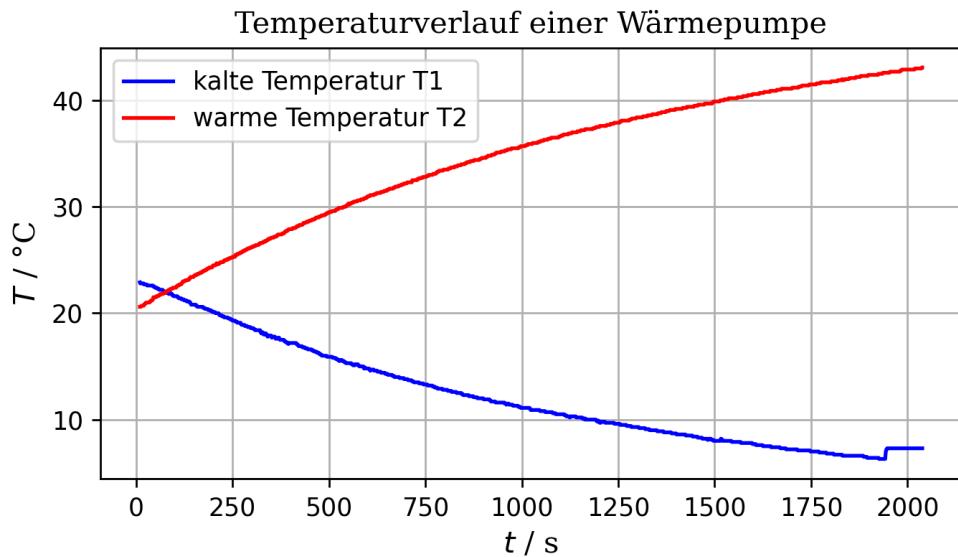


Abbildung 14: Temperaturverlauf  $T_1$  und  $T_2$  der beiden Behälter.

Zusätzlich werden alle 300 s die Drücke der beiden Seiten  $p_1$  und  $p_2$  vor und nach der Entspannung abgemessen. Für die Unsicherheit der Zeit wird  $\Delta t = 10$  s angenommen, die Unsicherheit der Drücke beträgt  $\Delta p = 0,2$  bar. Die gemessenen Werte sind in Tabelle

Tabelle 6: Messwerte bei der Wärmepumpe.

$t$	...	Zeitpunkt der Messung ( $\Delta t = \pm 10$ s)
$p_1$	...	Druck im Niederdruckbereich ( $\Delta p_1 = \pm 0,2$ bar)
$p_2$	...	Druck im Hochdruckbereich ( $\Delta p_2 = \pm 0,2$ bar)

$t / \text{s}$	$p_1 / \text{bar}$	$p_2 / \text{bar}$
0	3,0	6,3
300	2,8	8,2
600	2,5	10,2
900	2,3	11,0
1200	2,1	11,8
1500	1,9	12,4
1800	1,8	12,6
2050	1,9	12,8

Der Druckverlauf beider Seiten wird auch wie der Temperaturverlauf grafisch dargestellt, dies ist in Abbildung 15 ersichtlich.

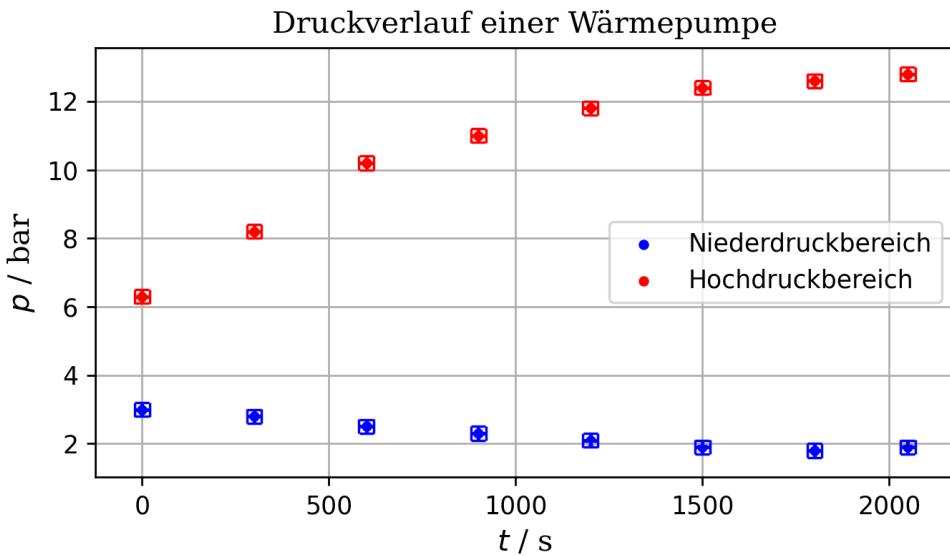


Abbildung 15: Druckverlauf  $p_1$  und  $p_2$  der beiden Behälter.

## 6 Auswertung

In diesem Abschnitt werden nacheinander alle Messergebnisse aus Kapitel 5 ausgewertet. Die Werte werden immer ungerundet bis zu dem Endergebnis verwendet, um möglichst viel Genauigkeit beizubehalten. Sie werden nur zur besseren Darstellung gerundet und inklusive Unsicherheit, welche mit der Größtfehlermethode berechnet wird, angegeben. Die Auswertung, inklusive Berechnung der Werte und grafischer Darstellung der Plots, wird mit einem Python-Programm (siehe Anhang) realisiert.

## 6.1 Auswertung - Solarzelle

### 6.1.1 Auswertung - Manuelle Bestimmung der Kennlinie

Im ersten Teil des Experiments zur Solarzelle wurde mittels manueller Messung eine Strom-Spannungs-Kennlinie in unterschiedlicher Schaltung (parallel, seriell und seriell teilweise abgedeckt) aufgezeichnet. Aus den in Kapitel 5.1.1 gemessenen Strom- und Spannungswerten wird die Leistung  $P$  je Schaltung mittels Glg. (1) berechnet. Die Ergebnisse werden zur besseren Übersicht jedoch in einem Diagramm dargestellt. Ebenso wird in dasselbe Diagramm auch wieder die Strom-Spannungs-Kennlinie geplottet, um den Leistungsverlauf mit der Strom-Spannungs-Kennlinie vergleichen zu können. Die im Diagramm ersichtlichen Fehlerbalken resultieren für die Leistung  $P$  aus der Größtfehlermethode, jene bei der Strom-Spannungs-Kennlinie aus den jeweiligen Messfehlern. Für die drei Schaltungsarten (parallel, seriell und seriell teilweise abgedeckt) wird jeweils ein eigenes Diagramm (Abb. 16 bis Abb. 18) erstellt.

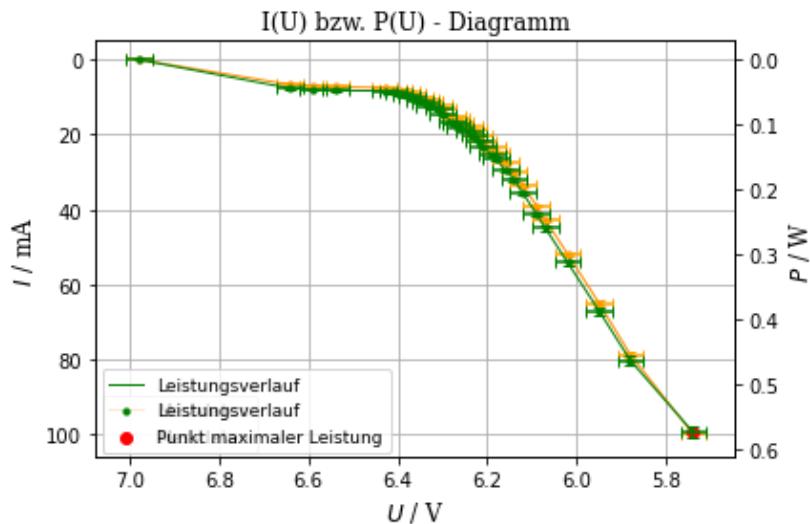


Abbildung 16: Strom-Spannungs-Kennlinie sowie Leistungsverlauf bei Parallel-Schaltung zweier Solarzellen.

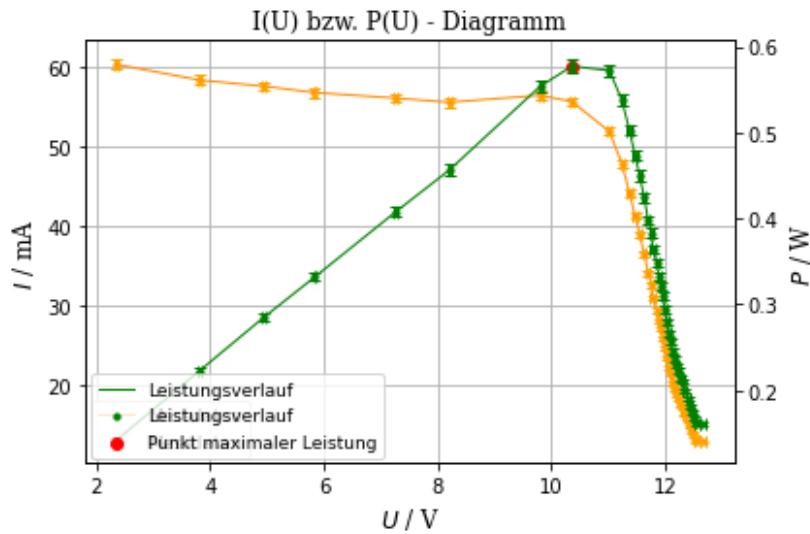


Abbildung 17: Strom-Spannungs-Kennlinie sowie Leistungsverlauf bei Seriell-Schaltung zweier Solarzellen.

