

22S PHY.L02UB Fortgeschrittenenpraktikum 2 LU

Protokollabgabe

Geöffnet: Dienstag, 15. März 2022, 00:00

Fällig: Samstag, 2. Juli 2022, 23:59

Abgabestatus

Abgabestatus	Kein Versuch
Bewertungsstatus	Bewertet
Verbleibende Zeit	Abgabeende überschritten seit: 33 Tage 11 Stunden
Zuletzt geändert	-
Abgabekommentare	▶ Kommentare (0)

Feedback

Bewertung	10,00 / 10,00
Bewertet am	Freitag, 29. Juli 2022, 14:18
Bewertet von	 Banzer Peter
Feedback als Kommentar	Sieht gut aus, danke.

[◀ Versuch Wärmepumpe](#)

Direkt zu:

[Versuch Advanced Microscopy Lab ▶](#)

Wirkungsgrad

Gruppe 20

Betreuer: Peter Banzer

Hanna Steindorfer (11719267) &
Sebastian Gössl (11904703)

25.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen und Grundlagen	4
2.1 Wärmepumpen	4
2.1.1 Leistungszahl und Gütegrad	4
2.2 Solarzellen	4
2.2.1 Betriebsarten und Kennlinienfeld	4
2.2.2 Leistung	5
2.2.3 Diodenparameter	5
3 Geräteliste	6
3.1 Wärmepumpe	6
3.2 Solarzelle	7
4 Versuchsanordnung	8
4.1 Wärmepumpe	8
4.2 Solarzelle	9
4.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung	9
4.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen	10
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	12
5.1 Wärmepumpe	12
5.2 Solarzelle	13
5.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung	13
5.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen	14
6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse	15
6.1 Wärmepumpe	15
6.1.1 Bestimmung von Leistungszahl und Gütegrad	15
6.1.2 pH - Diagramme von R134a	16
6.2 Solarzelle	20
6.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung	20
6.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen	21
7 Diskussion	24
7.1 Wärmepumpe	24
7.1.1 Temperaturverlauf	24
7.1.2 Berechnung von Leistungszahl und Gütegrad	24
7.1.3 p-H-Diagramme von R134a	24
7.2 Solarzelle	25
7.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung	25
7.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen	25
8 Zusammenfassung	26
8.1 Ergebnisse Wärmepumpe	26
8.2 Ergebnisse Solarzelle	26
9 Anhang	29

1 Aufgabenstellung

In der Laboreinheit werden zwei Versuche zu unterschiedlichen Themen durchgeführt: Im ersten Experiment soll eine Wärmepumpe untersucht werden, im zweiten Versuch die Kennlinie und -daten von Solarzellen aufgenommen werden.

Mit der **Wärmepumpe** wird Wärme mithilfe eines Kühlmittels von einem Wasserbehälter in einen anderen gepumpt, anhand der aufgenommenen Temperaturmessung soll der Kreisprozess untersucht werden.

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

Im Versuch zur **Solarzelle** sollen Kennlinie sowie Kenndaten eines Solarmoduls bei Serien- und Parallelschaltung erstellt werden. Im Betrieb in Serienschaltung soll das Solarmodul des Weiteren teilweise abgedeckt werden und die Auswirkungen dessen untersucht werden.

Folgendes ist für die Parallel- und Serienschaltung zu bestimmen bzw. zu erstellen:

- $I(U)$ - Diagramm
- $P(U)$ - Diagramm
- Leerlaufspannung U_L
- Kurzschlussstrom I_K
- Füllfaktor
- Am Betriebspunkt Maximaler Leistung:
 - Spannung U_{MPP}
 - Strom I_{MPP}
 - Leistung P_{MPP}

2 Voraussetzungen und Grundlagen

2.1 Wärmepumpen

Bei Wärmepumpen muss Arbeit aufgewendet werden, um Wärme entgegen der vom 2. Hauptsatz der Thermodynamik vorgegebenen Richtung von einem kälteren Wärmereservoir in ein wärmeres abzugeben - dementsprechend sind Wärmepumpen Wärmekraftmaschinen mit umgekehrter Arbeitsrichtung. Die Übertragung erfolgt in einem Kühlkreislauf, in welchem ein Kühlmittel die Wärme aufnimmt und wieder abgibt. Die Leistungsfähigkeit einer Wärmepumpe hängt im allgemeinen von der Temperaturdifferenz der Wärmebäder ab, und davon, ob das Kühlmittel Phasenübergänge durchläuft. Durch die latenten Wärmen, welche bei Phasenübergängen aufgenommen oder abgegeben werden können Wärmemengen übertragen werden, die keine Erhöhung des Temperaturunterschieds benötigen und dadurch die Leistung der Wärmepumpe zusätzlich steigern.

2.1.1 Leistungszahl und Gütegrad

Die Leistungszahl ϵ (häufiger COP, Coefficient of Performance) von Wärmepumpen definiert sich aus dem Verhältnis der bei der hohen Temperatur T_H abgegebenen Wärme zur aufgewandten Arbeit. Alternativ kann die Leistungszahl auch aus dem Verhältnis der Wärmemenge \dot{Q} die pro Zeiteinheit dt dem wärmeren Reservoir zugeführt wird zur Leistung der Pumpe bestimmt werden. Dabei ist c die spezifische Wärmekapazität von Wasser und m die Masse des Wassers im warmen Wärmebad.[3]

$$\epsilon = \frac{Q_H}{W} = \frac{\dot{Q}}{P} \quad (1)$$

$$\dot{Q} = cm \frac{dT_H}{dt} \quad (2)$$

$$c = 4.19 \cdot 10^{-3} \frac{Ws}{Kkg} \quad (3)$$

Der Gütegrad η ist das Verhältnis von der Leistungszahl der Pumpe ϵ zur theoretisch erreichbaren, maximalen Leistungszahl ϵ_{max} .

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{max}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{max} = \frac{T_H}{T_H - T_K} = \frac{1}{\eta_C} \quad (5)$$

2.2 Solarzellen

Solarzellen sind großflächig verbaute Photodiode, bei denen die n-dotierte Schicht wesentlich dünner als die p-dotierte Substratschicht ist. Das Verhältnis der Schichtdicken liegt bei einer klassischen (im Versuch verwendeten) Silizium - Zelle bei circa $\frac{1}{600}$. Bei Bestrahlung entstehen Elektron - Loch Paare, welche in der Raumladungszone entgegen der Diffusionsspannung in die gleichartig dotierten Zonen driften und zu einem Strom führen. Die Photonenenergie muss größer als die Bandlücke des verendeten Halbleiters sein, beim im Versuch verwendeten Silizium wird daher eine Energie von mehr als 1,1 eV benötigt.

2.2.1 Betriebsarten und Kennlinienfeld

In Durchlassrichtung ($U > 0$, siehe Abbildung 1) geschalteten dienen Photodiode der Stromerzeugung, werden also als Solarzellen verwendet. In Sperrrichtung ($U < 0$) wird die Eigenschaft von Photodiode ausgenutzt, dass bei Bestrahlung mit Licht auch ein Photostrom in Sperrrichtung fließt, dessen Stärke proportional zur Intensität des Lichts ist. Bei einer in Sperrrichtung geschalteten Diode fließt auch bei Abdunkelung ein kleiner Strom, der als Dunkelstrom bezeichnet wird. Bei Bestrahlung verschiebt sich die gesamte Kennlinie nach unten, weswegen grundsätzlich zwischen Hell- und Dunkelkennlinien unterschieden wird.

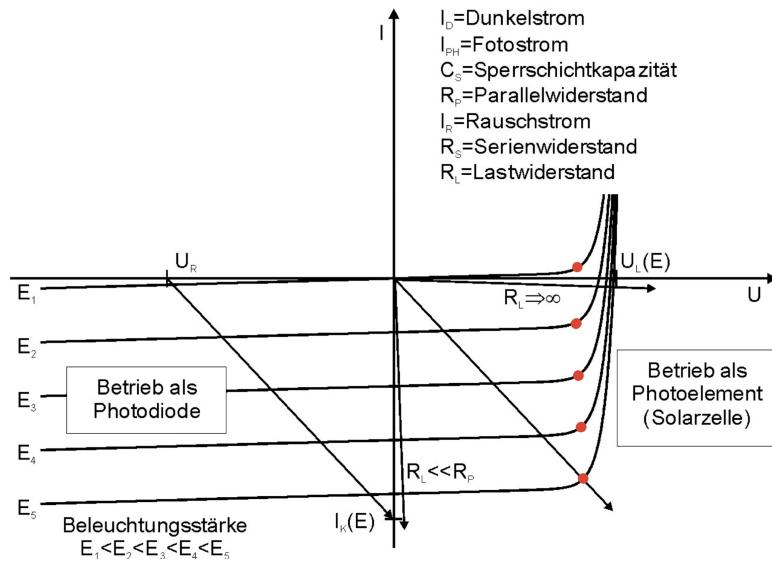


Abbildung 1: Kennlinienfeld einer Photodiode. In Rot: MPP (Maximum Power Point) [8]

2.2.2 Leistung

Die elektrische Leistung P ist im MPP (Maximum Power Point) bzw. Arbeitspunkt maximal. Bei Solarzellen verschiebt sich dieser mit Bestrahlungsstärke und Temperatur, weswegen bei Solarmodulen der Lastwiderstand laufend angepasst werden muss, sodass immer die größtmögliche Leistung entnommen werden kann.

$$P = U \cdot I \quad (6)$$

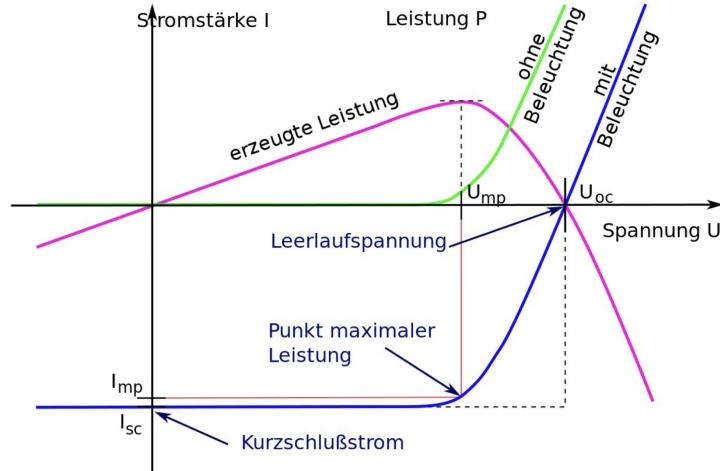


Abbildung 2: Kennlinienfeld einer Photodiode. In Rot: MPP (Maximum Power Point) [8]

2.2.3 Diodenparameter

Aus der Kennlinie lassen sich die Diodenparameter bestimmen bzw. berechnen:

- Maximale Leistung P_{MPP}
- Maximaler Strom I_{MPP}
- Maximale Spannung U_{MPP}
- Leerlaufspannung U_L

- Kurzschlussstrom I_K
- Füllfaktor $FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_K \cdot U_L}$
- Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Licht}}$
mit Lichtleistung P_{Licht} die mit Intensität I_{Licht} auf Solarzelle der Fläche A trifft: $P_{Licht} = I_{Licht} \cdot A$

Die Leerlaufspannung ist jene Spannung, die zwischen den Ausgängen einer Spannungsquelle (in dem Fall das Solarmodul) gemessen wird wenn keine Last anliegt, und folglich kein Strom fließt. Der ohne Last am Solarmodul gemessene Strom wird als Kurzschlussstrom bezeichnet, wobei keine Spannung zwischen den beiden Ausgängen abfällt.

Der Füllfaktor ist ein Maß für die Güte einer Solarzelle, da dieser das Verhalten der Zelle mit ihrem Idealverhalten vergleicht. Eine ideale Solarzelle ist eine Konstantstromquelle und die dazugehörige Kennlinie spannt ein Rechteck zwischen maximalen Strom und Spannung auf. Der reale Vergleichswert ist die Fläche des Rechtecks zwischen Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom. Folglich ist der Wirkungsgrad einer Zelle umso höher, desto mehr sich der Füllfaktor 1 annähert, bei kristallinen Solarzellen die im Versuch verwendet werden kann ein Füllfaktor zwischen 0.75 und 0.85 erreicht werden.[11]

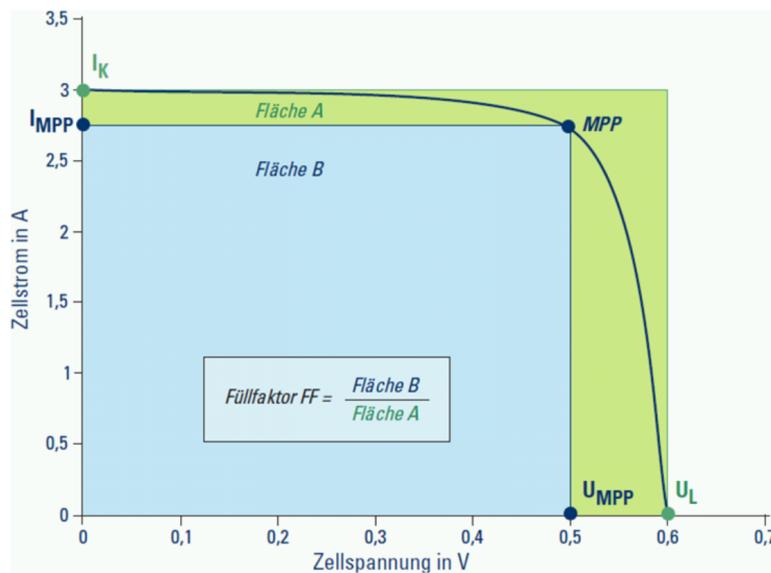


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Berechnung des Füllfaktors[11]

3 Geräteliste

3.1 Wärmepumpe

Tabelle 1: Liste der im Versuch zur Wärmepumpe verwendeten Geräte

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Inventarnummer
Wärmepumpe pT	LD Didactic GmbH	389 521	W10W000426	310070540000
Temperaturfühler NiCr-Ni	LD Didactic GmbH	666 193	-	310070540000
Digitales Temperaturmessgerät	LD Didactic GmbH	666 209	TCP 0000252	310070540000
Manometer (blau)	ITE	825-BC-1.0/447	-	310070540000
Manometer (rot)	ITE	823-BC-1.0/447	-	310070540000
Druckschalter	Danfoss	KP7W	-	310070540000
Kompressor	Danfoss	TL3G	AA6HA100	310070540000
Filtertrockner	Danfoss	DML 0825	023Z4566	310070540000

Vom Temperaturfühler NiCr-Ni werden zwei Stück verwendet. Das Auslesen und die Darstellung der digitalisierten Messdaten wurde beim Versuch zu Compton-Effekt mit der Software *Cassy Lab 2* von Leybold vorgenommen. Die Auswertung der Messdaten wurden automatisiert mittels eines Python-Programms durchgeführt,

dieses ist im Anhang zu finden.

