



**NAWI**  
**Graz**



Institut für Physik der Universität Graz

# Fortgeschrittenenpraktikum

## 2

Übungsnummer: PHY.L02UB

Übungstitel: Wirkungsgrad

Betreuer: Boné, Thomas Georg

Gruppennummer: 20A

Name: PHILIPP Maximilian

Name: STARK Matthias

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 8 März

SS 23

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung . . . . .	4
1.1	Wärmepumpe . . . . .	4
1.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	4
1.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	4
2	Grundlagen . . . . .	5
2.1	Wärmepumpe . . . . .	5
2.2	Solarzelle . . . . .	7
3	Versuchsanordnung . . . . .	10
3.1	Wärmepumpe . . . . .	10
3.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	12
3.2.1	Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird . . . . .	14
3.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	15
4	Geräteliste . . . . .	16
5	Versuchsdurchführung und Messergebnisse . . . . .	17
5.1	Wärmepumpe . . . . .	17
5.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	20
5.2.1	Serienschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	20
5.2.2	Parallelschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	20
5.2.3	Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird . . . . .	23
5.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	24
5.3.1	Messung der Dunkelkennlinie . . . . .	24
5.3.2	Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades . . . . .	25
6	Auswertung . . . . .	27
6.1	Wärmepumpe . . . . .	27
6.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	29
6.2.1	Serienschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	30
6.2.2	Parallelschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	31
6.2.3	Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird . . . . .	32
6.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	32
6.3.1	Messung der Dunkelkennlinie . . . . .	33
6.3.2	Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades . . . . .	34
7	Diskussion . . . . .	36
7.1	Wärmepumpe . . . . .	36
7.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	37
7.2.1	Serienschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	37

7.2.2	Parallelschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	38
7.2.3	Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird . . . . .	38
7.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	38
8	Zusammenfassung . . . . .	38
8.1	Wärmepumpe . . . . .	39
8.2	Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung . . . . .	39
8.2.1	Serienschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	39
8.2.2	Parallelschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	40
8.2.3	Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird . . . . .	40
8.3	Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle . . . . .	40

## 1 Aufgabenstellung

### 1.1 Wärmepumpe

- Messung des Temperaturverlaufes in zwei Wasserbehältern und der Drücke nach Kompression bzw. Expansion im Kältemittelkreislauf über 1 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

### 1.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Die Kennlinie des Solarzellenmoduls  $I(U)$  ist bei kontanter Temperatur aufzunehmen. Weiters sind ein  $I(U)$ - und ein  $P(U)$ -Diagramm zu erstellen. Auch werden die Kenndaten Leerlaufspannung ( $U_L$ ), Kurzschlussstrom ( $I_K$ ), sowie am Betriebspunkt maximaler Leistung (MPP) die Spannung ( $U_{MPP}$ ), den Strom ( $I_{MPP}$ ), die Leistung ( $P_{MPP}$ ) und schließlich der Füllfaktor  $FF$  bestimmt.

Dies wird für folgende Schaltungen durchgeführt:

- Serienschaltung der beiden Solarzellen
- Parallelschaltung der beiden Solarzellen
- Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird

### 1.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Gegeben sind eine einzelne Solarzelle, Lampen als Lichtquelle, ein Leistungsmessgerät, sowie ein Quellenmessgerät (Sourcemeter) zur automatisierten Messung der Kennlinie.

Damit werden folgende Schritte durchgeführt:

- Messung der Dunkelkennlinie: An der einzelnen, abgedeckten Solarzelle wird mit Hilfe des Sourceters automatisiert die Kennlinie aufgenommen. Der  $I(U)$ -Verlauf ist mit der gegebenen Formel zu fitten und die Parameter der Diode sind zu bestimmen.

- Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades: Die einzelne Solarzelle wird mit Hilfe der Lampen bestrahlt. Aus den aufgenommenen Kennlinien werden die Diodenparameter, sowie im Punkt der maximalen Leistung (MPP) die Wirkungsgrade ermittelt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist ein Gerät, das Wärmeenergie von einem Ort zum anderen überträgt. Sie wird sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke eingesetzt und basiert auf den Prinzipien der Thermodynamik.

Im Kühlbetrieb nimmt eine Wärmepumpe Wärme aus dem Innenraum auf und gibt sie nach außen ab. Im Heizbetrieb arbeitet sie umgekehrt, indem sie der Außenluft, dem Boden oder dem Wasser Wärme entzieht und an die Innenräume abgibt. Dies macht eine effiziente Möglichkeit, ein Gebäude zu heizen oder zu kühlen, da weniger Energie benötigt wird, um Wärme zu übertragen, als diese zu erzeugen.

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird durch ihre Leistungszahl  $\epsilon$  (COP) gemessen. Die Leistungszahl ist das Verhältnis zwischen der übertragenen Wärmemenge und der von der Wärmepumpe verbrauchten Energie. Eine höherer Leistungszahl bedeutet eine effizientere Wärmepumpe, da sie mehr Wärmeenergie für die gleiche Energiemenge übertragen kann.

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{P_{el}} \quad (1)$$

Wobei  $\dot{Q}$  der durch die Wärmepumpe verursachte Wärmefluss und  $P_{el}$  die benötigte Leistung ist, um die Wärmepumpe zu betreiben. Nun lässt sich der Gütegrad mittels der Leistungszahl definieren, sie ist die Kenngröße der Güte indem sie das Verhältnis der erhaltene Leistungszahl  $\epsilon$  zu der theoretisch Maximalen  $\epsilon_{\max} = \frac{T_h}{T_h - T_k}$  angibt.