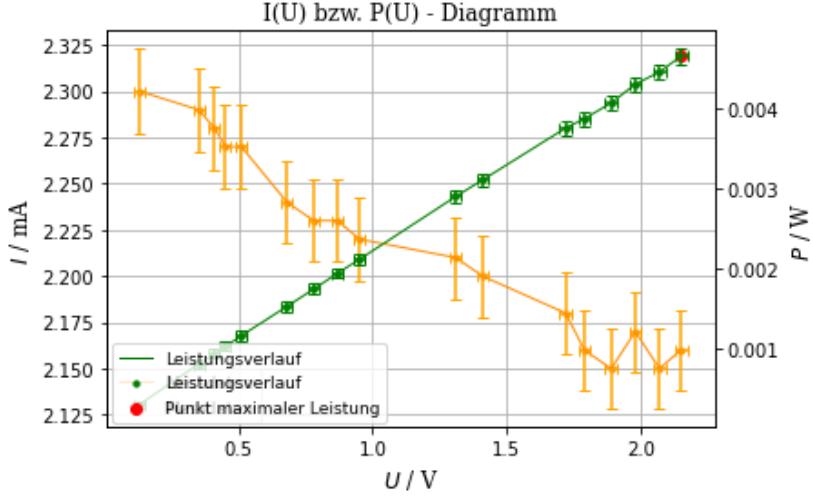


Abbildung 18: Strom-Spannungs-Kennlinie sowie Leistungsverlauf bei Seriell-Schaltung zweier Solarzellen mit partieller Abdeckung.

Aus den obigen Plots (Abb. 16 bis Abb. 18) kann nun der Punkt maximaler Leistung  $P_{MPP}$  bestimmt werden (ist bereits in den Plots eingetragen). Zugehörig zu diesem Punkt wird die Spannung  $U_{MPP}$  und der Strom  $I_{MPP}$  ebenfalls bestimmt.

Zusätzlich kann mit der Leistung  $P_{MPP}$  und den gemessenen Größen Leerlaufspannung  $U_L$  und Kurzschlussstrom  $I_K$  der Füllfaktor  $FF$  mittels Glg. (2) berechnet werden. Die zugehörige Unsicherheit folgt aus der Größtfehlermethode.

$$\Delta FF = \frac{1}{U_L I_K} \cdot \Delta P_{MPP} + \frac{P_{MPP}}{U_L^2 I_K} \cdot \Delta U_L + \frac{P_{MPP}}{U_L I_K^2} \cdot \Delta I_K$$

Die gesammelten Ergebnisse werden zur besseren Übersicht in Tabelle ... eingetragen.

Tabelle 7: Gesuchte Kenngrößen der zwei Solarzellen bei unterschiedlichen Beschaltungen

$P_{MPP}$	...	Punkt maximaler Leistung
$\Delta P_{MPP}$	...	Unsicherheit Punkt maximaler Leistung
$U_{MPP}$	...	Spannung am Punkt maximaler Leistung
$\Delta U_{MPP}$	...	Unsicherheit der Spannung am Punkt maximaler Leistung
$I_{MPP}$	...	Strom am Punkt maximaler Leistung
$\Delta I_{MPP}$	...	Unsicherheit des Stromes am Punkt maximaler Leistung
$FF$	...	Füllfaktor
$\Delta FF$	...	Unsicherheit des Füllfaktors

Schaltung	$P_{MPP}$ / W	$\Delta P_{MPP}$ / W	$U_{MPP}$ / V	$\Delta U_{MPP}$ / V	$I_{MPP}$ / mA	$\Delta I_{MPP}$ / mA	$FF$ / 1	$\Delta FF$ / 1
Parallel	0,573	0,009	5,74	0,03	99,8	0,9	0,591	0,018
Seriell	0,577	0,008	10,36	0,04	55,7	0,6	0,674	0,018
Partiell	0,00464	0,00009	2,15	0,03	2,16	0,03	0,509	0,018

### 6.1.2 Auswertung - Automatische Aufzeichnung der Kennlinie

Im zweiten Teil des Experiments zur Solarzelle, wurde die Strom-Spannungs-Kennlinie automatisiert für unterschiedliche Beleuchtungszustände (keine Beleuchtung, mit  $400 \text{ W/m}^2$  und mit  $1000 \text{ W/m}^2$ ) aufgenommen. Die Datenfiles der jeweiligen Kennlinie werden anschließend in das Python-Programm geladen und es wird ein Fit nach Glg. (5) durchgeführt. Zusätzlich werden für die beiden beleuchteten Fälle noch lineare Fits in den Punkten  $I = 0$ , um den Serienwiderstand  $R_S$  berechnen zu können und  $U = 0$ , um den Parallelwiderstand  $R_P$  bestimmen zu können, durchgeführt. Für jede Beleuchtungsvariante wird ein eigenes Diagramm erstellt (siehe Abb. 19 bis Abb. 21).

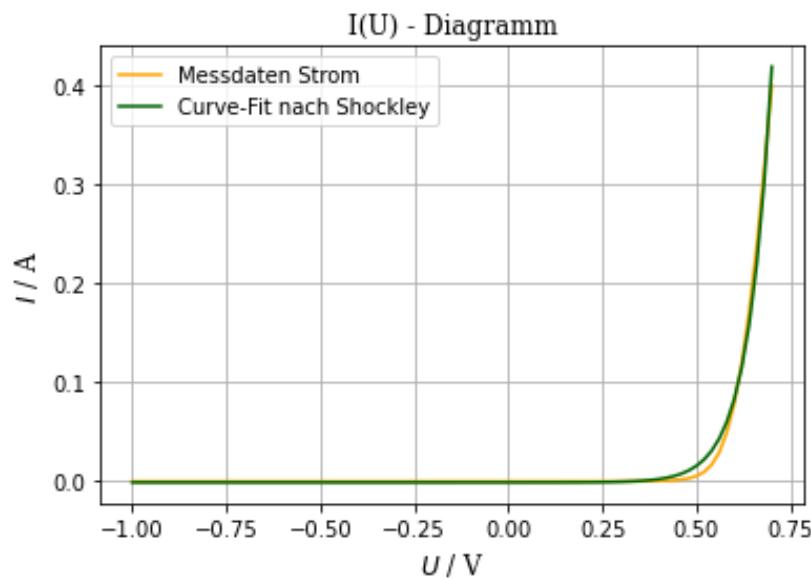


Abbildung 19: Strom-Spannungs-Kennlinie inklusive Fit nach Shockley für eine Solarzelle ohne Beleuchtung.

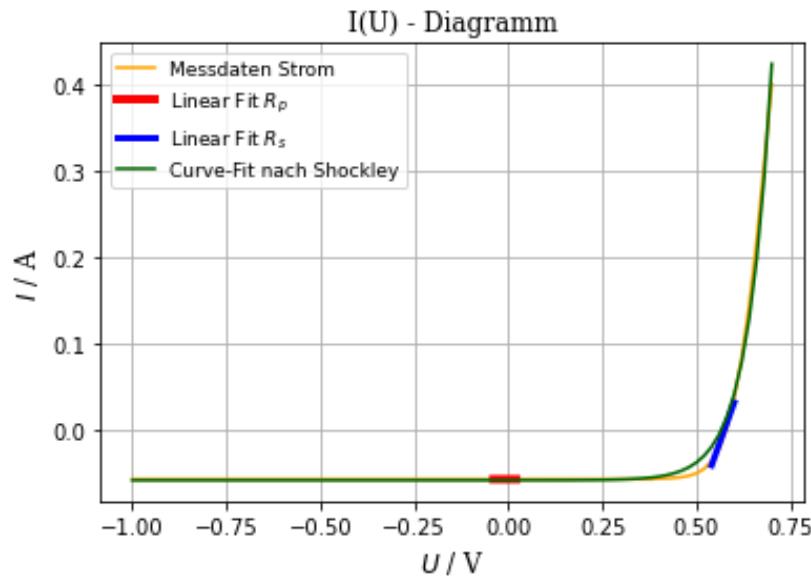


Abbildung 20: Strom-Spannungs-Kennlinie inklusive Fit nach Shockley sowie Lineare Fits für die Widerstände einer Solarzelle bei einer Beleuchtung von  $400 \text{ W/m}^2$ .