Die Messung der Temperatur mit den Temperatutfühlern ist für den Temperaturbereich des Experiments mit einer Unsicherheit von $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ [6] verbunden, für das digitale Temperaturmessgerät mit $\pm 0.2\%$ [7]. Da die Unsicherheit des digitalen Temperaturmessgeräts maximal $\pm 0.09^{\circ}\text{C}$ beträgt, die Temperatur jedoch nur auf eine Nachkommastelle genau abgelesen werden kann, wird diese Unsicherheit vernachlässigt und für die Auswertung nur jene der Temperatutfühler herangezogen.

Die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors beträgt 127W W [5].

Die im Aufbau der Wärmepumpe verbauten analogen Manometer haben eine Ableseunsicherheit von $\pm 0.1\text{bar}$, die abzulesende Skala ist jene des im Kühlkreislauf zirkulierenden Kühlmittels R134a.

3.2 Solarzelle

Tabelle 2: Liste der im Versuch zur Solarzelle verwendeten Geräte

Gerät	Hersteller	Typ	Seriennummer	Inventarnummer
Multimeter 1	Fluke	175	-	FP - 05
Multimeter 2	Fluke	175	-	FP - 06
Lampe	-	-	-	-
Photovoltaik-Elemente	-	-	-	-
Potentiometer	Arcol	VRH 320	1010 - 1	-
Maßband	Stanley	Tylon	-	-
Messschieber	L & U	667-3929	-	-
Leistungsmessgerät	Spectra-Physics	407A	-	310041630000
Sonnensimulator	Danfoss	DML 0825	023Z4566	310070540000
Quellenmessgerät	Keithley	2450	-	-

Das Auslesen und die Darstellung der Messdaten wurde mit der Software *Kickstart* vorgenommen.

Die Unsicherheit des Messschiebers ist nicht angegeben, und wurde daher mit $\pm 0.02\text{mm}$ angenommen. Die Multimeter haben für die verwendeten Messbereiche Unsicherheiten von $\pm 0.15\% + 2$ beim der Spannung, und $\pm 1.5\% + 3$ beim Strom [2]. Das analoge Leistungsmessgerät wurde für beide Lichtleistungen im x0.1 - Bereich verwendet, auf welchen eine Ableseunsicherheit von $\pm 0.01\text{mW}$ entfällt. Die vom Sourcemeter erzeugte Spannung hat eine Unsicherheit von $\pm 0,020\% + 300\mu\text{V}$, die des gemessenen Stroms beträgt $\pm 0,025\% + 6\mu\text{A}$ [12].

4 Versuchsanordnung

4.1 Wärmepumpe

Der in der Wärmepumpe durchlaufende Kreisprozess setzt sich idealisiert aus vier Prozessschritten und den damit verbundenen Zustandsänderungen zusammen:

- **1 → 2 Adiabatische Kompression:**

Das Kühlmittel wird vom Kompressor (1) komprimiert, dabei steigt $T_1 \rightarrow T_K$ und $p_1 \rightarrow p_2$

- **2 → 3 Isobare Abkühlung:**

Das Kühlmittel gibt im Wärmetauscher/Verflüssiger (3) Wärme an das wärmere Wärmebad ab und kondensiert dabei. Im Reiniger(4) werden Gasbläschen in der Flüssigkeit entfernt.

- **3 → 4 Isenthalpe Expansion:**

Im Expansionsventil wird das Kühlmittel expandiert, wobei es von $T_2 \rightarrow T_{EV} < T_1$ abkühlt.

- **4 → 1 Isobare Erwärmung:**

Das Kältemittel erwärmt sich über den Wärmetauscher (7) im kälteren Wärmebad von $T_{EV} \rightarrow T_1$, dabei verdampft es wieder. Danach wird das Kühlmittel wieder dem Kompressor zugeführt.

Zu Beginn werden beide Wassereimer mit je $4 \pm 0.1 \text{ l}$ Wasser gefüllt, und auf den Stellflächen platziert, wo sie als Wärmebäder für die beiden Wärmetauscher fungieren. In den beiden Eimern befinden sich auch die Temperaturfühler, wobei zu beachten ist, dass sie Messspitze nicht im direkten Kontakt mit den Windungen des Wärmetauschers steht. Die Temperaturfühler sind am digitalen Temperaturmessgerät angeschlossen, wo die Messsignale digitalisiert werden um sie im Anschluss mithilfe von *Cassy Lab 2* auszulesen und darzustellen.

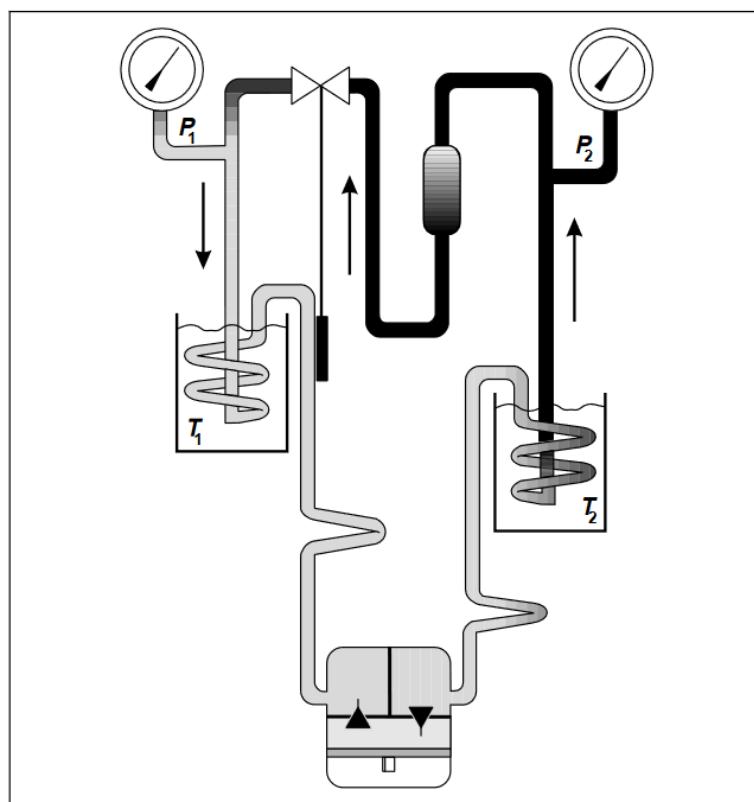


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Wärmepumpe [5]

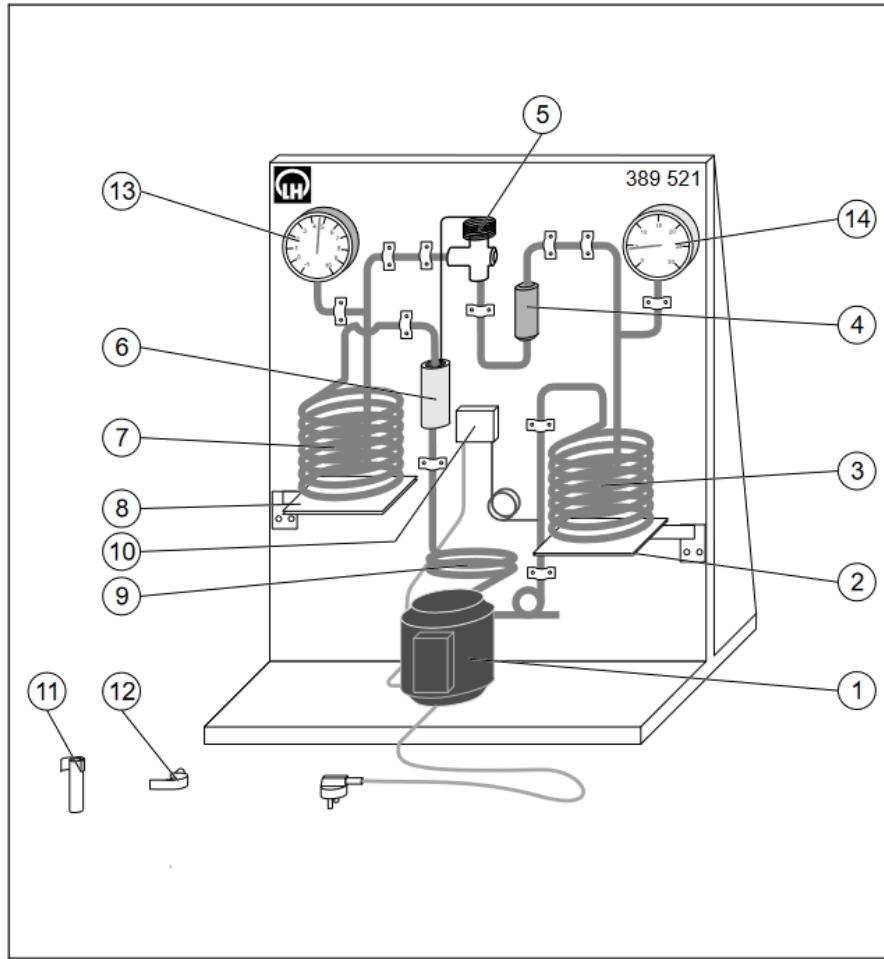


Abbildung 5: Aufbau der Wärmepumpe: 1: Kompressor 2: Ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter 3: Verflüssiger 4: Sammler/Reiniger 5: Expansionsventil 6: Temperaturfühler des Expansionsventils 7: Verdampfer 8: Ausschwenkbare Stellfläche Kaltwasserbehälter; 9: Rohrwindungen als elastische Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher 10: Druckwächter 11: Kunststoffhalter (2x) für Thermometer und Temperaturfühler zum Anklemmen an Kupferrohre 12: Kupfer-Messschuh (2x) zum Einsticken von Temperaturfühlern 13: Manometer für die Niederdruckseite 14: Manometer für die Hochdruckseite [9]

4.2 Solarzelle

4.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung

Die zur Beleuchtung der Solarzellen dienende Lampe wird 30 cm entfernt von dem aus zwei Photovoltaik-Elementen bestehenden Solarzellenmodul platziert. Die beiden PV-Elemente können miteinander verbunden, aber auch einzeln verwendet werden. Diese werden je nach Versuch parallel oder in Serie geschalten. Zudem werden für alle Teilschritte des Versuchs je ein Multimeter für die Strom- und Spannungsmessung in die Schaltung eingebaut.

Für die Messung des Kurzschlussstroms und der Leerlaufspannung wird die Schaltung ohne Verbraucher betrieben, zur Ausmessung der Hellkennlinie wird ein Potentiometer zum Variieren der Last und folglich auch von Spannung und Strom verwendet.

Beim teilweisen Abdunkeln der Solarzellen verändert sich die Schaltung der vorherigen Teilversuche nicht.

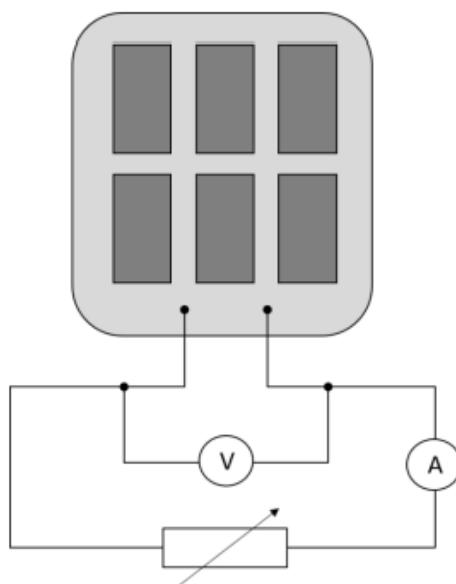


Abbildung 6: Schaltkizze zum Aufbau [10]

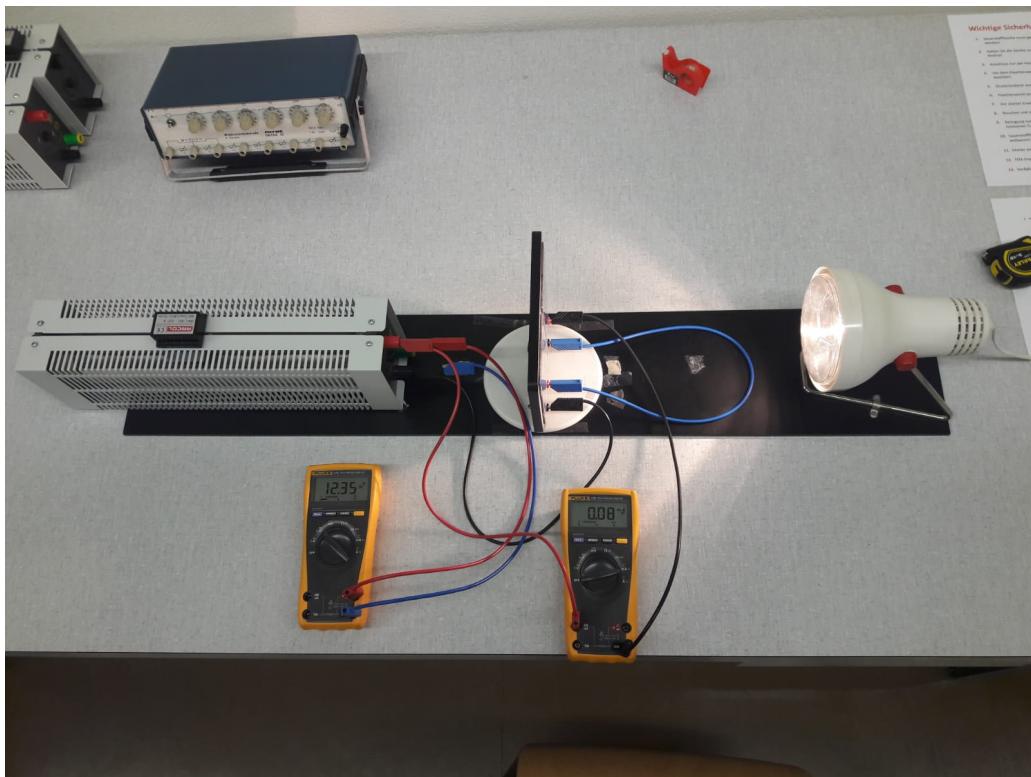


Abbildung 7: Aufbau für die Messung der Kennlinie bei Serienschaltung [10]

4.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen

Die im Versuch ausgemessene Solarzelle wird auf einem zur Kühlung dienenden Kupferblock unter den Sonnen-simulator platziert. Die abgegebene Lichtleistung dieses kann über eine Stellschraube variiert werden, zudem kann mittels eines Schiebers die Lampe komplett verdeckt werden. Zur Einstellung einer bestimmten Licht-leistung muss ein Leistungsmessgerät herangezogen werden, welches mit einem Thermoelement das anstatt der

Solarzelle unter den Sonnensimulator gegeben wird verwunden ist. Um eine sinnvolle Messung zu gewährleisten, muss das Leistungsmessgerät kalibriert werden. Über die Halterung des Sonnensimulators ist die Solarzelle mit dem Sourcemeter verbunden, welches zur Erstellung von $I(U)$ -Kennlinien für einen vorgegebenen Bereich die Spannung vorgibt und die entsprechenden Ströme misst. Das Sourcemeter ist über eine USB-Schnittstelle mit dem Computer verbunden, wodurch eine computergesteuerte Messung mithilfe der *Kickstart* - Software möglich ist.



Abbildung 8: Aufbau für Versuch mit Sonnensimulator, von links nach rechts: Leistungsmessgerät, Sourcemeter, (davor) Thermoelement, Sonnensimulator mit Solarzelle in Halterung [10]

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Wärmepumpe

Die Messung der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit wird in *Cassy Lab 2* gestartet, zeitgleich wird der Kompressor eingeschaltet. Von diesem Zeitpunkt an wird das Wasser in den beiden Eimern über den Verlauf der gesamten Messung umgerührt, um im Wärmebad eine über die Ausdehnung dieses konstante Temperatur zu gewährleisten. Kurz nach Beginn, am Ende und zu zwei anderen Zeitpunkten der Temperaturmessung werden die beiden Drücke p_{tief} und p_{hoch} gemeinsam mit der Temperatur T_{tief} notiert, die Ergebnisse dieser Messung sind in Tabelle 3 zu finden. Da hierbei von mehreren Messgeräten gleichzeitig abgelesen werden muss, wurde die Unsicherheit der Zeit mit $\pm 5\text{s}$ entsprechend groß gewählt. Die Temperaturnessung endet wenn sich um den Wärmetauscher des kälteren Wärmebades Eis um bildet.

Tabelle 3: Druck- und Temperaturnessung zu unterschiedlichen Zeitpunkten:

$t \pm \Delta t$... Zeitpunkt der Messungen mit Unsicherheit

$T_{tief} \pm \Delta T_{tief}$... Temperatur im kälteren Wärmebad mit Unsicherheit

$p_{tief} \pm \Delta p_{tief}$... Druck nach dem kälteren Wärmebad, mit Unsicherheit

$p_{hoch} \pm \Delta p_{hoch}$... Druck nach dem wärmeren Wärmebad, mit Unsicherheit

$t \pm \Delta t \text{ s}$	$T_{tief} \pm \Delta T_{tief} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$p_{tief} \pm \Delta p_{tief} \text{ bar}$	$p_{hoch} \pm \Delta p_{hoch} \text{ bar}$
267 \pm 5	18.5 \pm 1.5	3.0 \pm 0.1	6.2 \pm 0.1
786 \pm 5	12.7 \pm 1.5	2.5 \pm 0.1	8.2 \pm 0.1
1232 \pm 5	7.8 \pm 1.5	2.1 \pm 0.1	10.1 \pm 0.1
1798 \pm 5	5.6 \pm 1.5	2.2 \pm 0.1	11.0 \pm 0.1

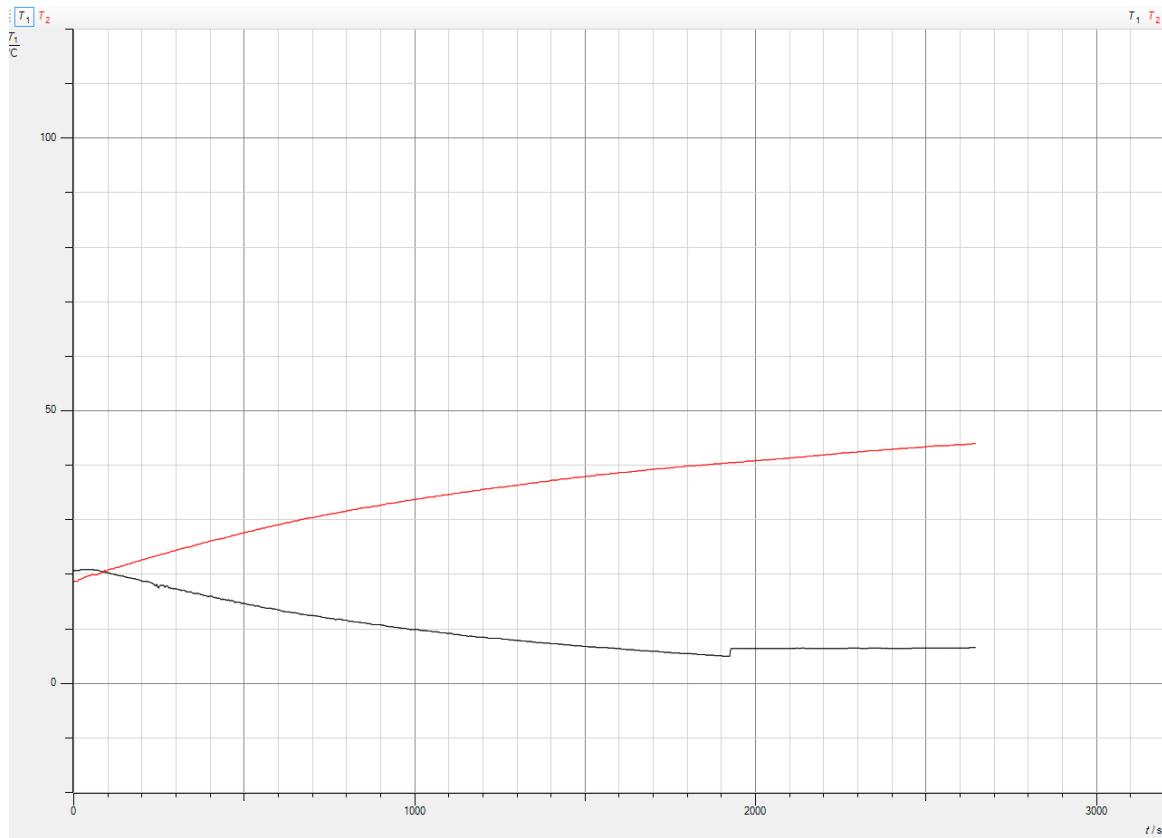


Abbildung 9: Screenshot des Temperaturverlaufs in Cassy Lab 2

5.2 Solarzelle

5.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung

Für die erste Aufbau werden die beiden Solarzellen des Moduls in Serie geschaltet, zur Bestimmung der Leerlaufspannung U_L und des Kurzschlussstroms I_K jedoch noch kein Verbraucher in die Schaltung eingebaut. Für eine Serienschaltung ergeben sich für I_K und U_L

$$U_{L,Serie} = (13,08 \pm 0,04) \text{ V} \quad (7)$$

$$I_{K,Serie} = (2,60 \pm 0,07) \text{ mA} \quad (8)$$

Im Anschluss wird das Potentiometer in dem Stromkreis eingebaut, und durch variieren des Widerstands werden Spannung und Strom so verändert, dass die Messpunkte möglichst gleichmäßig gesetzt sind. Im Knick-Bereich der Kennlinie werden die Messdaten in kleineren Spannungsschritten aufgezeichnet, um diesen ausreichend gut beschreiben zu können. Für die Serienschaltungen sind die Messdaten in [Tabelle 4](#) zu finden.

Tabelle 4: Messwerte Solarmodul in Serienschaltung

U_{Serie} ... Spannungsabfall über Solarmodul, ΔU_{Serie} ... Unsicherheit Spannung, Multimeter 1, I_{Serie} ... Strom durch Solarmodul, ΔI_{Serie} ... Unsicherheit Strom, Multimeter 2

$U_{Serie}/[V]$	$\pm \Delta U_{Serie} / [V]$	$I_{Serie}/[mA]$	$\pm \Delta I_{Serie} / [mA]$
12,26	0,04	0,05	0,03
11,89	0,04	0,11	0,03
0,013	0,02	2,57	0,07
11,4	0,04	0,22	0,03
11,63	0,04	0,18	0,03
6,12	0,03	2,44	0,07
10,67	0,04	0,96	0,04
10,99	0,04	0,39	0,04
6,7	0,03	2,45	0,07
8,16	0,03	2,49	0,07
7,35	0,03	2,49	0,07
6,73	0,03	2,49	0,07
6,06	0,03	2,48	0,07
5,26	0,03	2,47	0,07
4,65	0,03	2,48	0,07
3,74	0,03	2,52	0,07
2,35	0,02	2,54	0,07
1,8	0,02	2,57	0,07
10,64	0,04	0,39	0,04
10,03	0,04	1,11	0,05
9,64	0,03	2,06	0,06
9,44	0,03	2,35	0,07
8,87	0,03	2,45	0,07
9,9	0,03	1,47	0,05

Für die zweite Messreihe werden die Solarelemente des Moduls parallel geschaltet, und wie im ersten Aufbau Spannung und Strom bei verändertem Widerstand gemessen. Die Ergebnisse dieser Messreihe befinden sich in [Tabelle 5](#). Zur Messung von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom wird das Potentiometer erneut aus der Schaltung ausgebaut.

$$U_{L,Parallel} = (5,21 \pm 0,01) \text{ V} \quad (9)$$

$$I_{K,Parallel} = (1,89 \pm 0,06) \text{ mA} \quad (10)$$

Tabelle 5: Messwerte Solarmodul in Serienschaltung

U_{Parallel} ... Spannungsabfall über Solarmodul, $\Delta U_{\text{Parallel}}$... Unsicherheit Spannung, Multimeter 1, I_{Parallel} ... Strom durch Solarmodul, $\Delta I_{\text{Parallel}}$... Unsicherheit Strom, Multimeter 2

$U_{\text{Parallel}}/[V]$	$\pm \Delta U_{\text{Parallel}}/[V]$	$I_{\text{Parallel}}/[mA]$	$\pm \Delta I_{\text{Parallel}}/[mA]$
5,232	0,03	0,05	0,03
5,095	0,03	0,15	0,03
0,008	0,02	1,86	0,06
4,91	0,03	0,2	0,03
5,015	0,03	0,17	0,03
5,153	0,03	0,16	0,03
5,066	0,03	0,18	0,03
5,181	0,03	0,15	0,03
5,184	0,03	0,08	0,03
1,9	0,02	1,75	0,06
2,77	0,02	1,69	0,06
3,17	0,02	1,66	0,05
3,71	0,03	1,61	0,05
0,93	0,02	1,8	0,06
0,54	0,02	1,85	0,06
1,51	0,02	1,8	0,06
3,05	0,02	1,51	0,05
4,25	0,03	1,03	0,05
4,43	0,03	0,67	0,04
2,51	0,02	1,7	0,06
4,13	0,03	1,3	0,05
4,04	0,03	1,45	0,05
4,61	0,03	0,36 b	0,04

Beim teilweisen Abdunkeln des Solarmoduls wurde festgestellt, dass bei keinem der beiden Solarelemente eine Veränderung des Stroms noch der Spannung festgestellt werden konnte. Beide Größen bewegten sich um den Nullpunkt, auch nach Auskühlen des Moduls änderte sich nichts an dem beschriebenen Verhalten. Auch der Aufbau der Schaltung (parallel oder in Serie) hatte keinen Einfluss auf die gemessenen Spannungs- und Stromwerte. Da mit der Veränderung des Widerstands keine Veränderung der Messgrößen einherging, wurde auf eine Messreihe verzichtet.

5.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen

Vor der Messung der Kennlinien muss die abgegebene Strahlungsleistung mithilfe des Leistungsmessgerätes und der Stellschraube am Sonnensimulator eingestellt werden. Da bei Leistungen von $400W/m^2$ und $1000W/m^2$ gemessen werden soll, müssen zuerst jene Leistungen P_{400} und P_{1000} bestimmt werden, die bei diesen Intensitäten auf die Fläche des Thermoelements ausfallen. Dazu wird der Durchmesser d des kreisförmigen Thermoelements mit dem Messschieber vermessen, und daraus die Fläche ermittelt.

$$d = (1,690 \pm 0,002) \text{ cm}$$

$$A = (2,243 \pm 0,005) \text{ cm}^2$$

$$P_{400} = (89,72 \pm 0,02) \text{ mW} \quad (11)$$

$$P_{1000} = (224,3 \pm 0,5) \text{ mW} \quad (12)$$

Die Intensität des Lichts im Sonnensimulators wird solange eingestellt, bis die am Leistungsmessgerät angezeigte Leistung der berechneten P_{400} entspricht. Nun wird für die Messung der Kennlinien das Thermoelement in der Halterung des Simulators mit der Solarzelle ersetzt. In *Kickstart* wird ein Messbereich von $-1V$ bis $+1V$ definiert, und der dabei fließende Strom gemessen.

6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

Alle Auswertungen wurden mithilfe von Python-Programmen durchgeführt, diese sind im Anhang zu finden.

6.1 Wärmepumpe

Die dem Plot in Abbildung 9 zugrunde liegende Messreihe sollte für die Bestimmung der Leistungszahl und des Gütegrades herangezogen werden - da jedoch darauf vergessen wurde, die Messreihe abzuspeichern, ist nur der Screenshot als "Messergebnis" vorhanden.

Da genaue Messergebnisse zu erzielen nicht die vorderste Priorität in Laborversuchen wie diesem ist, wurde aus dem Graphen in Abbildung 9 Messpunkte entnommen und daraus mit einem Fit die Messreihe (den Umständen entsprechend, relativ ungenau) rekonstruiert, um für den weiteren Versuch eine Auswertungsgrundlage zu haben.