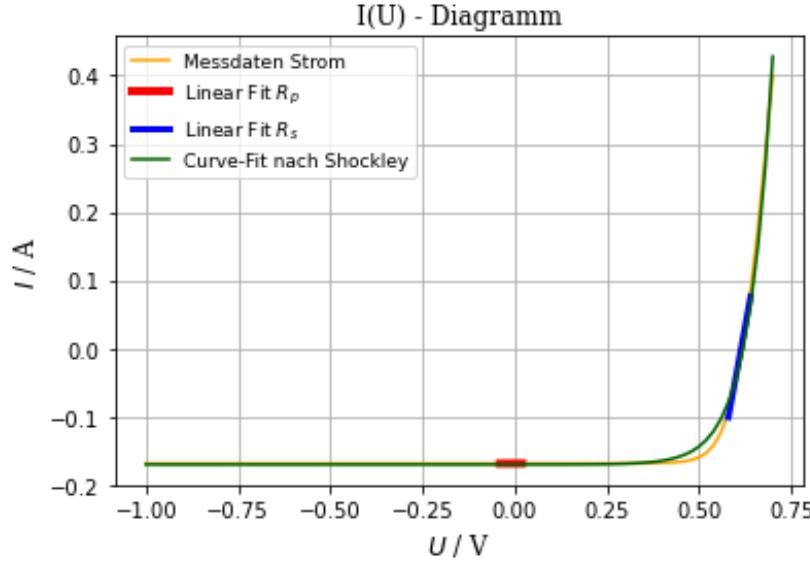


Abbildung 21: Strom-Spannungs-Kennlinie inklusive Fit nach Shockley sowie Lineare Fits für die Widerstände einer Solarzelle bei einer Beleuchtung von  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Beim Fitten nach Glg. (5) werden jeweils die Parameter Sättigungsstrom  $I_S$ , Diodenfaktor  $f$  und der Photostrom  $I_{ph}$  als freie Parameter gewählt und somit mit dem Fit berechnet. Zusätzlich wird bei den beiden Varianten mit Beleuchtung aus den Linearen Fits die Widerstände  $R_P$  (Parallelwiderstand) und  $R_S$  (Serienwiderstand) aus dem Kehrwert der Steigung berechnet. Die Unsicherheiten folgen allsamt aus den Fit-Unsicherheiten. Die auf diese Weise bestimmten Diodenparameter werden zur besseren Übersicht in Tab. 8 eingetragen.

Tabelle 8: Ermittelte Diodenkenngrößen unter unterschiedlichen Beleuchtungsvarianten.

$I_{\text{Licht}}$	...	eingestellte Beleuchtungsstärke ( $\Delta I_{\text{Licht}} = 10 \text{ W/m}^2$ )
$I_S$	...	Sättigungsstrom
$\Delta I_s$	...	Unsicherheit Sättigungsstrom
$f$	...	Diodenfaktor
$\Delta f$	...	Unsicherheit Diodenfaktor
$I_{ph}$	...	Photostrom
$\Delta I_{ph}$	...	Unsicherheit des Photostromes
$R_P$	...	Parallelwiderstand
$\Delta R_P$	...	Unsicherheit des Parallelwiderstands
$R_S$	...	Serienwiderstand
$\Delta R_P$	...	Unsicherheit des Serienwiderstands

$I_{\text{Licht}} / \text{W m}^{-2}$	$I_S / \mu\text{A}$	$\Delta I_S / \mu\text{A}$	$f / 1$	$\Delta f / 1$	$I_{ph} / \text{mA}$	$\Delta I_{ph} / \text{mA}$	$R_P / \text{k}\Omega$	$\Delta R_P / \text{k}\Omega$	$R_S \Omega$	$\Delta R_S / \Omega$
0	5,35	0,10	2,43	0,04	9,5	0,5				
400	7,78	0,14	2,48	0,05	57,2	0,7	10,3	0,2	0,82	0,10
1000	10,5	0,2	2,49	0,04	170,2	0,9	24,6	0,9	0,34	0,03

Anschließend wird mittels Glg. (1) der Leistungsverlauf je Beleuchtungsvariante berechnet. Diese Leistungsverläufe werden zur besseren Vergleichbarkeit in ein gemeinsames Diagramm geplottet (siehe Abb. 22).

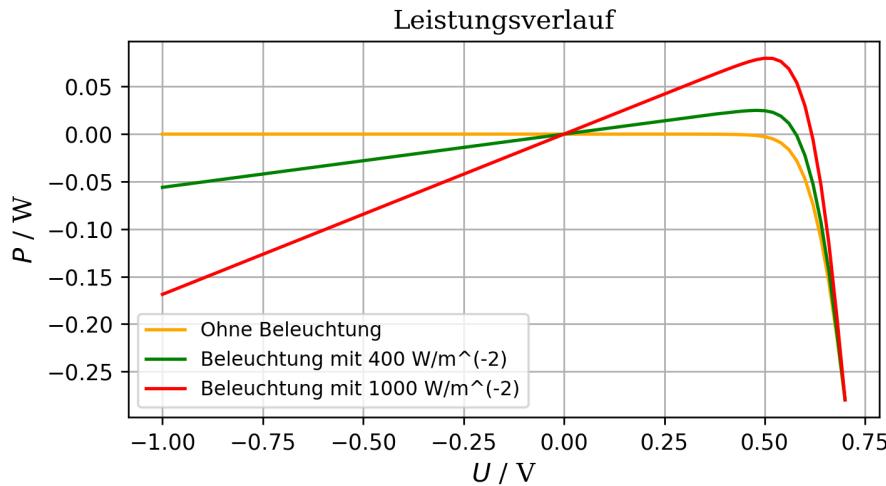


Abbildung 22: Leistungsverlauf bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken.

Aus diesem Diagramm wird für die beiden Fälle mit Beleuchtungsstärke  $> 0 \text{ W/m}^2$  wiederrum der Punkt maximaler Leistung  $P_{MPP}$  bestimmt, sowie die zugehörige Spannung  $U_{MPP}$  und der zugehörige Strom  $I_{MPP}$  am Punkt maximaler Leistung bestimmen. Zusätzlich wird der Kurzschlussstrom  $I_K$  (bei  $U = 0 \text{ V}$ ) und die Leerlaufspannung  $U_L$  (bei  $I = 0 \text{ A}$ ) herausgelesen. Mit Hilfe dieser Parameter wird mittels Glg. (2) der Füllfaktor  $FF$  bestimmt. Die gesammelten Ergebnisse werden zur besseren Übersicht in Tabelle 9 eingetragen.

Tabelle 9: Gesuchte Kenngrößen der zwei Solarzellen bei unterschiedlichen Beschaltungen.

$I_{\text{Licht}}$	...	eingestellte Beleuchtungsstärke ( $\Delta I_{\text{Licht}} = 10 \text{ W/m}^2$ )
$P_{MPP}$	...	Punkt maximaler Leistung
$U_{MPP}$	...	Spannung am Punkt maximaler Leistung
$I_{MPP}$	...	Strom am Punkt maximaler Leistung
$U_L$	...	Leerlaufspannung
$I_K$	...	Kurzschlussstrom
$FF$	...	Füllfaktor

$I_{\text{Licht}} / \text{W m}^{-2}$	$P_{MPP} / \text{mW}$	$U_{MPP} / \text{V}$	$I_{MPP} / \text{mA}$	$U_L / \text{V}$	$I_K / \text{mA}$	$FF / 1$
400	28	0,48	52	0,58	-56	0,77
1000	80	0,50	160	0,62	169	0,76

Anschließend wird für die Berechnung des Wirkungsgrads  $\eta$  noch die Leistung des Lichtes  $P_{\text{Licht}}$ , welches auf die Solarzelle trifft, benötigt. Diese wird mit den in Kapitel 5.1.2 gemessenen Abmessungen der Solarzelle und der in Tabelle 9 angegebenen Intensität des Lichts über Glg. (3) berechnet. Die angebene Unsicherheit folgt aus der Größtfehlermethode.

$$P_{\text{Licht},400} = (0,28 \pm 0,05) \text{ W} \quad \Delta P_{\text{Licht},400} = lb \cdot I_{\text{Licht}} + I_{\text{Licht}} b \cdot \Delta l + I_{\text{Licht}} l \cdot \Delta b$$

$$P_{\text{Licht},1000} = (0,72 \pm 0,12) \text{ W}$$

Mit der Leistung des einfallenden Lichts und den in Tabelle 9 befindlichen Punkten maximaler Leistung kann anschließend über Glg. (4) der Wirkungsgrad  $\eta$  der Solarzelle berechnet werden. Die zugehörige Unsicherheit folgt wieder aus der Größtfehlermethode.

$$\eta_{400} = 0,100 \pm 0,014$$

$$\eta_{1000} = 0,111 \pm 0,018$$

## 6.2 Auswertung - Wärmepumpe

Im zweiten Experiment wurde der Temperaturverlauf einer Wärmepumpe aufgezeichnet. Um aus diesem die Leistungszahl  $\varepsilon$  mittels Glg. (6) berechnen zu können, wird als erstes die Änderung der Wärmemenge  $\dot{Q}$  benötigt. Hierfür muss wiederrum die zeitliche Änderung der heißen Temperatur  $T_2$  bestimmt werden. Um dies Bestimmen zu können wurde die Änderung  $dT_2/dt$  über fixe Zeitintervalle  $\Delta t = 150$  s aus den gemessenen Daten über:

$$\frac{dT_2}{dt} \approx \frac{T_2(t_1) - T_2(t_0)}{\Delta t} \text{ mit } t_1 = (t_0 + 150) \text{ s}$$

berechnet. Anschließend wird  $\dot{Q}$  mittels Glg. (6) berechnet wobei für  $c = 4182 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  (aus [1]) und die Masse  $m = (4,0 \pm 0,2)$  kg eingesetzt wird.

Anschließend wird für die Berechnung der Leistungszahl  $\varepsilon$  über Glg. (6) noch die Leistungsaufnahme des Kompressors benötigt. Diese ist laut Angabe [5]  $P = (120 \pm 5)$  W. Die zugehörige Unsicherheit für die Leistungszahl folgt aus der Größtfehlermethode. Da es sich bei den Ergebnissen für die Änderung  $dT_2/dt$  und  $\dot{Q}$  nur um Zwischenergebnisse für die Berechnung der Leistungszahl  $\varepsilon$  handelt, werden diese nicht explizit im Protokoll angeführt. Die Ergebnisse der Leistungszahl  $\varepsilon$  werden zur besseren Übersicht in einem Diagramm gegen die Temperaturdifferenz der beiden Behälter  $T_2 - T_1$  aufgetragen (siehe Abb. 23).