Die Fitparameter des mittels Least-Square Verfahrens erstellten Fits eines Polynom 2. Grades mit $ax^2 + bx + c$ sind für den Temperaturverlauf im wärmeren Wärmebad:

$$\begin{aligned} a_{hoch} &= (3.15 \pm 0.12) \cdot 10^{-6} \\ b_{hoch} &= -0.01463 \pm 0.00034 \\ c_{hoch} &= 21.33 \pm 0.20 \end{aligned}$$

Im kälteren Wärmebad wurde ab $t = 1920\text{s}$ wie in Abbildung 9 zu erkennen ist und auch notiert wurde konstant die Temperatur $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Daher wurden in der gefitteten Messreihe nachträglich die Werte für den diesen Zeitbereich auf die konstante Temperatur gesetzt. Die Fitparameter für den tieferen Temperaturverlauf sind:

$$\begin{aligned} a_{niedrig} &= (-3.18 \pm 0.16) \cdot 10^{-6} \\ b_{niedrig} &= 0.0175 \pm 0.0005 \\ c_{niedrig} &= 19.28 \pm 0.27 \end{aligned}$$

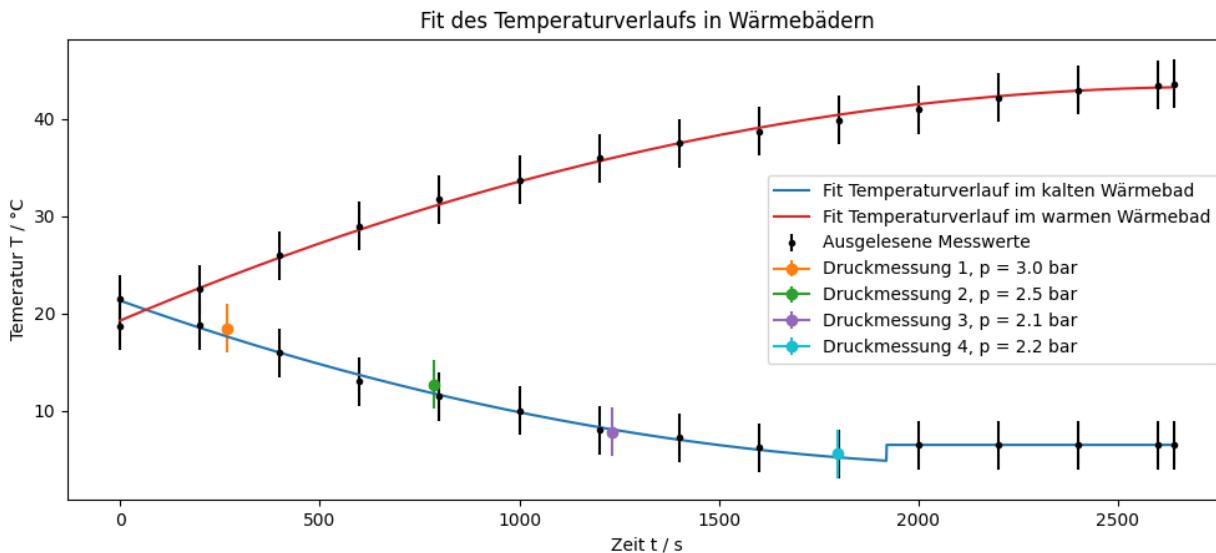


Abbildung 10: Fit des Temperaturverlaufs in Abbildung 9: Die Unsicherheit der ausgelesenen Messwerte sowie jene der Druckmessung in t sind sehr groß, aufgrund der Skalierung der Zeitachse sind die zugehörigen Errorbars jedoch nicht sichtbar.

6.1.1 Bestimmung von Leistungszahl und Gütegrad

Zur Bestimmung der Leistungszahl mit Gleichung 4 muss die Wärmemenge \dot{Q} die pro Zeiteinheit dt dem wärmeren Wärmebad zugeführt wird anhand Gleichung 2 berechnet werden. Dabei wird als Masse m des

Wassers im roten Eimer 4 ± 0.01 l gewählt, für die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c = 4.19 \cdot 10^3 \frac{W \cdot s}{kg \cdot K}$. Da der analysierten Messreihe ein Fitpolynom 2. Ordnung zugrunde liegt und somit die Fitkoeffizienten bekannt sind, können die Koeffizienten der Ableitung direkt aus diesen bestimmt werden. Die berechnete Datenreihe für Q wird durch die elektrische Leistung des Kompressors ($P = 127W$) dividiert, und die daraus resultierende Leistungszahl über der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{hoch} - T_{tiefe}$ aufgetragen.

Zur Bestimmung des Gütegrades des Kompressors wird zuerst nach [Gleichung 5](#) die maximale, theoretisch mögliche Leistungszahl ϵ_{max} bestimmt, und damit wie in [Gleichung 4](#) der Gütegrad. Das Maximum des Gütegrades wurde identifiziert mit

$$t_{\eta_{max}} = (22,5 \pm 0,7) \text{ s} \quad (13)$$

$$\epsilon_{\eta_{max}} = 1.52 \pm 0.07 \quad (14)$$

$$\eta_{max} = 1.03 \pm 0.06 \quad (15)$$

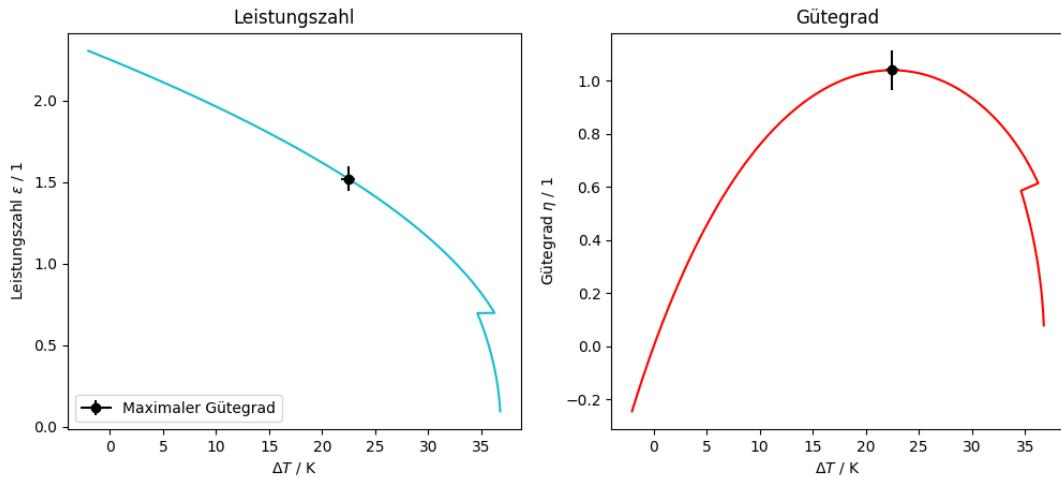


Abbildung 11: Fit von experimentell bestimmten Leistungszahl und Gütegrad

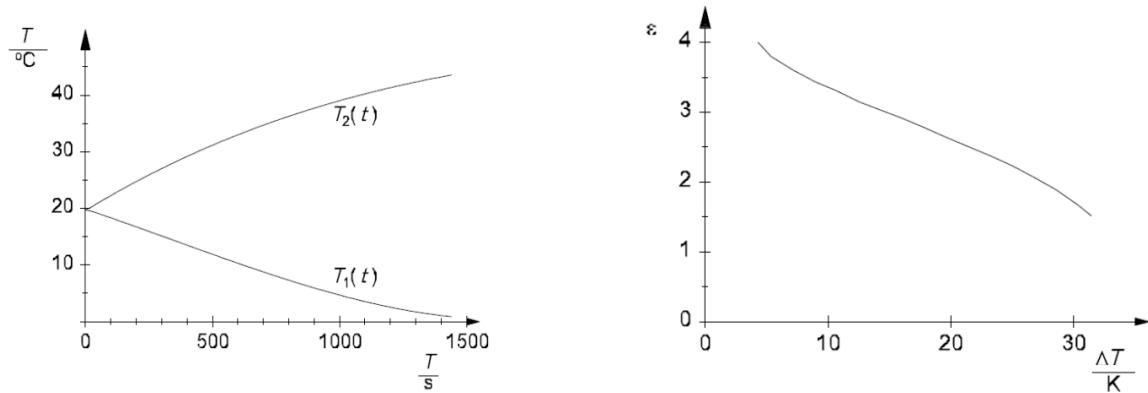


Abbildung 12: Vorgesehener Verlauf der Temperaturen (links) und Leistungszahl (rechts) laut Hersteller des Versuchsaufbaus [5]

6.1.2 pH - Diagramme von R134a

Die idealisierten Kreisprozesse für das zirkulierende Kühlmittel R134a werden anhand der Messwerte in [Tabelle 3](#) für die vier unterschiedlichen Zeitpunkte in das Druck-Enthalpie Diagramm eingezeichnet. Dadurch ergeben sich die vier Prozessschritte, die auch in [4](#) erläutert sind. Auf eine Darstellung der Unsicherheiten wurde verzichtet,

da diese aufgrund der begrenzten Genauigkeit mit der die Werte ins Diagramm eingezeichnet werden können hinfällig sind. Die entsprechenden Unsicherheiten können ebenfalls Tabelle 3 entnommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Isotherme, entlang jener Schritt 4 → 1 im Nassdampfgebiet verläuft nicht der Temperatur im kälteren Wärmebad entspricht, sondern die Isobare die von oben kommende Isotherme von T_{tief} erst im Gas-Bereich schneidet. Die Isotherme von T_{hoch} im wärmeren Wärmebad wird im Prozessschritt 2 → 3 durchlaufen.

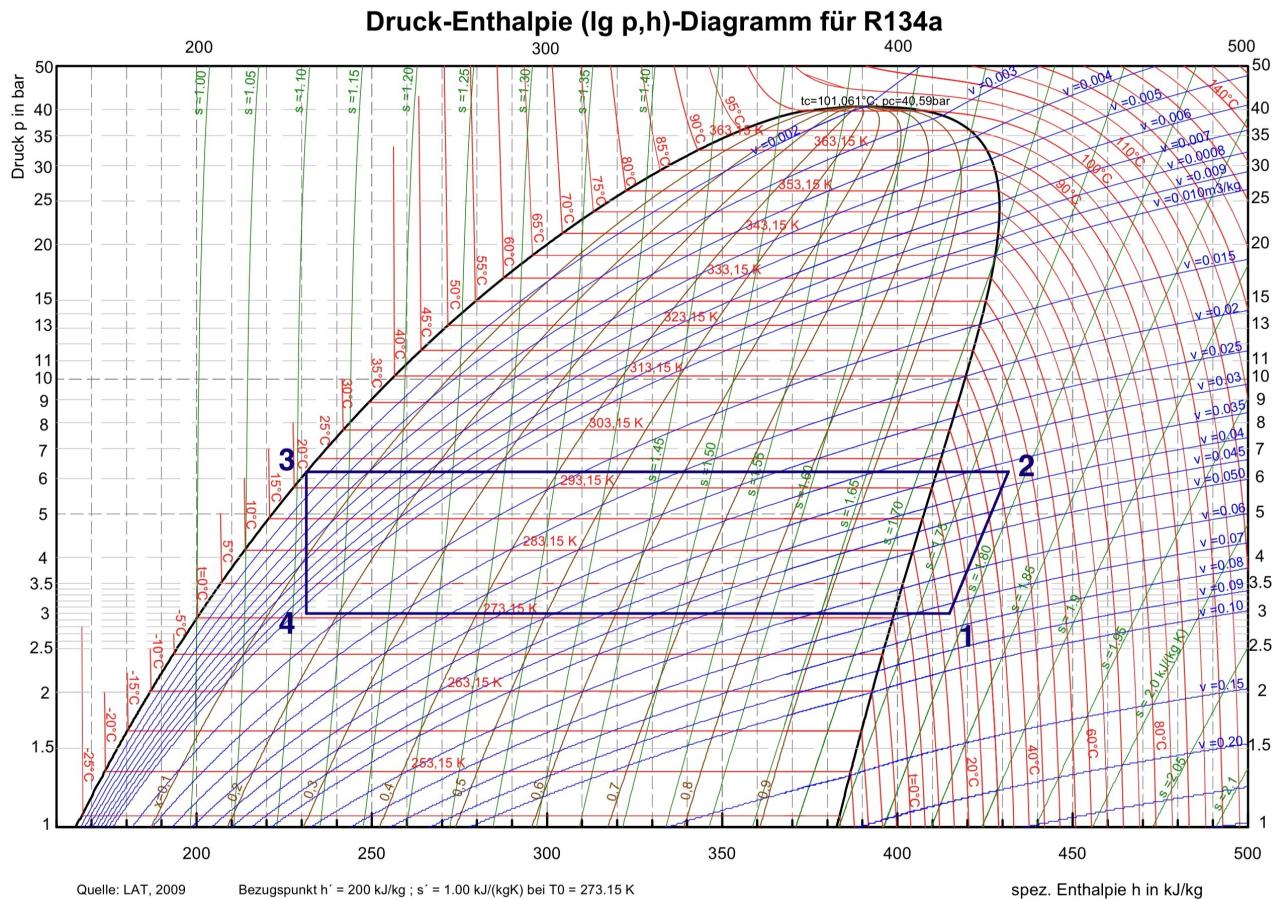


Abbildung 13: Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 267 \text{ s}$ [4]:
Kondensationsdruck $p_{hoch} = 6.2 \text{ bar}$, Verdampfungsdruck $p_{tief} = 3.0 \text{ bar}$, Verdampfungstemperatur $T_{tief} = 18.5^\circ\text{C}$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4