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{P} \cdot \dot{Q} + \frac{\dot{Q}}{P^2} \cdot \Delta P$$

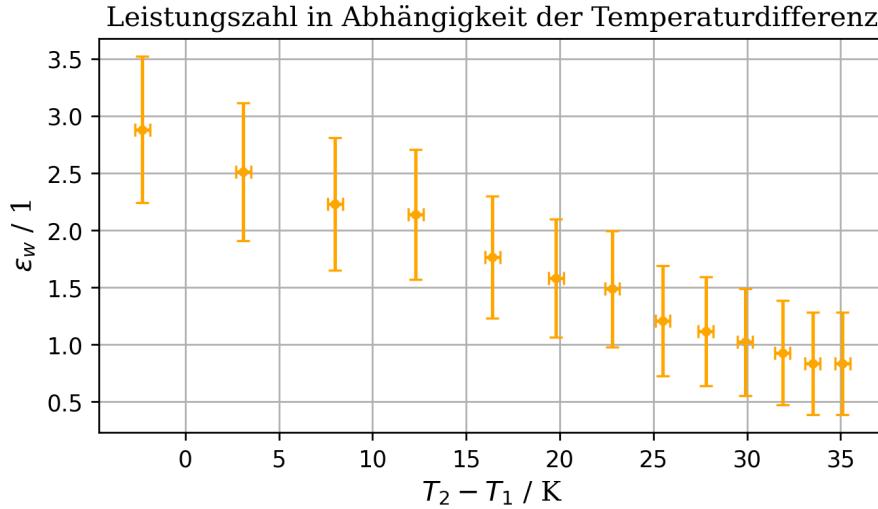


Abbildung 23: Leistungszahl  $\varepsilon$  der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$ .

Um anschließend den Wirkungsgrad der Wärmepumpe  $\eta$  berechnen zu können, wird für die obigen Zeitintervalle die maximal theoretisch erreichbare Leistungszahl  $\varepsilon_{max}$  über Glg. (8) mit den jeweiligen Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen berechnet. Nun kann mittels Glg. (7) der Wirkungsgrad  $\eta$  berechnet werden. Dieser wird ebenfalls zur besseren Übersicht in einem Diagramm gegen die Temperaturdifferenz der beiden Wasserreservoirs  $T_2 - T_1$  aufgetragen (siehe Abb. 24). Die dargestellten Fehlerbalken resultieren aus der Größtfehlermethode.

$$\Delta\eta = \frac{1}{\varepsilon_{max}} \cdot \Delta\varepsilon + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}^2} \cdot \Delta\varepsilon_{max}$$

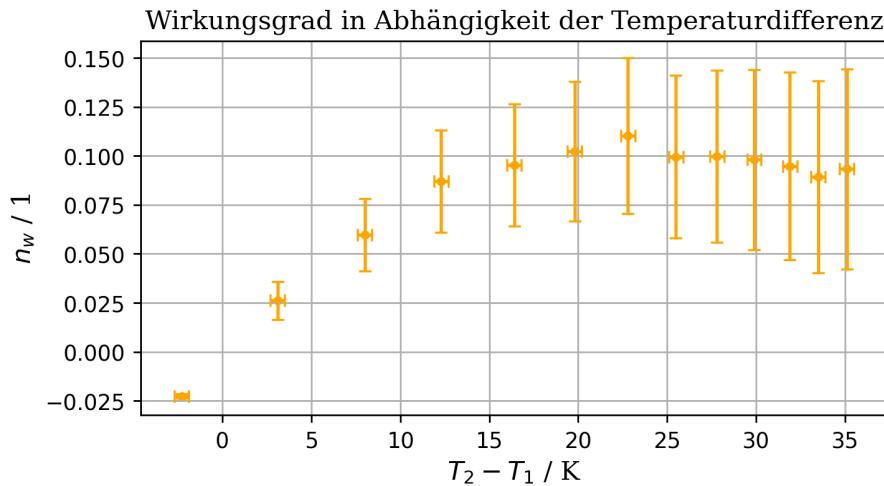


Abbildung 24: Wirkungsgrad  $\eta$  der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$ .

Abschließend werden die gemessenen Drücke und Temperaturen zu Beginn und Ende des Experimentes als Kreisprozess in das ideale  $p$ - $H$ -Diagramm von dem Kältemittel R134a eingetragen. Anschließend kann aus dem Diagramm die Enthalpie  $H$  herausgelesen werden, da der Wert nicht exakt bestimmt werden kann, wird hier eine Ableseunsicherheit von 20 kJ/kg angenommen. Die erhaltenen Werte sind mit den eingesetzten Temperaturen  $T$  und Drücken  $p$  in Tabelle 10 ersichtlich. Da es sich bei dem Manometer um ein relativ zur atmosphärische Druckmessgerät handelt, muss zu jedem Wert der atmosphärische Druck  $p = 1,013$  bar hinzugaddiert werden.

Tabelle 10: Werte für das  $p$ - $H$ -Diagramm am Anfang des Experimentes.

$T$	...	Bestimmte Temperatur ( $\Delta T = \pm 2$ °C)
$p$	...	Gemessener Druck ( $\Delta p = \pm 0,2$ bar)
$H$	...	Abgelesene Enthalpie ( $\Delta H = \pm 20$ kJ/kg)

Punkt	$T / ^\circ C$	$p / \text{bar}$	$H / \text{kJ kg}^{-1}$
(a)	7	3,6	215
(b)	17	3,6	410
(c)	43	7,2	430
(d)	27	7,2	215

Der idealisierte Kreisprozess am Anfang des Experimentes ist in Abbildung 25 dargestellt.

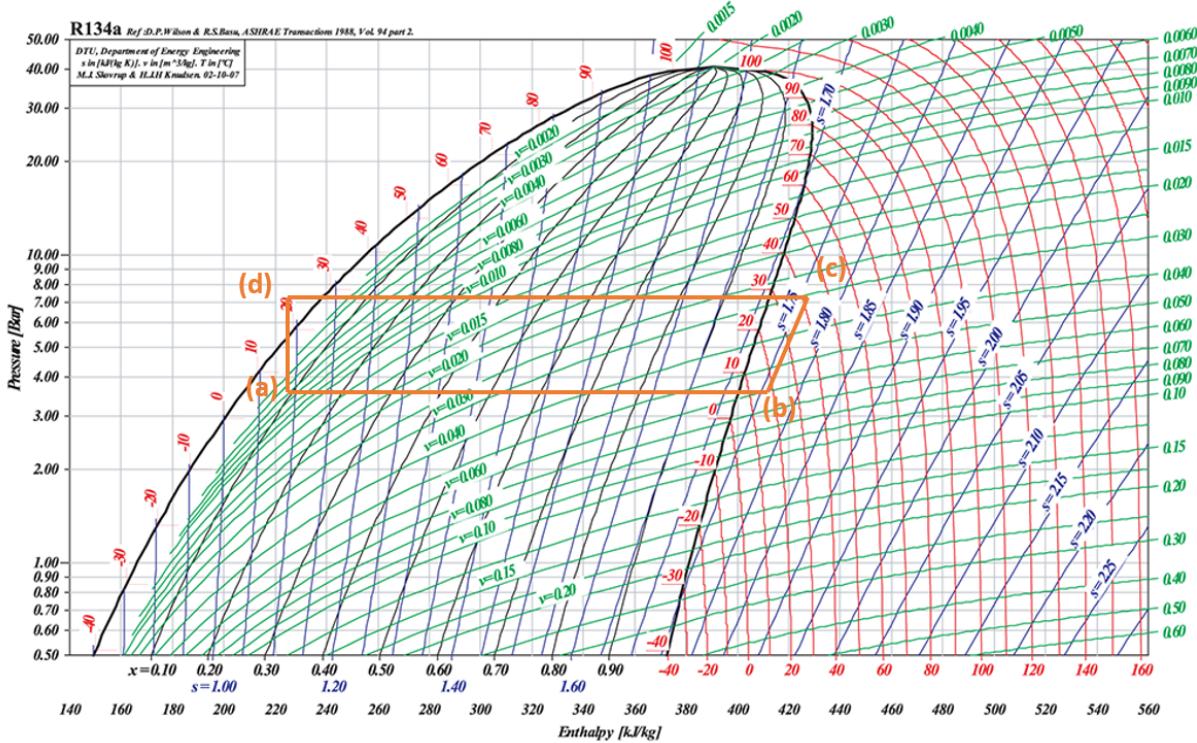


Abbildung 25: Kreisprozess im  $p$ - $H$ -Diagramm am Anfang des Experimentes. [10]

Der selbe Vorgang wird für den Kreisprozess am Ende des Experimentes wiederholt. Die gemessenen Daten sind in Tabelle 11 ersichtlich, das Diagramm in Abbildung 26 dargestellt.

Tabelle 11: Werte für das  $p$ - $H$ -Diagramm am Ende des Experimentes.