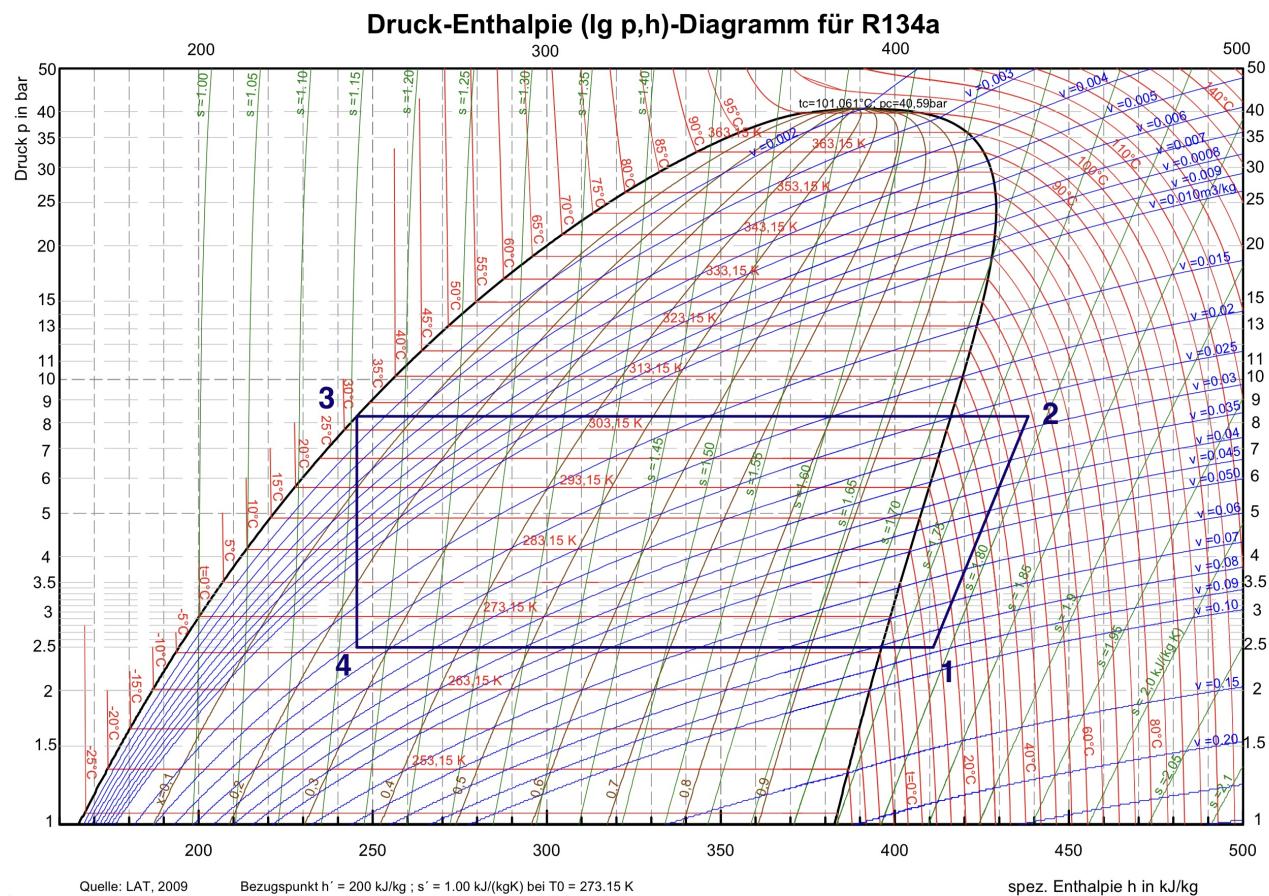


Abbildung 14: Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 786s$ [4]:
 Kondensationsdruck $p_{hoch} = 8.2\text{bar}$, Verdampfungsdruck $p_{tief} = 2.5\text{bar}$, Verdampfungstemperatur $T_{tief} = 12.7^\circ\text{C}$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4

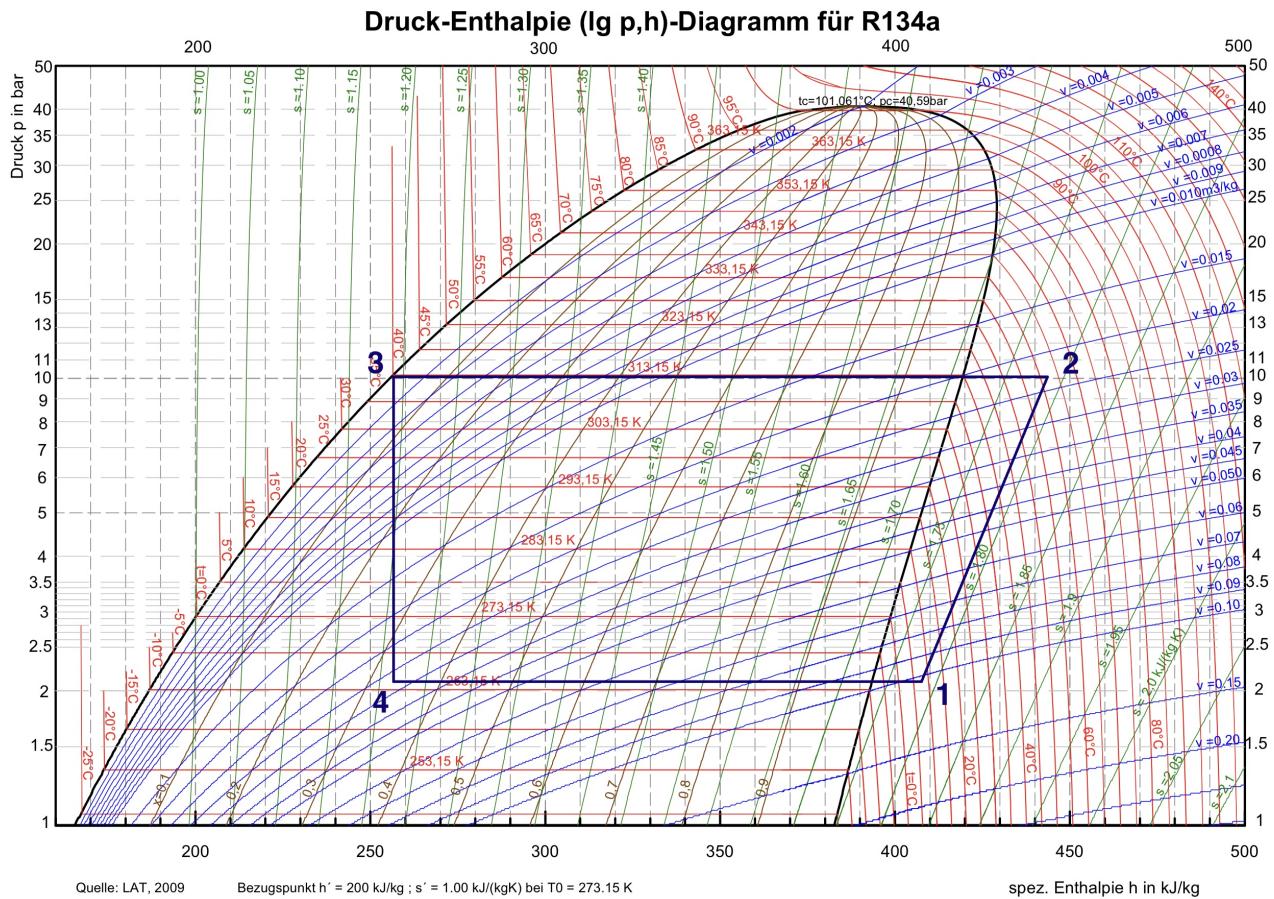


Abbildung 15: Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 1232\text{s}$ [4]:
 Kondensationsdruck $p_{hoch} = 10.1\text{bar}$, Verdampfungsdruck $p_{tief} = 2.1\text{bar}$, Verdampfungstemperatur $T_{tief} = 7.8^\circ\text{C}$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4

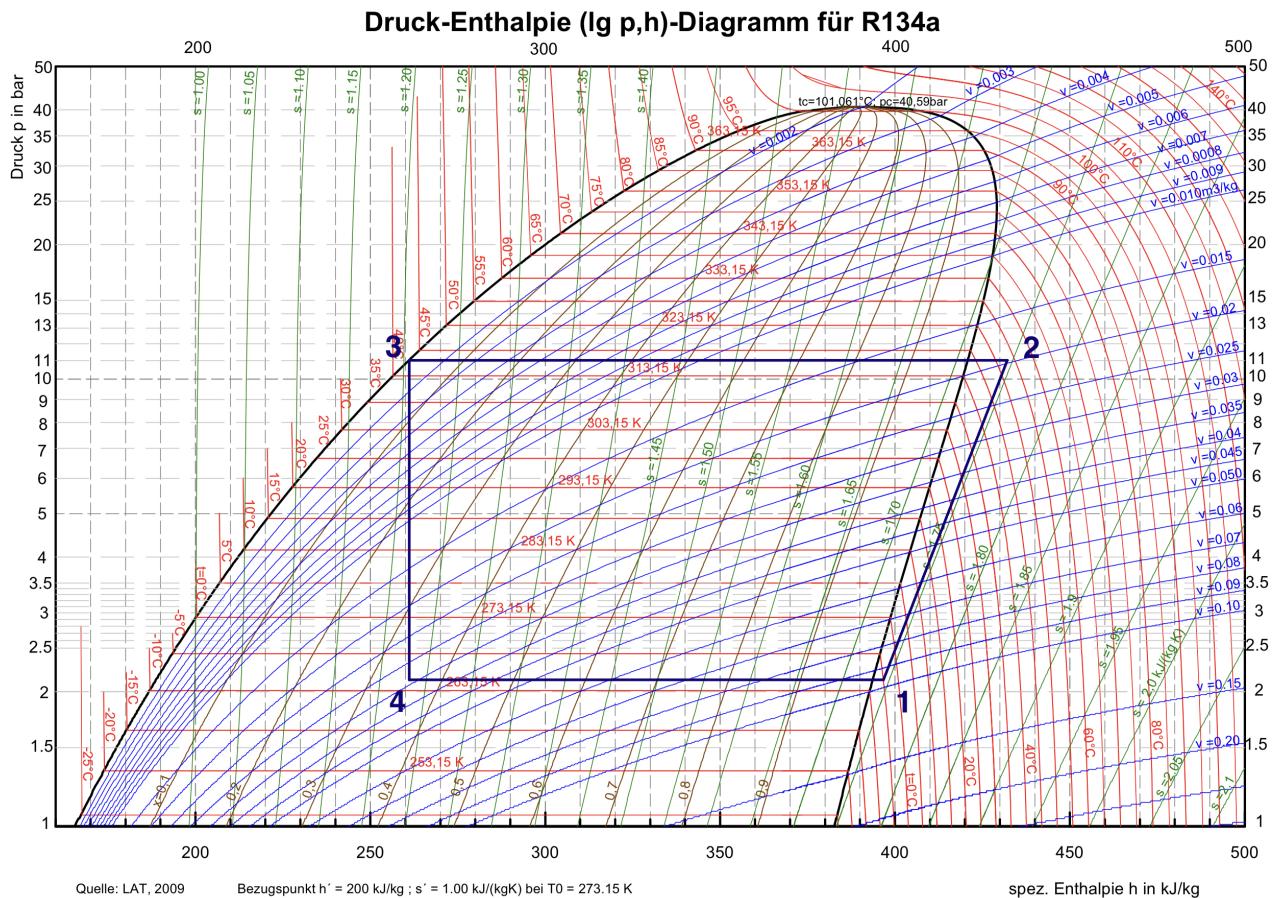


Abbildung 16: Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 1798\text{s}$ [4]:
 Kondensationsdruck $p_{hoch} = 11.0\text{bar}$, Verdampfungsdruck $p_{tief} = 2.2\text{bar}$, Verdampfungstemperatur $T_{tief} = 5.6^\circ\text{C}$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4

6.2 Solarzelle

6.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung

Die Messwerte für den Strom werden über den zugehörigen Spannungswerten (Tabelle 4 und Tabelle 5) aufgetragen, woraus sich die Kennlinie in Abbildung 17 ergibt. Der Messfehler ist jener der Multimeter, wobei der größte Anteil des Fehlers auf die zwei bzw. drei Counts Unsicherheit zurückzuführen ist - folglich sind die relativen Fehler bei der Parallelschaltung deutlich größer. Zur Bestimmung der Leistung werden Spannung und Strom miteinander multipliziert, um dann daraus ein P(U) - Diagramm zu erstellen. In diesem wird der größte Leistungswert als maximale Leistung identifiziert, aufgrund der kleinen Menge an Messpunkten, ist dieser Wert mit einer (möglicherweise) großen Unsicherheit behaftet, die nicht in der fortgepflanzten Messunsicherheit repräsentiert ist. Spannung und Strom am Punkt maximaler Leistung (MPP) sind die der maximalen Leistung zugehörigen Messwerte - die Überlegungen zur Unsicherheit gelten folglich auch für diese. Dieser Fehler pflanzt sich fort in der Berechnung des Füllfaktors. Die zu bestimmenden Diodenparameter sind für die Serienschaltung in Tabelle 6 zu finden, für die Parallelschaltung in Tabelle 7.

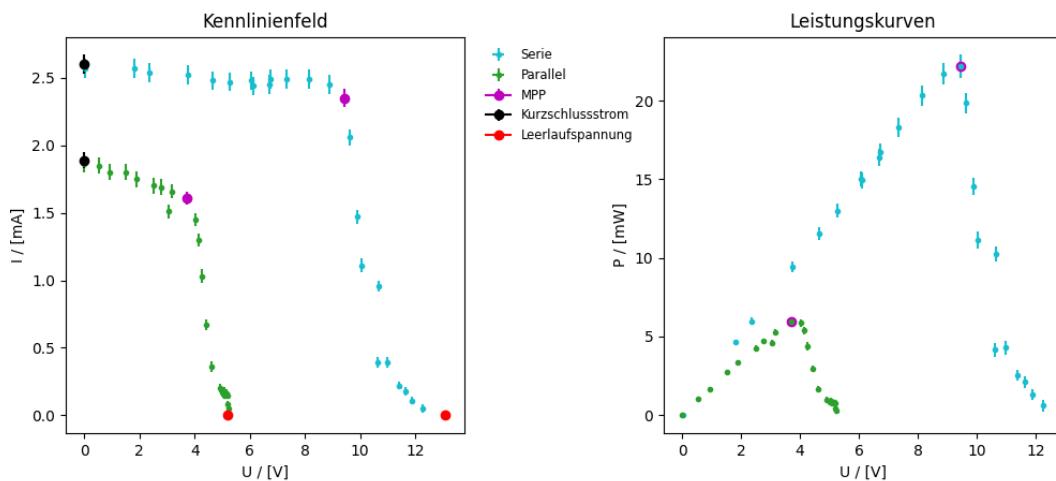


Abbildung 17: Hellkennlinien und Leistungskurven bei parallelen und seriellen Aufbau, abgebildet ist der 4. Quadrant des Kennlinienfelds einer Photodiode

Tabelle 6: Diodenparameter bei in Serie geschalteten Solarzellen

P_{MPP} ... Maximale Leistung Diode, U_{MPP} ... Spannung am Punkt maximaler Leistung, I_{MPP} ... Strom am Punkt maximaler Leistung, U_L ... Leerlaufspannung, I_K ... Kurzschlussstrom, FF ... Füllfaktor

Parameter	Wert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
P_{MPP}/mW	22,18	0,73	3%
U_{MPP}/V	9,44	0,03	0%
I_{MPP}/mA	2,35	0,07	3%
U_L/V	13,08	0,04	0%
I_K/mA	2,60	0,07	3%
$FF/1$	0,76	0,02	3%

Tabelle 7: Diodenparameter bei parallel geschalteten Solarzellen

P_{MPP} ... Maximale Leistung Diode, U_{MPP} ... Spannung am Punkt maximaler Leistung, I_{MPP} ... Strom am Punkt maximaler Leistung, U_L ... Leerlaufspannung, I_K ... Kurzschlussstrom, FF ... Füllfaktor