$T$	...	Bestimmte Temperatur ( $\Delta T = \pm 2$ °C)
$p$	...	Gemessener Druck ( $\Delta p = \pm 0,2$ bar)
$H$	...	Abgelesene Enthalpie ( $\Delta H = \pm 20$ kJ/kg)

Punkt	$T$ / °C	$p$ / bar	$H$ / kJ kg $^{-1}$
(a)	0	2,8	255
(b)	3	2,8	400
(c)	64	15,2	430
(d)	46	15,2	255

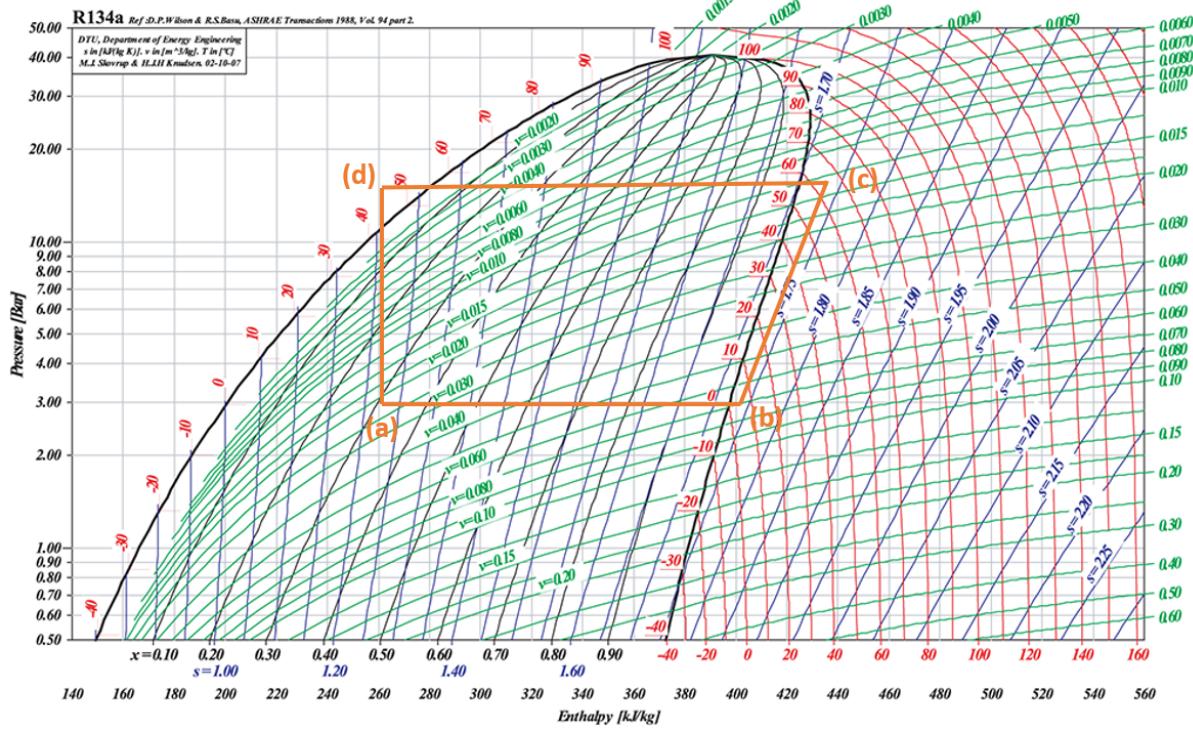


Abbildung 26: Kreisprozess im  $p$ - $H$ -Diagramm am Ende des Experimentes. [10]

## 7 Diskussion

### 7.1 Diskussion - Solarzelle

Im ersten Teil des Solarzellen-Experiments wurde die Strom-Spannungs-Kennlinie von zwei Solarzellen in unterschiedlicher Schaltung manuell gemessen. Vergleicht man hierbei die erhaltenen Kennlinien für die ersten beiden Fälle (parallel bzw. seriell-Schaltung) mit dem theoretischen Verlauf einer Diode (siehe [7]) so kann erkannt werden, dass das Verhalten der Theorie entspricht. Zusätzlich können die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Schaltungsarten beobachtet werden. Werden die beiden Solarzellen in Serie geschaltet so ergibt sich eine höhere Spannung, welche es leichter ermöglicht die nötige Ladungsspannung von Akkumulatoren zu erreichen. Deckt man jedoch bei in Serie geschalteten Solarzellen einen Bereich ab, bricht die Leistung nahezu völlig ein, weshalb eine Serienschaltung in der Praxis eher unbrauchbar ist. Diesen Nachteil hätte man bei einer Parallelschaltung nicht, jedoch konnte im Experiment gut beobachtet werden dass die erforderliche Ladespannung für Akkumulatoren ungleich schwerer zu erreichen ist, da zwei Solarzellen im Vergleich zur Seriellen Schaltung nur circa die halbe Spannung liefern. Weiteres ist bei diesem Experiment auf die Temperatur der Solarzellen zu achten, da diese bei steigender Temperatur unterschiedliche Ergebnisse liefern. Diese Beobachtung wurde in Abbildung 10 festgehalten, als man im Zuge des Experiments versucht hat weitere Werte für den Knick-Bereich aufzunehmen, dies nicht möglich war, da die Solarzelle in der Zwischenzeit eine höhere Temperatur erreicht hatte. Sollte die Temperatur im Laufe des Experiments zu hoch werden kann gar die komplette Funktionalität der Solarzelle einbrechen.

Im zweiten Teil des Solarzellen-Experiments wurde die Strom-Spannungs-Kennlinie einer einzelnen Solarzelle unter unterschiedlichen Beleuchtungsstärken aufgenommen. Aus diesen Kennlinien wurde mit Hilfe von Fits (nach Glg. (5) und nach einem linearen Zusammenhang) und der entsprechenden Wahl von freien Parametern die Diodenparameter der Solarzelle berechnet. Vergleicht man die Größenordnungen der erhaltenen Parameter Sättigungsstrom  $I_S \approx 10^{-6}$  A, Diodenfaktor  $f \approx 2,5$ , Parallelwiderstand  $R_P \approx 10^5$  Ω und Serienwiderstand

$R_S \approx 1 \Omega$  mit den Größenordnungen aus der Angabe [7] so kann erkannt werden, dass alle Parameter in den zu erwarteten Wertebereichen liegen. Dies lässt auf eine korrekte Durchführung des Experiments schließen. Zusätzlich wurde der Füllfaktor  $FF_{400} = 0,77$  und  $FF_{1000} = 0,76$  für beide Beleuchtungsstärken berechnet. Als erstes kann beobachtet werden, dass die erhaltenen Werte nicht signifikant voneinander abweichen. Vergleicht man die Werte für den Füllfaktor zusätzlich mit den Werten für eine kristalline Solarzelle  $FF = 0,75 - 0,85$  (siehe [3]) kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse realistisch sind. Anschließend können noch die berechneten Wirkungsgrade ( $\eta_{400} = 0,100 \pm 0,014$  und  $\eta_{1000} = 0,111 \pm 0,018$ ) bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken betrachtet werden, auch diese Werte weichen nicht signifikant voneinander ab. Vergleicht man diese Werte mit theoretischen Werten (siehe [8]) sieht man, dass der erreichte Wirkungsgrad von circa 10% etwas unter dem Erwartungswert liegt. Dies könnte vor allem an der Berechnung der Einstrahlungsleistung  $P_{\text{Licht}}$  liegen, da die gemessene Fläche nicht zwingendermaßen die gesamte wirksame Fläche ist.

## 7.2 Diskussion - Wärmepumpe

Wie bei den Messwerten aus Diagramm 14 zu erkennen ist, rauschen beide Temperaturkurven ein wenig. Dies kann auf ungenaue Digitalisierung der Werte und auf ungleichmäßiges Umrühren der Flüssigkeiten im Behälter mit den Stäben zurückgeführt werden. Auch kann erkannt werden, dass die kalte Temperaturkurve  $T_1$  etwas mehr verrauscht ist, da bei sinkender Temperatur (und vor allem Eisbildung) die Flüssigkeit schwerer zu verrühren ist. Bei der warmen Temperatur  $T_2$  findet außerdem eine automatische Durchmischung der Flüssigkeit aufgrund von Konvektionen statt. Bei  $t \approx 1900$  s kann bei der blauen Kurve  $T_1$  ein Knick erkannt werden, dies ist der Zeitpunkt der Eisbildung im kalten Gefäß. Die Werte danach sind fast konstant, da der Temperaturfühler komplett mit Eis bedeckt und nur dessen Temperatur gemessen wurde.

Bei der Auswertung wurde der differentielle Unterschied der Temperatur über die Differenz  $T_2 - T_1$  über die Zeit  $t$  angenähert. Durch diese Vorgehensweise wird jedoch die Leistungszahl ungenau und eine hohe Unsicherheit ergibt sich, wie in Abbildung 23 zu erkennen ist. Außerdem ist hier zu erkennen, dass die Leistungszahl  $\varepsilon$  mit zunehmenden Temperaturunterschied  $T_2 - T_1$  linear abnimmt, da bei großer Differenz die Wärmepumpe die Leistung  $P$  immer weniger effizient umsetzen kann. Ab einem Unterschied von  $\Delta T = 30$  °C ist sogar eine Leistungszahl  $\varepsilon < 1$  festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die bereits hohe Temperatur ihre Wärme schnell wieder an die Umgebung abgibt. Eine bessere Beschreibung des Kompressors (genauer Leistungswert beziehungsweise dessen Temperaturabhängigkeit) würde den Messwert präzisieren.

In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad  $\eta$  stark von der Temperatur  $T$  und somit dem Arbeitspunkt abhängt. Bei niedrigen Temperaturunterschieden  $T_2 - T_1$  ist auch der Wirkungsgrad  $\eta$  niedrig, wobei der Punkt der maximalen Leistung um den Wert der Raumtemperatur  $\Delta T \approx 22$  °C liegt. Bei höheren Temperaturen nimmt der Wirkungsgrad  $\eta$  auch wieder ab. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass bei niedrigen Temperaturdifferenzen die noch hohe Leistungszahl  $\varepsilon$  den Wirkungsgrad stark ansteigen lässt, wobei nach dem Punkt der maximalen Leistung die Carnot-Leistungszahl  $\varepsilon_{\max}$  den Wirkungsgrad begrenzt. Der maximale Wirkungsgrad beträgt hier  $\eta = (0,11 \pm 0,04)$  und somit circa 11%. Vergleicht man dies mit den typischen Werten [11] einer Wärmepumpe  $\eta_{th} = 0,45 - 0,55$  ist zu erkennen, dass der bestimmte Wert davon abweicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Aufbau dieses Experimentes keinerlei Isolierung vorhanden ist und somit ein hoher Verlust durch die Umgebung stattfindet. Weiters handelt es sich bei den Wärmespeichern um offene Behälter, bei normalen Wärmepumpen hingegen um ein abgeschlossenes Heizungssystem.