Parameter	Wert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
P_{MPP}/mW	2,97	0,23	7%
U_{MPP}/V	3,71	0,03	1%
I_{MPP}/mA	1,61	0,05	3%
U_L/V	5,21	0,01	0%
I_K/mA	1,89	0,06	3%
$FF/1$	0,61	0,02	3%

6.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen

Für die Bestimmung von Leistung, Strom und Spannung am MPP sowie die dem vorangegangene Berechnung der Leistung erfolgt analog zum vorherigen Versuchsaufbau. Im Gegensatz zu diesem sind Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung nicht durch eine Messung bekannt, sondern müssen ebenfalls aus den jeweiligen Messreihen entnommen werden. So wird für den Kurzschlussstrom jener Wert gewählt, bei dem die jeweilige Kennlinie die x-Achse (am ehesten) schneidet, also $U = 0V$ gilt. Umgekehrt wird für die Leerlaufspannung der Spannungswert herausgesucht, der am nächsten der y-Achse ist. Da bei Abdunkelung der Solarzelle keine elektrische Arbeit verrichtet wird, verläuft die Dunkel - Leistungskurve entlang der x-Achse, und der MPP liegt im Ursprung. Der Wirkungsgrad wird berechnet, die Lichtleistung entspricht der auf die Fläche des Thermoelements entfallende Leistung Gleichung 11. Die zu ermittelnden Diodenparametern sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Bei einer absoluten Unsicherheit von 0 überschritt die Unsicherheit die signifikanten Stellen, die relativen Unsicherheiten wurden jedoch trotzdem anhand aller Nachkommastellen berechnet, und ergibt daher oft auch einen Wert über 0%. Da die Unsicherheiten der im Kennlinienfeld (Abbildung 18) geplotteten Messwerte absolut sehr klein sind, wurde sowohl für die Spannung als auch den Strom auf eine Darstellung der Messfehler verzichtet, da dadurch die Kennlinie verrauscht wirkt und die einzelnen Errorbars nicht identifizieren werden können. Für die abgedunkelte Zelle konnte der Füllfaktor nicht berechnet werden, da aufgrund von $U_L, I_K = 0$ null im Nenner steht Tabelle 10

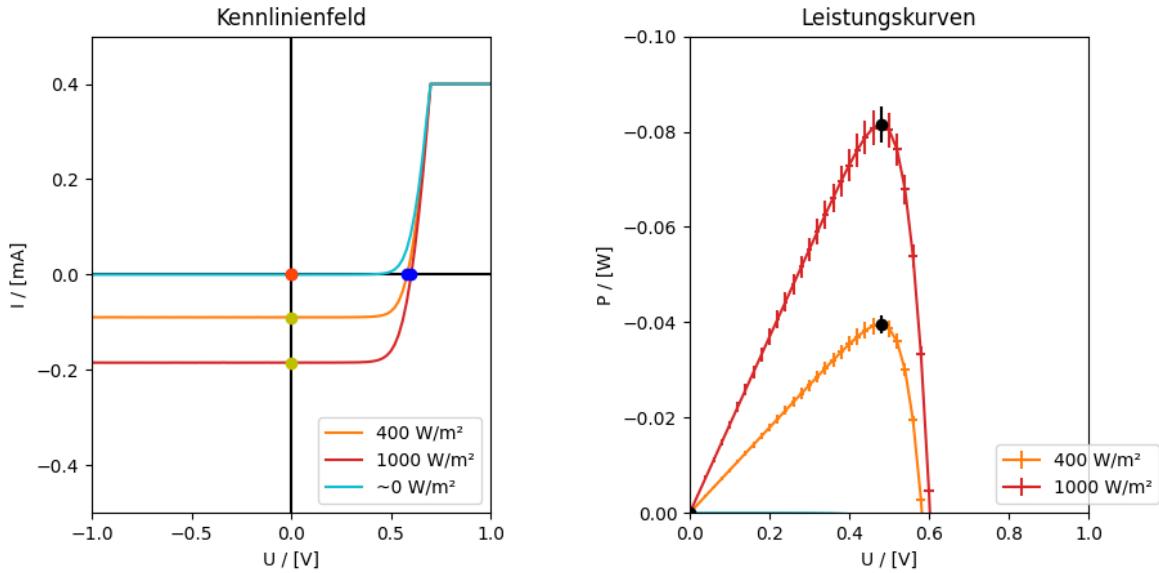


Abbildung 18: Dunkel- und Hellkennlinie mit Leistungskurven bei unterschiedlichen Lichtleistungen: Die Punkte markieren in Grün: Kurzschlussstrom, Blau: Leerlaufspannung, Rot: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung der Dunkelkennlinie, Schwarz: Punkt maximaler Leistung

Tabelle 8: Diodenparameter bei einer Lichtleistung von 400 W/m^2

P_{MPP} ... Maximale Leistung Diode, U_{MPP} ... Spannung am Punkt maximaler Leistung, I_{MPP} ... Strom am Punkt maximaler Leistung, U_L ... Leerlaufspannung, I_K ... Kurzschlussstrom, μ ... Wirkungsgrad der Diode, FF ... Füllfaktor

Parameter	Wert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
P_{MPP}/mW	39,57	1,8	5%
U_{MPP}/V	0,48	0,01	2%
I_{MPP}/mA	-0,08	0	2%
U_L/V	0,58	0,01	2%
I_K/mA	-0,09	0	1%
$\mu/1$	0,44	0,03	7%
$FF/1$	0,76	0	0%

Tabelle 9: Diodenparameter bei einer Lichtleistung von 1000 W/m^2

P_{MPP} ... Maximale Leistung Diode, U_{MPP} ... Spannung am Punkt maximaler Leistung, I_{MPP} ... Strom am Punkt maximaler Leistung, U_L ... Leerlaufspannung, I_K ... Kurzschlussstrom, μ ... Wirkungsgrad der Diode, FF ... Füllfaktor

Parameter	Wert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
P_{MPP}/W	-81,52	-1,8	2%
U_{MPP}/V	0,48	0,01	2%
I_{MPP}/mA	-0,17	0	1%
U_L/V	0,6	0,01	2%
I_K/mA	-0,18	0	0%
$\mu/1$	0,36	0,01	3%
$FF/1$	0,74	0	0%

Tabelle 10: Diodenparameter bei Verdunkelung der Lampe W/m^2

P_{MPP} ... Maximale Leistung Diode, U_{MPP} ... Spannung am Punkt maximaler Leistung, I_{MPP} ... Strom am Punkt maximaler Leistung, U_L ... Leerlaufspannung, I_K ... Kurzschlussstrom, μ ... Wirkungsgrad der Diode, FF ... Füllfaktor

Parameter	Wert	Abs. Unsicherheit	Rel. Unsicherheit
P_{MPP}/W	0	0	0 %
U_{MPP}/V	0	0	0 %
I_{MPP}/mA	0	0	0 %
U_L/V	0	0	0 %
I_K/mA	0	0	0 %
$\mu/1$	0	0	0 %
$FF/[]$	-	-	-

7 Diskussion

7.1 Wärmepumpe

7.1.1 Temperaturverlauf

Der in Abbildung 9 abgebildete Temperaturverlauf entspricht nicht den Erwartungen, da das Plateau, dass ab dem Zeitpunkt an dem sich Eis um den Wärmetauscher bildet aufgezeichnet wird nicht wie erwartet bei 4 °C liegt, sondern bei 6.5 °C. Dies ist insbesondere verwunderlich, da vor dem aufgezeichneten Sprung bereits 4 °C gemessen wurden, was in Kombination mit der Tatsache dass ein konstantes Temperaturniveau gemessen wurde nahelegt, dass sich um die Messspitze bereits Eis gebildet haben muss. Dies konnte direkt nach Beendigung der Messung jedoch nicht festgestellt werden.

Auffällig ist auch, dass bevor sich die beiden Temperaturverläufe schneiden, jener des blauen Eimers konstant bleibt, und nicht sofort abnimmt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Wärmebad im roten Eimer nach dem Einschalten der Pumpe zuerst durchlaufen wird, und das kältere Kühlmittel erst mit einer Verzögerung im Wärmetauscher im blauen Eimer ankommt.

7.1.2 Berechnung von Leistungszahl und Gütegrad

Eine weitere Auffälligkeit ist die Form des Verlaufes der Leistungszahl Abbildung 11. Der Vergleich mit dem vom Hersteller des Versuchsaufbaus vorgesehenen Verlauf Abbildung 12 legt einen Fehler in der Auswertung nahe, da einerseits die Form stark abweicht sowie die berechnete Leistungszahl um den Faktor 2 kleiner ist. Da so einen Fehler nicht gefunden werden konnte, und die berechneten Leistungszahlen vor dem Erreichen des konstanten Temperaturniveaus eher den Angaben im Datenblatt des Kompressors entsprechen [1], wurde das Ergebnis so belassen. Dazu trug auch bei, dass das Ergebnis grundsätzlich sinnvoll sein könnte, da ϵ direkt von der Änderung der höheren Temperatur abhängt, und folglich die Leistungszahl zu Beginn der Messung am größten ist und dann abfällt.

Evap. temp. in °C	-45	-40	-35	-30	-25	-23.3	-20	-15	-10	-6.7	-5	0	5	7.2	10	15	20
Capacity in W				31.2	50.4	57.7	72.9	99.4	131	154	168	211	262	287	321	388	
Power cons. in W				57.7	65.8	68.8	75.0	85.2	96.2	104	108	120	133	139	146	159	
Current cons. in A				0.68	0.70	0.70	0.72	0.74	0.77	0.79	0.80	0.84	0.88	0.89	0.92	0.97	
COP in W/W				0.54	0.77	0.84	0.97	1.17	1.36	1.49	1.56	1.76	1.97	2.07	2.20	2.44	

Abbildung 19: Auszug aus Datenblatt des Kompressors: Für Verdampfungstemperaturen zwischen ca. 18 °C und 4 °C liegt die berechnete Leistungszahl in der Größenordnung des angegebenen COP [1]

Der Verlauf des Gütegrades entspricht definitiv nicht der physikalischen Realität, dem zugrunde liegt vermutlich ein Fehler in der Auswertung, der jedoch nicht eruiert werden konnte. Da der Gütegrad einen Vergleich zum Idealwert der Leistungszahl anstellt, beträgt dieser maximal 1 und liegt in der Praxis zwischen 0.4 und 0.5. Des Weiteren erscheint die Form des Gütegrades nicht richtig - da die maximale Leistungszahl für alle ΔT gleich groß sein müsste, ist ein Verlauf analog zur Leistungszahl für den Gütegrad naheliegender.

Eine beitragender Faktor zum sehr hohen Gütegrad könnte auch die in der Vorbereitung beschriebene Vorgangsweise zur Bestimmung der Leistungszahl sein - dabei wird die ausgetauschte Wärmemenge, die nur von der Temperatur als experimentell bestimmte Variable abhängt direkt aus der Steigung des Temperaturverlaufes berechnet. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sämtliche Wärmeverluste vernachlässigt werden, und somit die gemessenen Temperaturwerte als ideal erachtet werden. Dadurch wäre auch bei korrekter Berechnung des Verlaufs des Gütegrades dieser gegenüber dem realen Wert erhöht.

7.1.3 p-H-Diagramme von R134a

Die Ungereimtheiten setzen sich bei den p-H-Diagrammen fort. Die Enthalpie entspricht bei isobaren Prozessen der ausgetauschten Wärme, folglich führt eine große Enthalpedifferenz innerhalb eines Zykluses im Kreisprozess zu einer größeren (und somit besseren) Leistungszahl. Vor diesem Hintergrund decken sich die Beobachtungen in dem p-H-Diagrammen nicht mit dem Verlauf der Leistungszahl: Mit stagnierenden Temperaturänderungen und der damit verbundenen stagnierenden Wärmeänderung sollte die Differenz zwischen den beiden Absolutbeträgen der Enthalpieänderungen in den isobaren Prozessschritten 2 → 3 und 4 → 1 kleiner werden, und nicht größer wie beobachtet.

7.2 Solarzelle

Der erwartete qualitative Verlauf des Stroms als Funktion der Spannung kann in allen Messreihen beobachtet werden: Bei kleineren Spannungswerten fließt ein nahezu konstanter Strom über den Verbraucher ab, da der Widerstand an der Sperrsicht größer als der innere Widerstand der Last ist. Ab einem gewissen Spannungswert fällt der Strom abrupt ab, dies ist der Punkt, an dem der Widerstand des Verbrauchers größer wird als jener der Sperrsicht. Die Ladungsträger rekombinieren nun, indem sie das Potential der Raumladungszone überwinden und zum anders dotierten Halbleiterkristall gelangen.

7.2.1 Vergleich von Kennlinien und -daten von Solarzellen in Parallel- oder Serienschaltung

Die Abdunkelung einer Solarzelle in Serienschaltung sollte zu einer starken Verkleinerung der Werte der Stromstärke führen. Dies ließe sich dadurch erklären, dass in Serienschaltung die verschattete Solarzelle wie ein Widerstand wirkt. Dies sollte dazu führen, dass zusätzlich zum Ausfall der einen Solarzelle die generierte Spannung an diesem Widerstand abfällt und dadurch verringert wird. Dies sollte einen starken Abfall der Stromstärke zur Folge haben.

In Anbetracht dessen war das Verhalten der Solarzelle bei Abdunkelung sehr ungewöhnlich, da sich sowohl Strom als auch Spannung unabhängig von der Last nur minimal im Bereich um 0 bewegten, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass die Solarzelle in früheren Versuchen beschädigt wurde. Dies kann unter anderen durch zu intensive Bestrahlung passieren, weswegen für Solarzellen Grenzwerte für die Strahlungsleistung angegeben werden. Dem widerspricht aber, dass für alle Schaltungen mit Ausnahme der Parallelschaltung für kristalline Siliziumzellen übliche Füllfaktoren im Bereich zwischen 0.75 und 0.85 erreicht wurden. Da der Hersteller sowie Modell des Solarmoduls nicht bekannt ist, können keine Vergleichswerte für den Versuch herangezogen werden.

Das ungewöhnliche Verhalten der Solarzelle setzt sich in der Gegenüberstellung der I(U) - Kennlinien von parallel bzw. in Serie geschalteten Solarzellen ([Abbildung 17](#)) fort. Bei der Verschaltung in Serie sollte sich die Spannung addieren, bei Parallelschaltung die Ströme der Zellen - was eine andere Form der Kennlinien zur Folge hätte.

7.2.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle bei unterschiedlichen Strahlungsleistungen

Im zweiten Versuch entsprechen die I(U)- Kennlinien den Erwartungen. Unerwartet ist die ausbleibende Verschiebung des MPP entlang der Spannungsachse, möglicherweise war der Unterschied in den Strahlungsleistungen nicht groß genug, um die Verschiebung aufzulösen.