Zuletzt wurde der Druck  $p$  und die zugehörige Temperatur  $T$  im  $p$ - $H$ -Diagramm des Kühlmittels R134a aufgetragen, wobei ein Kreisprozess vor (Abbildung 25) und nach (Abbildung 26) dem Experiment aufgetragen wird. Aus diesem konnte anschließend die Enthalpie  $H$  herausgelesen werden, wobei jedoch kein vergleichbarer Wert gefunden werden konnte. Da die Grafiken jedoch mit den Erwartungen aus [5] übereinstimmen, kann auf eine korrekte Durchführung des Experimentes geschlossen werden.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Zusammenfassung - Solarzelle

Beim ersten Experiment wurde die Kennlinie von zwei Solarzellen in unterschiedlicher Beschaltung manuell gemessen. Aus diesen gemessenen Strom- und Spannungswerten wurde der Leistungsverlauf berechnet (siehe Abb. 16 bis Abb. 18). Anschließend wurde die geforderten Kennzahlen herausgelesen bzw. berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Im zweiten Teil wurde die Kennlinie einer einzelnen Solarzelle automatisiert unter unterschiedlichen Beleuchtungsstärken aufgenommen. Hierbei wurde wiederum der Leistungsverlauf berechnet (siehe Abb. 22). Zusätzlich wurde über unterschiedliche Fit-Methoden (nach Glg. (5) und nach einem linearen Zusammenhang) die Diodenparameter bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Anschließend wurde noch aus der Leistungskennlinie und anschließender Berechnung der zweite Teil der Diodenparameter bestimmt. Dessen Ergebnisse sind in Tabelle 9 eingetragen.

### 8.2 Zusammenfassung - Wärmepumpe

Bei dem Versuch mit der Wärmepumpe wurde der Temperaturverlauf beider Behälter  $T_2$  und  $T_1$  über einen Zeitraum  $t$  aufgenommen, womit anschließend die Leistungszahl  $\varepsilon$  (Abbildung 23) und der Wirkungsgrad  $\eta$  24 abhängig von der Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$  ausgerechnet und grafisch dargestellt wurde. Dabei wurde auch der maximale Wirkungsgrad der Wärmepumpe bestimmt:

$$\eta = (0,11 \pm 0,04)$$

Zusätzlich wurde auch der Druck  $p$  und die Temperatur  $T$  als Kreisprozess in dem  $p$ - $H$ -Diagramm des Kühlmittels R134a vor (Abbildung 25) und nach (Abbildung 26) dem Experiment aufgetragen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2017.
- [2] Leybold didactics. Lb 666193 datasheet. <https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/6/666/666209d.pdf>, 2022. Accessed: 2022-06-15.
- [3] Stefan Finke. Der füllfaktor in der photovoltaik. <https://photovoltaiksolarstrom.com/photovoltaiklexikon-fuellfaktor/>, 2022. Accessed: 2022-06-22.
- [4] Fluke. Fluke175 truerms datasheet. <https://www.fluke.com/de-at/produkt/elektrische-pruefungen/digitalmultimeter/fluke-175>, 2022. Accessed: 2022-06-15.
- [5] Andreas Hohenau. Wärmepumpe. [https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1753448/mod\\_resource/content/1/W%C3%A4rmepumpe.pdf](https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1753448/mod_resource/content/1/W%C3%A4rmepumpe.pdf), 2022. Accessed: 2022-06-04.
- [6] Keithley. 2450 sourcemeter datasheet. [https://download.tek.com/datasheet/1KW-60904-2\\_2450\\_Datasheet\\_082821.pdf](https://download.tek.com/datasheet/1KW-60904-2_2450_Datasheet_082821.pdf), 2022. Accessed: 2022-06-15.
- [7] Günther Paltauf Peter Knoll. Solarzelle. [https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1753447/mod\\_resource/content/3/Solarzelle.pdf](https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1753447/mod_resource/content/3/Solarzelle.pdf), 2022. Accessed: 2022-06-04.
- [8] Photovoltaik.org. Photovoltaik wirkungsgrad. <https://www.photovoltaik.org/wissen/photovoltaik-wirkungsgrad>, 2022. Accessed: 2022-06-22.
- [9] Spectra Physics. 407a powermeter datasheet. [http://www.ece.ualberta.ca/~lpfs/uploads/manuals/Spectra\\_Physics\\_407A\\_Power\\_Meter.pdf](http://www.ece.ualberta.ca/~lpfs/uploads/manuals/Spectra_Physics_407A_Power_Meter.pdf), 2022. Accessed: 2022-06-15.
- [10] Swep. R134a. <https://www.swep.de/refrigerant-handbook/appendix/appendix-b/>, 2022. Accessed: 2022-06-22.
- [11] Wikipedia. Wirkungsgrad wärmepumpe. <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmepumpe>, 2022. Accessed: 2022-06-22.

## 10 Anhang

### 10.1 Python-Code

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Tue Jun 14 10:44:12 2022
4
5 @author: Fabian Michael Dixer
6 """
7
8 from numpy import *
9 from matplotlib.pyplot import *
10 from sklearn.linear_model import LinearRegression
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 from scipy.optimize import least_squares
13 import math as m
14
15 path='G:\\.shortcut-targets-by-id\\1J8zn1RK033RDev7DZN8337wJKXN8U7Qe\\L2 -
    Fortgeschrittenenpraktikum 2\\3. Wirkungsgrad\\'
16
17 # %-----Versuch 1 Solarzelle-----
18 files = ['parallel.txt', 'seriell.txt', 'partiell.txt'] #Datenfiles Solarzelle Versuch 1
19
20 ik = [145.2*10**(-3), 67.2*10**(-3), 2.05*10**(-3)] #gemessener Kurzschlussstrom je
    Schaltung
21 ul = [6.67, 12.75, 4.45] #Selbiges f r Leerlaufspannung
22
23 dik, dul = [],[] #Unsicherheiten f r Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung
24
25 #Bef llen der Listen laut Herstellerunsicherheit
26 for i in range(len(ik)):
27     dik.append(ik[i]*1*10**(-2)*10**3+ 0.03*10**(-3))
28     dul.append(ul[i]*0.15*10**(-2) + 20*10**(-3))
29
30 #Ausgabe f rs Protokoll
31 #print("dik", dik)
32 #print(dul)
33
34 #Formel zur Berechnung von F llfaktor anlegen
35 def calcff (imax, umax, ik1, ul1):
36     return imax*umax/(ik1*ul1)
37
38 def calcdff (imax, umax, ik1, ul1, dik1, dpp1, dul1):
39     return 1/(ik1*ul1)*dpp1 + imax*umax/(ul1**2 * ik1)*dul1 + imax*umax/(ul1 * ik1**2)*dik1
40
41 d = 0 #Durchlaufvariable
42 for f in files: #Durchgehen aller oben angelegten Files, da Auswertung je File notwendig
43     my_data = genfromtxt(path + f, delimiter=';') #Daten einlesen
44     u1 = my_data[:,0] #Spannungsliste anlegen
45     i1 = my_data[:,1] #Stromliste anlegen
46
47     di1 = [] #Unsicherheit Strom
48     du1 = [] #Unsicherheit Spannung
49     p1 = [] #Leistungsarray
50     for i in range(len(u1)):
51         p1.append(abs(u1[i])*i1[i]*10**(-3)) #Berechnung der Leistung
52         di1.append(i1[i]*1*10**(-2)+ 0.03*10**(-3)) #Unsicherheitsberechnung
53         du1.append(u1[i]*0.15*10**(-2) + 20*10**(-3))
54
55     dp1 = []
56     for i in range(len(di1)):
57         dp1.append(i1[i]*10**(-3)*du1[i] + u1[i]*di1[i]*10**(-3))
58
59 #Ausgabe der Unsicherheiten
60 #for i in range(len(di1)):
61 #    print('Unsicherheit Strom %s: %f mA' % (f, di1[i]))
62 #    print('Unsicherheit Spannung %s: %f V' % (f, du1[i]))
```

```

63 i_max_p = p1.index(max(p1)) #Punkt maximaler Leistung suchen
64 #print('Punkt maximaler Leistung index = %f , p = %f      %f' % (i_max_p, p1[i_max_p], dp1
65 [i_max_p])) #Ausgabe f r Protokoll
66 #print('Punkt maximaler Leistung strom = %f      %f, spannung = %f      %f' % (i1[i_max_p],
67 di1[i_max_p], u1[i_max_p], du1[i_max_p])) #Zugeh rige Spannung und Strom ausgeben
68
69 #Plotten der Daten Druck
70 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
71 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
72
73 main_axes.set_title('I(U) - Diagramm', fontsize=12, fontname='serif')
74 main_axes.set_xlabel('$U$ / V', fontsize=12, fontname='serif')
75 main_axes.set_ylabel('$I$ / mA', fontsize=12, fontname='serif')
76 grid()
77 if f == 'parallel.txt':
78     gca().invert_yaxis()
79     gca().invert_xaxis()
80 if f == 'seriell.txt':
81     my_data_knick = genfromtxt(path + 'knick.txt', delimiter=';')
82     u_knick = my_data_knick[:,0]
83     i_knick = my_data_knick[:,1]
84     scatter(u_knick, i_knick, color='red', s= 10, label = 'Knick - Nachmessung')
85
86 scatter(u1, i1, color='orange', s = 10, label='Messdaten')
87 errorbar(u1, i1, yerr= di1, xerr = du1, linestyle='None', capthick=1, capsizes=3, color='orange')
88 legend()
89
90 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Solarzelle1_Mess_%i.png' % d, bbox_inches='tight')
91
92 #Plotten der Daten
93 fig, ax1 = subplots()
94
95 ax1.set_title('I(U) bzw. P(U) - Diagramm', fontsize=12, fontname='serif')
96 ax1.set_xlabel('$U$ / V', fontsize=12, fontname='serif')
97 ax1.set_ylabel('$I$ / mA', fontsize=12, fontname='serif')
98
99 ax2 = ax1.twinx()
100 ax2.set_ylabel('$P$ / W', fontsize=12, fontname='serif')
101
102 if f == 'parallel.txt':
103     ax1.invert_yaxis()
104     ax1.invert_xaxis()
105     ax2.invert_yaxis()
106
107 ax1.grid()
108
109 #ax1.plot(u1, i1, color='orange', label='Messdaten Strom')
110 ax1.scatter(u1, i1, color='darkorange', label='Messdaten', s=10)
111 ax1.plot(u1, i1, color='darkorange', label='Messdaten', linewidth = 1)
112 ax1.errorbar(u1, i1, yerr= di1, xerr = du1, linestyle='None', capthick=1, capsizes=3,
color='orange')
113 ax2.scatter(u1, p1, color='green', label='Leistungsverlauf', s = 10)
114 ax2.plot(u1, p1, color='green', label='Leistungsverlauf', linewidth = 1)
115 ax2.errorbar(u1, p1, yerr= dp1, xerr = du1, linestyle='None', capthick=1, capsizes=3,
color='green')
116 ax2.scatter(u1[i_max_p], p1[i_max_p], color='red', label='Punkt maximaler Leistung')
117
118 ax1.legend(prop={'size': 9}, loc = (0.01, 0.01))
119 ax2.legend(prop={'size': 9}, loc = (0.01, 0.01))
120
121 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Solarzelle1_%i.png' % d, bbox_inches='tight')
122 d+=1
123 #%%-----Versuch 2 Solarzelle-----

```

```

124 #files2 = ['test\\hell1400CSV.csv', 'test\\hell1000CSV.csv']
125 files2 = ['test\\hell1400CSV - Final.csv', 'test\\hell1000CSV - Final.csv']
126
127 e0 = 1.602176634*10**(-19) #Elektronenladung
128 kb = 1.38964852*10**(-23) #Boltzmannkonstante
129 T = 295.15 #Temperatur während dem Experiment
130
131 #Shockley Gleichung anlegen
132 def calcii2(ub, is1, f1, iph):
133     return is1*(exp((e0*ub)/(f1*kb*T)) - 1) - iph
134
135 #Gleichung für Linearen Fit anlegen
136 def linear(x, k, d):
137     return k*x + d
138
139 #part 1 Dunkelkennlinie
140 my_data2 = genfromtxt(path + 'test\\dunkelCSV - Kopie.csv', delimiter=',', skip_header=1)
141
142 #Daten für Strom und Spannung ohne Beleuchtung
143 u2 = my_data2[:,2]
144 i2 = my_data2[:,3]
145 #Leistung ohne Beleuchtung
146 p2 = []
147 for i in range(len(u2)):
148     p2.append(u2[i]*(-i2[i]))
149
150 #bounds für "optimalere" Fit Ergebnisse
151 bmin = [1E-9, 1, 1E-9]
152 bmax = [1E-3, 2.5, 1]
153 #fit nach Shockley
154 popt2, pcov = curve_fit(calcii2, u2, i2, bounds = [bmin, bmax])
155 perr = np.sqrt(np.diag(pcov))
156 print('Ohne Beleuchtung ist, f, iph', popt2, perr) #Ausgabe der Fit-Parameter
157 ifit2 = calcii2(u2, *popt2)
158
159 #Plotten der Daten
160 fig, ax1 = subplots()
161
162 ax1.set_title('I(U) - Diagramm', fontsize=12, fontname='serif')
163 ax1.set_xlabel('$U$ / $V$', fontsize=12, fontname='serif')
164 ax1.set_ylabel('$I$ / $A$', fontsize=12, fontname='serif')
165
166 ax1.grid()
167
168 ax1.plot(u2, i2, color='orange', label='Messdaten Strom')
169 ax1.plot(u2, ifit2, color='darkgreen', label='Curve-Fit nach Shockley')
170
171 ax1.legend()
172
173 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Ohne_Beleuchtung_Fit.png', bbox_inches='tight')
174
175 ii = 0 #Durchlaufvariable
176 #Part 2 Hellkennlinie
177 for f in files2:
178     my_data3 = genfromtxt(path + f, delimiter=';', skip_header=1)
179     #Daten für Strom und Spannung mit Beleuchtung
180     u3 = my_data3[:,2]
181     i3 = my_data3[:,4]
182
183     #Anlegen einzelner Variablen je File für separate Plots
184     if f == 'test\\hell1400CSV - Final.csv':
185         p3 = []
186         u3_mess = my_data3[:,2]
187         i3_mess = my_data3[:,4]
188
189         for i in range(len(u3)):
190             p3.append(u3[i]*(-i3[i]))

```

```

192     else:
193         p4 = []
194         u4_mess = my_data3[:, 2]
195         i4_mess = my_data3[:, 4]
196
197         for i in range(len(u3)):
198             p4.append(u3[i] * (-i3[i]))
199
200     #Fits mittels Shockley Gleichung
201     popt3, pcov = curve_fit(calci2, u3, i3, bounds = [bmin, bmax])
202     perr = np.sqrt(np.diag(pcov))
203     print(popt3, perr) #Ausgabe der Fit-Parameter
204     ifit3 = calci2(u3, *popt3)
205
206
207     #Plotten der Daten
208     fig, ax1 = subplots()
209
210     ax1.set_title('I(U) - Diagramm', fontsize=12, fontname='serif')
211     ax1.set_xlabel('$U$ / V', fontsize=12, fontname='serif')
212     ax1.set_ylabel('$I$ / A', fontsize=12, fontname='serif')
213
214     ax1.grid()
215
216     ax1.plot(u3, i3, color='orange', label='Messdaten Strom')
217     for i in range(len(u3)): #Durchgehen aller Spannungswerte
218         if u3[i] == 0: #Falls Spannung = 0 Fit starten
219             linfit_rp, pcov_rp = curve_fit(linear, u3[i-2:i+2], i3[i-2:i+2]) #Fit knapp um
220             den Spannungsnullpunkt durchf hren
221             perr_rp = np.sqrt(np.diag(pcov_rp))
222             print('Parallelwiderstand: %f %f' % (1/linfit_rp[0], 1/linfit_rp[0]**2 *
223             perr_rp[1])) #Ausgabe des Parallelwiderstands
224             if f == 'test\\hell400CSV - Final.csv': #Zusatzabfrage welches File aktuell
225             durchsucht wird
226                 ik_3 = i3[i] #Speichern des Kurzschlussstromes (keine Spannung)
227             else:
228                 ik_4 = i3[i]
229                 linear_rp = linear(u3[i-2:i+2], *linfit_rp) #Berechnung der Fit-Linie
230                 ax1.plot(u3[i-2:i+2], linear_rp, color='red', label = 'Linear Fit $R_p$', linewidth= 4) #Plot der Fit-Linie
231                 if i3[i] > 0 and i3[i] < 0.0091: #Suchen nach Strom-Nullpunkt
232                     linfit_rs, pcov_rs = curve_fit(linear, u3[i-2:i+2], i3[i-2:i+2]) #Berechnung
233                     eines Linearen Fits knapp um den Stromnullpunkt
234                     perr_rs = np.sqrt(np.diag(pcov_rs))
235                     print('Serienwiderstand: %f %f' % (1/linfit_rs[0], 1/linfit_rs[0]**2 *
236                     perr_rs[0])) #Ausgabe des Serienwiderstands
237                     if f == 'test\\hell400CSV - Final.csv': #Abfrage welches File gerade durchlaufen
238                     wird
239                     ul_3 = u3[i] #Leerlaufspannung speicher (kein Strom)
240                 else:
241                     ul_4 = u3[i]
242
243                     linear_rs = linear(u3[i-2:i+2], *linfit_rs) #Fit-Linie berechnen
244                     ax1.plot(u3[i-2:i+2], linear_rs, color='blue', label = 'Linear Fit $R_s$', linewidth= 3) #Fit Plotten
245
246                     ax1.plot(u3, ifit3, color='darkgreen', label='Curve-Fit nach Shockley') #Fit Kurve nach
247                     Shockley Gleichung plotten
248                     ax1.legend(prop={'size': 9})
249
250                     savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Beleuchtung_Fit_%i.png' %ii, bbox_inches='tight')
251                     ii += 1
252
253
254     #Punkt maximaler Leistung
255     i_max_p3 = p3.index(max(p3)) #Index von Maximaler Leistung suchen
256     print('Punkt maximaler Leistung index = %f , p = %f' % (i_max_p3, p3[i_max_p3]))
257     max_i_3 = i3_mess[i_max_p3] #Strom und Spannung bei max Leistung abspeichern

```