8 Zusammenfassung

8.1 Ergebnisse Wärmepumpe

Ein Screenshot des zu messenden Temperaturverlaufs in den beiden Wärmebädern ist in [Abbildung 9](#) zu finden, der daraus rekonstruierte Fit ist in [Abbildung 10](#) geplottet.

Der bestimmte Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz sowie der daraus bestimmte Gütegrad sind in [Abbildung 11](#) zu finden. Dabei handelt es sich jedoch um vermutlich nicht richtige ausgewertete Ergebnisse, mehr dazu in der Diskussion [Unterunterabschnitt 7.1.2](#).

Die Druck-Enthalpie Diagramme des Kühlmittels R134a decken sich nicht mit den Erwartungen, dies wurde diskutiert in [Unterunterabschnitt 7.1.3](#), die betreffenden Diagramme sind in [Unterunterabschnitt 6.1.2](#) zu finden.

8.2 Ergebnisse Solarzelle

Der Vergleich der I(U)- und P(U) - Kennlinie von den in Serie bzw. parallel geschalteten Solarzellen ist in [Abbildung 17](#) dargestellt. Die Form der Kennlinien ist physikalisch plausibel, in Bezug zueinander widersprechen die Ergebnisse jedoch den Erwartungen. Die berechneten Diodenparameter sind für die Serienschaltung in [Tabelle 6](#) zu finden, für die Parallelschaltung in [Tabelle 7](#).

Die Teilaufgabe bei der das Verhalten der Solarzellen bei teilweiser Verdunkelung untersucht werden sollte, konnte aufgrund einer Fehlfunktion des Versuchsaufbau nicht sinnvoll durchgeführt werden. Die Diskussion der erwarteten Ergebnisse erfolgt in [Unterunterabschnitt 7.2.1](#).

Die Ergebnisse des Versuches zu den unterschiedlichen Bestrahlungsleistungen sind in [Abbildung 18](#) dargestellt, die berechneten Diodenparameter befinden sich für eine Strahlungsleistung von $400 \frac{W}{m^2}$ in [Tabelle 8](#), für $1000 \frac{W}{m^2}$ in [Tabelle 9](#) und jene für die Dunkelkennlinie in [Tabelle 10](#). Die Ergebnisse sind plausibel und entsprechen den Erwartungen.

Tabellenverzeichnis

1	Tabelle 1	6
2	Tabelle 2	7
3	Tabelle 3	12
4	Tabelle 4	13
5	Tabelle 5	14
6	Tabelle 5	21
7	Tabelle 6	21
8	Tabelle 7	22
9	Tabelle 9	23
10	Tabelle 10	23

Abbildungsverzeichnis

1	Kennlinienfeld einer Photodiode. In Rot: MPP (Maximum Power Point) [8]	5
2	Kennlinienfeld einer Photodiode. In Rot: MPP (Maximum Power Point) [8]	5
3	Schematische Darstellung der Berechnung des Füllfaktors[11]	6
4	Schematische Darstellung der Wärmepumpe [5]	8
5	Aufbau der Wärmepumpe: 1: Kompressor 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 Anklemmen an Kupferrohre 12: Kupfer-Messschuh (2x) zum Einsticken von Temperaturfühlern 13: Manometer für die Niederdruckseite 14: Manometer für die Hochdruckseite [9]	9
6	Schaltskizze zum Aufbau [10]	10
7	Aufbau für die Messung der Kennlinie bei Serienschaltung [10]	10
8	Aufbau für Versuch mit Sonnensimulator,von links nach rechts:Leistungsmessgerät,Sourcemeter,(davor) Thermoelement, Sonnensimulator mit Solarzelle in Halterung [10]	11
9	Screenshot des Temperaturverlaufs in Cassy Lab 2	12
10	Fit des Temperaturverlaufs in Abbildung 9: Die Unsicherheit der ausgelesenen Messwerte sowie jene der Druckmessung in t sind sehr groß, aufgrund der Skalierung der Zeitachse sind die zugehörigen Errorbars jedoch nicht sichtbar.	15
11	Fit von experimentell bestimmten Leistungszahl und Gütegrad	16
12	Vorgesehener Verlauf der Temperaturen (links) und Leistungszahl (rechts) laut Hersteller des Versuchsaufbaus [5]	16
13	Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 267s$ [4]: Kondensationsdruck $p_{hoch} = 6.2bar$, Verdampfungsdruck $p_{tiefe} = 3.0bar$, Verdampfungstemperatur $T_{tiefe} = 18.5^{\circ}C$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4	17
14	Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 786s$ [4]: Kondensationsdruck $p_{hoch} = 8.2bar$, Verdampfungsdruck $p_{tiefe} = 2.5bar$, Verdampfungstemperatur $T_{tiefe} = 12.7^{\circ}C$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4	18
15	Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 1232s$ [4]: Kondensationsdruck $p_{hoch} = 10.1bar$, Verdampfungsdruck $p_{tiefe} = 2.1bar$, Verdampfungstemperatur $T_{tiefe} = 7.8^{\circ}C$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4	19
16	Druck-Enthalpie-Diagramm von R134a zum Zeitpunkt $t = 1798s$ [4]: Kondensationsdruck $p_{hoch} = 11.0bar$, Verdampfungsdruck $p_{tiefe} = 2.2bar$, Verdampfungstemperatur $T_{tiefe} = 5.6^{\circ}C$. Zur Erklärung der einzelnen Prozessschritte siehe 4	20
17	Hellkennlinien und Leistungskurven bei parallelen und seriellen Aufbau, abgebildet ist der 4. Quadrant des Kennlinienfelds einer Photodiode	21
18	Dunkel- und Hellkennlinie mit Leistungskurven bei unterschiedlichen Lichtleistungen: Die Punkte markieren in Grün: Kurzschlussstrom, Blau: Leerlaufspannung, Rot: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung der Dunkelkennlinie, Schwarz: Punkt maximaler Leistung	22
19	Auszug aus Datenblatt des Kompressors: Für Verdampfungstemperaturen zwischen ca. $18^{\circ}C$ und $4^{\circ}C$ liegt die berechnete Leistungszahl in der Größenordnung des angegebenen COP [1]	24

Literatur

- ¹Danfoss, „TL3G Universal Compressor R134a 220-240V 50/60Hz“, (2011).
- ²F. Corporation, „Technical Data Fluke 170 Series True-rms Digital Multimeters“, (2018).
- ³R. Würschum, „Vorlesungsskript Thermodynamik“, (2018).
- ⁴lat.mb.hs-osnabrueck.de/download/Praktikum/K%e4ltemaschine/log%20p,%20h%20Diagramm%20134a.pdf.
- ⁵L. D. GmbH, „Gebrauchsanweisung 389 521 Wärmepumpe pT“,
- ⁶L. D. GmbH, „Gebrauchsanweisung 666 193 Temperaturfühler NiCr-Ni“,
- ⁷L. D. GmbH, „Gebrauchsanweisung 666 209 Digitales Temperaturmessgerät“,
- ⁸G. Hess, de.wikipedia.org/wiki/Photodiode#/media/Datei:Kennlinie_Photodiode_1.png.
- ⁹A. Hohenau, „Wärmepumpe“,
- ¹⁰G. P.Knoll A.Schöffmann, „Fortgeschrittenenpraktikum 2, Die Solarzelle“,
- ¹¹D. .-. Solarpraxis, work-crew.de/photovoltaik/.
- ¹²Tektronix, „2450 SourceMeter SMU Instrument Datasheet“,

9 Anhang

Die Auswertung wurde automatisiert mittels Python-Programmen durchgeführt:

Wärmepumpe

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 import scipy.odr
4 import uncertainties
5 import uncertainties.unumpy
6
7 nom = uncertainties.unumpy.nominal_values
8 std = uncertainties.unumpy.std_devs
9
10 zeit_ausgelesen = np.linspace(0, 2600, 14)
11 zeit_ausgelesen = np.append(zeit_ausgelesen, 2640)
12
13 t_niedrig_gemessen = np.array([21.5, 18.8, 16.0, 13.0, 11.5, 10, 8, 7.25, 6.23, 5.5, 4.6,
14   ↪ 4.5, 4.5, 4.5, 4.5])
14 t_hoch_gemessen = np.array(
15   [18.75, 22.5, 26.0, 29.0, 31.75, 33.75, 36.0, 37.5, 38.75, 39.9, 41.0, 42.2, 43.0, 43.5,
16   ↪ 43.6]
16 )
17 t_unc = np.ones([15]) * 2.5
18
19 t_niedrig_gemessen = uncertainties.unumpy.uarray(t_niedrig_gemessen, t_unc)
20 t_hoch_gemessen = uncertainties.unumpy.uarray(t_hoch_gemessen, t_unc)
21
22 model = scipy.odr.polynomial(2)
23
24 data_niedrig = scipy.odr.RealData(zeit_ausgelesen, nom(t_niedrig_gemessen),
25   ↪ sy=std(t_niedrig_gemessen))
25 odr_niedrig = scipy.odr.ODR(data_niedrig, model)
26 result_niedrig = odr_niedrig.run()
27
28 data_hoch = scipy.odr.RealData(zeit_ausgelesen, nom(t_hoch_gemessen),
29   ↪ sy=std(t_hoch_gemessen))
29 odr_hoch = scipy.odr.ODR(data_hoch, model)
30 result_hoch = odr_hoch.run()
31
32 # result_hoch pprint()
33 # result_niedrig pprint()
34
35 a_niedrig = uncertainties.ufloat(result_niedrig.beta[2], result_niedrig.sd_beta[2])
36 b_niedrig = uncertainties.ufloat(result_niedrig.beta[1], result_niedrig.sd_beta[1])
37 c_niedrig = uncertainties.ufloat(result_niedrig.beta[0], result_niedrig.sd_beta[0])
38
39 a_hoch = uncertainties.ufloat(result_hoch.beta[2], result_hoch.sd_beta[2])
40 b_hoch = uncertainties.ufloat(result_hoch.beta[1], result_hoch.sd_beta[1])
41 c_hoch = uncertainties.ufloat(result_hoch.beta[0], result_hoch.sd_beta[0])
42
43 # print(a_hoch)
44 # print(b_hoch)
45 # print(c_hoch)
46
47 zeit_gesamt = np.linspace(0, 2640, 2640)
48 t_unc_long = np.ones([2640]) * 2.5
49

```

```

50 fit_niedrig = np.polyval([a_niedrig, b_niedrig, c_niedrig], zeit_gesamt)
51 fit_hoch = np.polyval([a_hoch, b_hoch, c_hoch], zeit_gesamt)
52
53 # Offset
54 fit_niedrig[1920:] = uncertainties.ufloat(6.5, 2.5)
55 t_niedrig_gemessen[10:] = uncertainties.ufloat(6.5, 2.5)
56
57 # Temperatur bei Druckmesungen
58 t_p_267 = 18.5
59 t_p_786 = 12.7
60 t_p_1232 = 7.8
61 t_p_1798 = 5.6
62
63 fig, ax = plt.subplots()
64 fig.set_figwidth(12)
65 ax.set_title("Fit des Temperaturverlaufs in Wärmebädern")
66 ax.set_xlabel("Zeit t / s")
67 ax.set_ylabel("Temperatur T / °C")
68 ax.plot(zeit_gesamt, nom(fit_niedrig), color="C0", label="Fit Temperaturverlauf im kalten
   ↵ Wärmebad")
69 ax.errorbar(
70     zeit_ausgelesen,
71     nom(t_niedrig_gemessen),
72     yerr=std(t_niedrig_gemessen),
73     color="k",
74     linestyle="none",
75     marker=".",
76     label="Ausgelesene Messwerte",
77 )
78 ax.plot(zeit_gesamt, nom(fit_hoch), color="C3", label="Fit Temperaturverlauf im warmen
   ↵ Wärmebad")
79 ax.errorbar(zeit_ausgelesen, nom(t_hoch_gemessen), yerr=std(t_hoch_gemessen), color="k",
   ↵ linestyle="none", marker=".")
80 ax.errorbar(267, t_p_267, xerr=5, yerr=2.5, color="C1", marker="o", label="Druckmessung 1, p
   ↵ = 3.0 bar")
81 ax.errorbar(786, t_p_786, xerr=5, yerr=2.5, color="C2", marker="o", label="Druckmessung 2, p
   ↵ = 2.5 bar")
82 ax.errorbar(1232, t_p_1232, xerr=5, yerr=2.5, color="C4", marker="o", label="Druckmessung 3,
   ↵ p = 2.1 bar")
83 ax.errorbar(1798, t_p_1798, xerr=5, yerr=2.5, color="C9", marker="o", label="Druckmessung 4,
   ↵ p = 2.2 bar")
84 ax.legend(loc="center right", bbox_to_anchor=(1, 0.5))
85 fig.savefig("temperaturverlauf.png")
86
87 # Leistungszahl bestimmen
88
89 c_wasser = 4.19e3
90 m = uncertainties.ufloat(4, 0.01)
91 dt_t_hoch_koeff = [2 * a_hoch, b_hoch]
92 dt_t_hoch = np.polyval(dt_t_hoch_koeff, zeit_gesamt[:1920])
93 Q_dt = c_wasser * m * dt_t_hoch
94 leistungszahl = Q_dt / 127
95 delta_T = fit_hoch[:1920] - fit_niedrig[:1920]
96
97 leistungszahl_max = fit_hoch[:1920] / (fit_hoch[:1920] - fit_niedrig[:1920])
98
99 # fig, ax = plt.subplots()
# ax.plot(nom(delta_T), nom(leistungszahl_max))
100

```

```

101
102
103 guetegrad = leistungszahl / leistungszahl_max
104 index_guetegrad_max = np.argmax(nom(guetegrad)) # 936
105
106 print(f"t_max = {nom(delta_T[index_guetegrad_max])},{std(delta_T[index_guetegrad_max])}")
107 print(f"COP_max =
    {nom(leistungszahl[index_guetegrad_max])},{std(leistungszahl[index_guetegrad_max])}")
108 print(f"eta_max =
    {nom(guetegrad[index_guetegrad_max])},{std(guetegrad[index_guetegrad_max])}")
109
110 fig2, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2)
111 fig2.set_figwidth(12)
112 ax1.set_title("Leistungszahl")
113 ax2.set_title("Gütegrad")
114 ax1.set_xlabel(r"$\Delta T / K$")
115 ax1.set_ylabel(r"Leistungszahl $\epsilon / 1$")
116 ax2.set_xlabel(r"$\Delta T / K$")
117 ax2.set_ylabel(r"Gütegrad $\eta / 1$")
118
119 ax1.plot(nom(delta_T), nom(leistungszahl), color="C9")
120 ax1.errorbar(
121     nom(delta_T[index_guetegrad_max]),
122     nom(leistungszahl[index_guetegrad_max]),
123     xerr=std(delta_T[index_guetegrad_max]),
124     yerr=std(leistungszahl[index_guetegrad_max]),
125     marker="o",
126     color="k",
127     label="Maximaler Gütegrad",
128 )
129 ax2.plot(nom(delta_T), nom(guetegrad), color="r")
130 ax2.errorbar(
131     nom(delta_T[index_guetegrad_max]),
132     nom(guetegrad[index_guetegrad_max]),
133     xerr=std(delta_T[index_guetegrad_max]),
134     yerr=std(leistungszahl[index_guetegrad_max]),
135     marker="o",
136     color="k",
137 )
138 ax1.legend(loc="lower left")
139 fig2.savefig("leistungszahl.png")
140 plt.show()

```

Solarzelle

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import scipy as sp
5
6
7 def diodenparameter_1(u, u_unc, i, i_unc, u_l, u_l_unc, i_k, i_k_unc, fit_intervall,
8     fit_steps):
9
10     p_mess = u * i
11     p_mess_unc = i * u_unc + u * i_unc
12
13     index_mpp = np.argmax(p_mess)

```

```

13     p_mpp = p_mess[index_mpp]
14     i_mpp = i[index_mpp]
15     u_mpp = u[index_mpp]
16     p_mpp_unc = p_mess_unc[index_mpp]
17     i_mpp_unc = i_unc[index_mpp]
18     u_mpp_unc = u_unc[index_mpp]
19
20     ff = (i_mpp * u_mpp) / (i_k * u_l)
21     ff_unc = i_mpp * u_mpp / ((i_k + i_k_unc) * (u_l + u_l_unc))
22     ff_unc = ff_unc - ff
23
24     return p_mess, p_mess_unc, p_mpp, p_mpp_unc, u_mpp, u_mpp_unc, i_mpp, i_mpp_unc, ff,
25     ↵ ff_unc
26
27 data_pv1 = pd.read_csv("solarzelle1_daten.csv", sep=";", decimal=",")
28
29 U_s = data_pv1.u_s
30 U_s_unc = data_pv1.u_s_unc
31 I_s = data_pv1.i_s
32 I_s_unc = data_pv1.i_s_unc
33 U_p = data_pv1.u_p
34 U_p_unc = data_pv1.u_p_unc
35 I_p = data_pv1.i_p
36 I_p_unc = data_pv1.i_p_unc
37
38 U_L_s = 13.08
39 U_L_s_unc = 0.04
40 I_K_s = 2.6
41 I_K_s_unc = 0.07
42
43 U_L_p = 5.21
44 U_L_p_unc = 0.01
45 I_K_p = 1.89
46 I_K_p_unc = 0.06
47
48 parameter_s = diodenparameter_1(U_s, U_s_unc, I_s, I_s_unc, U_L_s, U_L_s_unc, I_K_s,
49   ↵ I_K_s_unc, 12.5, 1250)
50 parameter_p = diodenparameter_1(
51     U_p[0:-1], U_p_unc[0:-1], I_p[0:-1], I_p_unc[0:-1], U_L_p, U_L_p_unc, I_K_p, I_K_p_unc,
52     ↵ 5, 500
53 )
54 print(parameter_s[9]) # p_mess, p_mess_unc, p_mpp, p_mpp_unc, u_mpp, u_mpp_unc, i_mpp,
55   ↵ i_mpp_unc, ff, ff_unc#
56 print("-----")
57 print(parameter_p[9])
58
59 fig_task1, (ax_UI, ax_PU) = plt.subplots(1, 2)
60 fig_task1.set_figwidth(12)
61 plt.subplots_adjust(wspace=0.5)
62
63 # Kennlinienfeld
64 ax_UI.set_title("Kennlinienfeld")
65 ax_UI.set_xlabel("U / [V]")
66 ax_UI.set_ylabel("I / [mA]")
67 ax_UI.errorbar(U_s, I_s, xerr=U_s_unc, yerr=I_s_unc, linestyle="None", color="C9",
68   ↵ marker=". ", label="Serie")

```

```

65 ax_UI.errorbar(U_p, I_p, xerr=U_p_unc, yerr=I_p_unc, linestyle="None", color="C2",
66   ↵ marker=". ", label="Parallel")
67 ax_UI.errorbar(
68   parameter_s[4], parameter_s[6], xerr=parameter_s[5], yerr=parameter_s[7], color="m",
69   ↵ marker="o", label="MPP"
70 )
71 ax_UI.errorbar(parameter_p[4], parameter_p[6], xerr=parameter_p[5], yerr=parameter_p[7],
72   ↵ color="m", marker="o")
73 ax_UI.errorbar(0, I_K_s, yerr=I_K_s_unc, color="k", marker="o", label="Kurzschlussstrom")
74 ax_UI.errorbar(0, I_K_p, yerr=I_K_p_unc, color="k", marker="o")
75 ax_UI.errorbar(U_L_s, 0, xerr=U_L_s_unc, color="r", marker="o", label="Leerlaufspannung")
76 ax_UI.errorbar(U_L_p, 0, xerr=U_L_p_unc, color="r", marker="o")
77 ax_UI.legend(loc="upper right", bbox_to_anchor=(1.45, 1), frameon=False, fontsize="small")
78
79 # Leistungskurve
80 ax_PU.set_title("Leistungskurven")
81 ax_PU.set_xlabel("U / [V]")
82 ax_PU.set_ylabel("P / [mW]")
83 ax_PU.errorbar(parameter_s[4], parameter_s[2], xerr=parameter_s[5], yerr=parameter_s[3],
84   ↵ color="m", marker="o")
85 ax_PU.errorbar(parameter_p[4], parameter_p[2], xerr=parameter_p[5], yerr=parameter_p[3],
86   ↵ color="m", marker="o")
87 ax_PU.errorbar(
88   U_s, parameter_s[0], xerr=U_s_unc, yerr=parameter_s[1], linestyle="None", color="C9",
89   ↵ marker=". ", label="Serie"
90 )
91
92 ax_PU.errorbar(
93   U_p[0:-1],
94   parameter_p[0],
95   xerr=U_p_unc[0:-1],
96   yerr=parameter_p[1],
97   linestyle="None",
98   color="C2",
99   marker=". ",
100  label="Parallel",
101 )
102
103 plt.show()
104 fig_task1.savefig("PV_Task1.png")
105
106 import matplotlib.pyplot as plt
107 import numpy as np
108 import pandas as pd
109
110
111 def diodenparameter_2(
112   spannung, strom, unsicherheit_spannung, unsicherheit_strom, lichtleistung,
113   ↵ unsicherheit_lichtleistung
114 ):
115
116   p = spannung * strom
117   p_unc = strom * unsicherheit_spannung + spannung * unsicherheit_strom
118   index_mpp = np.argmin(p)
119   p_mpp = p[index_mpp]
120   p_mpp_unc = p_unc[index_mpp]
121   i_mpp = strom[index_mpp]
122   i_mpp_unc = unsicherheit_strom[index_mpp]
123   u_mpp = spannung[index_mpp]
124   u_mpp_unc = unsicherheit_spannung[index_mpp]

```

```

19
20     u_leerlauf_index = pd.Series.argmin(abs(strom))
21     u_leerlauf = spannung[u_leerlauf_index]
22     u_leerlauf_unc = unsicherheit_spannung[u_leerlauf_index]
23
24     i_kurzschluss_index = pd.Series.argmin(abs(spannung))
25     i_kurzschluss = strom[i_kurzschluss_index]
26     i_kurzschluss_unc = unsicherheit_strom[i_kurzschluss_index]
27
28     # if abs(i_kurzschluss) > 0:
29     #     ff = (i_mpp*u_mpp) / (i_kurzschluss*u_leerlauf)
30     #     ff_unc = ((i_mpp+i_mpp_unc)*(u_mpp+u_mpp_unc)) /
31     #                 ((i_kurzschluss+i_kurzschluss_unc)*(u_leerlauf+u_leerlauf_unc))
32     #     ff_unc = ff_unc - ff
33     #     print('ff:', ff)
34     #     print('ff_unc:', ff_unc)
35
36     wirkungsgrad = p_mpp / lichtleistung
37     lichtleistung_unc = 0.01 + unsicherheit_lichtleistung
38     wirkungsgrad_unc = p_mpp_unc / lichtleistung - p_mpp * lichtleistung_unc /
39     #                 lichtleistung**2
40
41     return (
42         p,
43         p_unc,
44         p_mpp,
45         p_mpp_unc,
46         i_mpp,
47         i_mpp_unc,
48         u_mpp,
49         u_mpp_unc,
50         u_leerlauf,
51         u_leerlauf_unc,
52         i_kurzschluss,
53         i_kurzschluss_unc,
54         wirkungsgrad,
55         wirkungsgrad_unc,
56     )
57
58     # Fläche Thermoelement
59     d_thermozelle = 1.69
60     A_thermозelle = d_thermозelle**2 * np.pi / 4
61     A_unsicherheit = abs(np.pi * d_thermозelle * 0.002 / 2)
62
63     # Teil 2:
64     daten_hell400 = pd.read_csv("hell_400.csv", sep=",")
65     daten_hell1000 = pd.read_csv("hell_1000.csv", sep=",")
66     daten_dunkel = pd.read_csv("dunkelkennlinie.csv", sep=",")
67
68     # Hellkennlinie 400W
69     U_400 = daten_hell400.Spannung
70     uncert_U400 = U_400 * 0.020 + 300e-6
71
72     I_400 = daten_hell400.Strom
73     uncert_I400 = I_400 * 0.025 + 6e-6

```

```

74 parameter_hell400 = diodenparameter_2(U_400, I_400, uncert_U400, uncert_I400, 0.08972,
    ↵ 0.00002)
75
76 # Hellkennlinie 1000W
77 U_1000 = daten_hell1000.Spannung
78 uncert_U1000 = U_1000 * 0.020 + 300e-6
79
80 I_1000 = daten_hell1000.Strom
81 uncert_I1000 = I_1000 * 0.025 + 6e-6
82 parameter_hell1000 = diodenparameter_2(U_1000, I_1000, uncert_U1000, uncert_I1000, 0.2243,
    ↵ 0.0005)
83
84 # Dunkelkennlinie
85 U_d = daten_dunkel.Spannung
86 uncert_Ud = U_d * 0.020 + 300e-6
87
88 I_d = daten_dunkel.Strom
89 uncert_Id = I_d * 0.025 + 6e-6
90 parameter_d = diodenparameter_2(U_d, I_d, uncert_Ud, uncert_Id, 0.1, 0)
91
92 print(parameter_hell400[3])
93 print(parameter_hell1000[3])
94 print(parameter_d[3])
95
96 # p, p_unc, p_mpp, p_mpp_unc, i_mpp, i_mpp_unc, u_mpp, u_mpp_unc, u_leerlauf,
    ↵ u_leerlauf_unc, i_kurzschluss,
    ↵ # i_kurzschluss_unc, ff, ff_unc, wirkungsgrad, wirkungsgrad_unc
97
98 # PLOT
99 fig_task2, (ax_UI, ax_PU) = plt.subplots(1, 2)
100 fig_task2.set_figwidth(10)
101 plt.subplots_adjust(wspace=0.5)
102
103 # Kennlinienfeld
104 ax_UI.set_ylim([-0.5, 0.5])
105 ax_UI.set_xlim([-1, 1])
106 ax_UI.set_title("Kennlinienfeld")
107 ax_UI.set_xlabel("U / [V]")
108 ax_UI.set_ylabel("I / [mA]")
109 ax_UI.plot([-1, 1], [0, 0], color="k")
110 ax_UI.plot([0, 0], [-0.5, 0.5], color="k")
111 ax_UI.plot(U_400, I_400, color="C1", label="400 W/m²")
112 ax_UI.plot(U_1000, I_1000, color="C3", label="1000 W/m²")
113 ax_UI.plot(U_d, I_d, color="C9", label="~0 W/m²")
114 ax_UI.legend(loc="lower right")
115 ax_UI.errorbar(0, parameter_hell1000[10], yerr=parameter_hell1000[11], color="y",
    ↵ marker="o") # Kurzschlussstrom
116 ax_UI.errorbar(0, parameter_hell400[10], yerr=parameter_hell400[11], color="y", marker="o")
117 ax_UI.errorbar(0, parameter_d[10], yerr=parameter_d[11], color="m", marker="o")
118 ax_UI.errorbar(parameter_hell400[8], 0, xerr=parameter_hell400[9], color="b", marker="o") #
    ↵ Leerlaufspannung
119 ax_UI.errorbar(parameter_hell1000[8], 0, xerr=parameter_hell1000[9], color="b", marker="o")
120 ax_UI.errorbar(parameter_d[8], 0, xerr=parameter_d[9], color="orangered", marker="o")
121 # Leistungskurve
122 ax_PU.set_ylim([0, -0.1])
123 ax_PU.set_xlim([0, 1])
124 ax_PU.set_title("Leistungskurven")
125 ax_PU.set_xlabel("U / [V]")
126 ax_PU.set_ylabel("P / [W]")

```

```
127 ax_PU.errorbar(U_400, parameter_hell400[0], xerr=uncert_U400, yerr=parameter_hell400[1],  
128     ↪ color="C1", label="400 W/m2")  
129 ax_PU.errorbar(  
130     U_1000, parameter_hell1000[0], xerr=uncert_U1000, yerr=parameter_hell1000[1],  
131     ↪ color="C3", label="1000 W/m2"  
132 )  
133 ax_PU.errorbar(U_d, parameter_d[0], yerr=parameter_d[1], color="C9")  
134 ax_PU.legend(loc="lower right", bbox_to_anchor=(1.2, 0))  
135 ax_PU.errorbar(  
136     parameter_hell400[6],  
137     parameter_hell400[2],  
138     xerr=parameter_hell400[7],  
139     yerr=parameter_hell400[3],  
140     color="k",  
141     marker="o",  
142 ) # u_mpp/p_mpp  
143 ax_PU.errorbar(  
144     parameter_hell1000[6],  
145     parameter_hell1000[2],  
146     xerr=parameter_hell1000[7],  
147     yerr=parameter_hell1000[3],  
148     color="k",  
149     marker="o",  
150 )  
151 ax_PU.errorbar(parameter_d[6], parameter_d[2], xerr=parameter_d[7], yerr=parameter_d[3],  
152     ↪ color="k", marker="o")  
fig_task2.show()  
fig_task2.savefig("PV_Task2.png")
```