```

251 max_u_3 = u3_mess[i_max_p3]
252 print('Punkt maximaler Leistung strom = %f , spannung = %f' % (max_i_3 , max_u_3))
253
254 #Punkt maximaler Leistung
255 i_max_p4 = p4.index(max(p4))
256 print('Punkt maximaler Leistung index = %f , p = %f' % (i_max_p4, p4[i_max_p4]))
257 max_i_4 = i4_mess[i_max_p4] #Strom und Spannung bei max Leistung abspeichern
258 max_u_4 = u4_mess[i_max_p4]
259 print('Punkt maximaler Leistung strom = %f , spannung = %f' % (max_i_4 , max_u_4))
260
261 #Berechnung F llfaktor
262 ff3 = calcff(max_i_3, max_u_3, ik_3, ul_3)
263 ff4 = calcff(max_i_4, max_u_4, ik_4, ul_4)
264 print('F llfaktor Beleuchtung 400: %f' %ff3)
265 print('IK: %f, UL: %f' % (ik_3, ul_3))
266 print('F llfaktor Beleuchtung 1000: %f' %ff4)
267 print('IK: %f, UL: %f' % (ik_4, ul_4))
268
269 #Plotten der Leistung
270 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
271 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
272
273 main_axes.set_title('Leistungsverlauf', fontsize=12, fontname='serif')
274 main_axes.set_xlabel('$U$ / $V$', fontsize=12, fontname='serif')
275 main_axes.set_ylabel('$P$ / $W$', fontsize=12, fontname='serif')
276 grid()
277
278 plot(u2, p2, color='orange', label='Ohne Beleuchtung')
279 plot(u3, p3, color='green', label='Beleuchtung mit 400 W/m^(-2)')
280 plot(u3, p4, color='red', label='Beleuchtung mit 1000 W/m^(-2)')
281
282 legend(prop={'size': 9})
283
284 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Leistung.png', bbox_inches='tight')
285
286 #Plotten der Str me
287 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
288 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
289
290 main_axes.set_title('I(U) - Diagramm', fontsize=12, fontname='serif')
291 main_axes.set_xlabel('$U$ / $V$', fontsize=12, fontname='serif')
292 main_axes.set_ylabel('$I$ / $A$', fontsize=12, fontname='serif')
293 grid()
294
295 plot(u2, i2, color='orange', label='Ohne Beleuchtung')
296 plot(u3_mess, i3_mess, color='green', label='Beleuchtung mit 400 W/m^(-2)')
297 plot(u4_mess, i4_mess, color='red', label='Beleuchtung mit 1000 W/m^(-2)')
298
299 legend(prop={'size': 9})
300
301 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Stromverlauf_Messdurchf hrung.png', bbox_inches='tight')
302
303 #%%-----Versuch 2 W rmepumpe-----
304 files3 = ['W rmepumpe\\W rmepumpe.csv', 'W rmepumpe\\Druck.txt']
305
306 my_data4 = genfromtxt(path + files3[0], delimiter=';', skip_header=1)
307 t1 = my_data4[:,0] #Zeit des Temperaturmessger ts
308 tem1 = my_data4[:,1] #kalte T1 und warme T2
309 tem2 = my_data4[:,2]
310 m = 4 #Masse Wasser in kg
311 dm = 0.2 #Unsicherheit Masse Wasser in kg
312 cw = 4182 #Spezifische W rmekapazit t Wasser in J pro kgK
313 pp = 120 #Kompressorleistung in W
314 dpp = 5 #Leistungsunsicherheit
315
316 my_data5 = genfromtxt(path + files3[1], delimiter=';', skip_header=1)
317
318 t2 = my_data5[:,0] #Zeiten der Druckmessung

```

```

319 p1 = my_data5[:,1] #Druck P1 und P2
320 p2 = my_data5[:,2]
321 dp = 0.2 #Unsicherheit Druck
322 dt = 20 #Unsicherheit Zeit
323
324 #Plotten der Daten Temperatur
325 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
326 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
327
328 main_axes.set_title('Temperaturverlauf einer W rmepumpe', fontsize=12, fontname='serif')
329 main_axes.set_xlabel('$t$ / s', fontsize=12, fontname='serif')
330 main_axes.set_ylabel('$T$ / C', fontsize=12, fontname='serif')
331 grid()
332
333 plot(t1, tem1, color='blue', label='kalte Temperatur T1')
334 plot(t1, tem2, color='red', label='warme Temperatur T2')
335
336 legend()
337
338 savefig(path + 'Auswertung\\' +'Temperaturverlauf.png', bbox_inches='tight')
339
340 #Plotten der Daten Druck
341 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
342 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
343
344 main_axes.set_title('Druckverlauf einer W rmepumpe', fontsize=12, fontname='serif')
345 main_axes.set_xlabel('$t$ / s', fontsize=12, fontname='serif')
346 main_axes.set_ylabel('$p$ / bar', fontsize=12, fontname='serif')
347 grid()
348
349 scatter(t2, p1, color='blue', s = 10, label='Niederdruckbereich')
350 scatter(t2, p2, color='red', s = 10, label='Hochdruckbereich')
351 errorbar(t2, p1, yerr= dp, xerr = dt, linestyle='None', capthick=1, capsiz=3, color='blue')
352 errorbar(t2, p2, yerr= dp,xerr = dt, linestyle='None', capthick=1, capsiz=3, color='red')
353
354 legend()
355
356 savefig(path + 'Auswertung\\' +'Druckverlauf.png', bbox_inches='tight')
357
358 #Unsicherheitsanalyse
359 #Unsicherheit von dT2
360 def calcdt(Tdiff, tdiff):
361     return Tdiff/tdiff**2 * 0.1 + 1/tdiff * 0.4
362
363 #Unsicherheit von Q
364 def calcdq(Tdiff, ddT):
365     return cw*Tdiff*dm + cw*m*ddT
366
367 #Unsicherheit der Leistungszahl
368 def calcdeq(dq, q):
369     return 1/pp * dq + q/pp**2 * dpp
370
371 def calcec (T1, T2):
372     return T2/(T2-T1)
373
374 def calcdec(T1, T2):
375     return 1/(T2 - T1)*0.2 + T2/(T2- T1)**2 * 0.4
376
377 #Temperaturlisten in Kelvin
378 tem1K = []
379 tem2K = []
380 for i in range(len(tem1)):
381     tem1K.append(tem1[i] + 273.15)
382     tem2K.append(tem2[i] + 273.15)
383
384 dT = [] #dT2
385 temdiff = [] #Temperaturdiff zw. T1 und T2
386 ddT = [] #Unsicherheit dT2

```

```

387 ec = [] #Leistungszahl des Linksl ufigen Carnot-Prozess
388 dec = [] #Unsicherheit zu ec
389
390 for i in range(0,len(t1)-150, 150):
391     dT.append((tem2[i+150]-tem2[i])/150)
392     temdiff.append(tem2K[i] - tem1K[i])
393     ddT.append(calcdt((tem2[i+150]-tem2[i]), 150))
394     ec.append(calcec(tem1K[i], tem2K[i]))
395     dec.append(calcddec(tem1K[i], tem2K[i]))
396
397 dq = []
398 for i in range(len(ddT)):
399     dq.append(calcdq(dT[i], ddT[i]))
400 q = []
401 for i in range(len(dT)):
402     q.append(cw*m*dT[i])
403
404 dew = []
405 for i in range(len(q)):
406     dew.append(calcdew(dq[i], q[i]))
407
408 ew = []
409 for qq in q:
410     ew.append(qq/pp)
411
412 print(ew, dew)
413
414 #Plotten der Daten Leistungszahl
415 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
416 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
417
418 main_axes.set_title('Leistungszahl in Abh ngigkeit der Temperaturdifferenz', fontsize=12,
        fontname='serif')
419 main_axes.set_xlabel('$T_2 - T_1$ / K', fontsize=12, fontname='serif')
420 main_axes.set_ylabel('$\eta_w$ / 1', fontsize=12, fontname='serif')
421 grid()
422
423 scatter(temdiff, ew, color='orange', s = 10)
424 errorbar(temdiff, ew, yerr= dew, xerr = 0.4, linestyle='None', capthick=1, capsized=3, color=
        'orange')
425
426 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Leistungszahl.png', bbox_inches='tight')
427
428 nw, dnw = [], []
429 for i in range(len(ew)):
430     nw.append(ew[i]/ec[i])
431     dnw.append(1/ec[i] * dew[i] + ew[i]/ec[i]**2 * dec[i])
432
433 print(max(nw), dnw[nw.index(max(nw))])
434 #Plotten der Daten Wirkungsgrad
435 fig = figure(figsize=(6,3), dpi=250)
436 main_axes = fig.add_axes([0.1,0.1,0.8,0.8])
437
438 main_axes.set_title('Wirkungsgrad in Abh ngigkeit der Temperaturdifferenz', fontsize=12,
        fontname='serif')
439 main_axes.set_xlabel('$T_2 - T_1$ / K', fontsize=12, fontname='serif')
440 main_axes.set_ylabel('$\eta_w$ / 1', fontsize=12, fontname='serif')
441 grid()
442
443 scatter(temdiff, nw, color='orange', s = 10)
444 errorbar(temdiff, nw, yerr= dnw, xerr = 0.4, linestyle='None', capthick=1, capsized=3, color=
        'orange')
445
446 savefig(path + 'Auswertung\\' + 'Wirkungsgrad.png', bbox_inches='tight')

```