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{\max}} \quad (2)$$

Der Kältekreislauf ist ein thermodynamischer Prozess der von einer Wärmepumpe durchgeführt wird. Dieser Prozess entzieht Wärme aus einer Umgebung mit niedriger Temperatur und gibt sie an eine Umgebung mit hoher Temperatur ab. Das p-H Diagramm des Kreisprozesses ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Prozess wird in Kältesystemen wie Klimaanlagen und Kühlschränken verwendet.

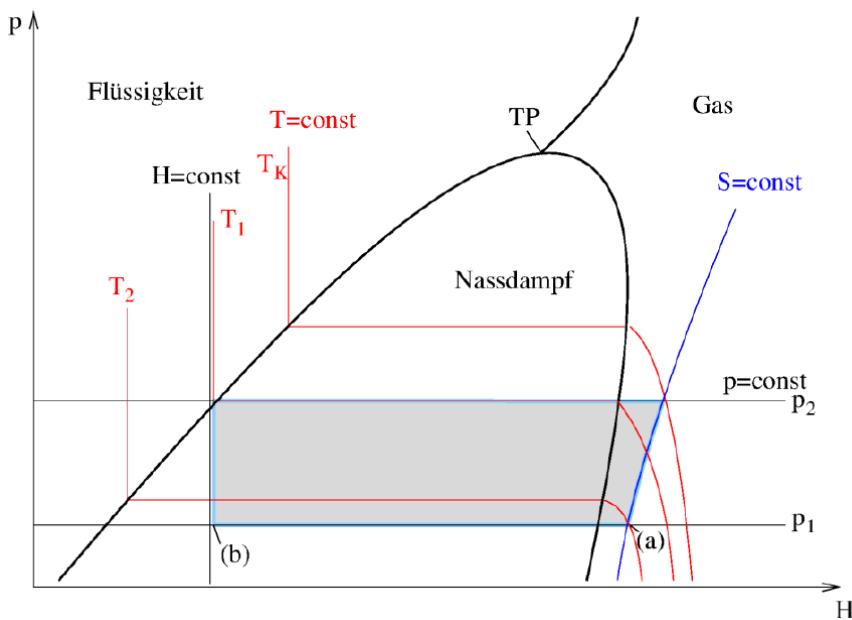


Abbildung 1: p-H Diagramm des Kreisprozesses [3]

Der Kältekreislauf besteht aus vier Hauptstufen [3]:

1. Isentrope Verdichtung: Das Kältemittel wird durch einen Kompressor komprimiert, wodurch Druck und Temperatur erhöht werden. Diese Stufe wird durch eine Linie dargestellt, die von niedrigem Druck und niedriger Enthalpie zu hohem Druck und hoher Enthalpie isentrop verläuft.
2. Isobare Kondensation: Das unter hohem Druck stehende und auf hohe Temperatur gebrachte Kältemittel wird in einem Verflüssiger abgekühlt, wo es Wärme abgibt und zu einer Flüssigkeit kondensiert. Diese Stufe wird durch eine horizontale Linie dargestellt, die von hoher Enthalpie zu niedriger Enthalpie verläuft, während der Druck konstant bleibt.
3. Isenthalpe Drosselung: Das flüssige Kältemittel wird durch ein Expansionsventil geleitet, wo sein Druck verringert wird, wodurch es zu einem Gas mit niedrigem Druck verdampft. Diese Stufe wird durch eine Linie dargestellt, die bei konstanter Enthalpie verläuft, während der Druck abnimmt.
4. Isobare Verdampfung: Das Niederdruck-Kältemittel absorbiert Wärme beim Verdampfer aus der Umgebung, die es kühlen soll, und kehrt zum Kompressor zurück, um den Kreislauf erneut zu starten. Diese Phase wird durch eine Linie dargestellt, die von niedriger Enthalpie zu hoher Enthalpie verläuft, während der Druck konstant bleibt.

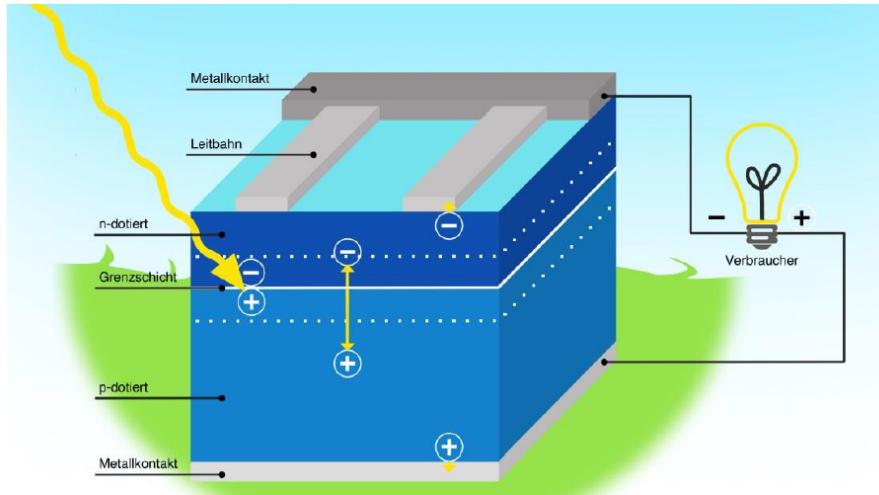
## 2.2 Solarzelle

Eine Solarzelle, die auch als photovoltaische Zelle bezeichnet wird, wandelt Sonnenlicht durch den Photoeffekt in elektrische Energie um. Der Photoeffekt ist das Phänomen, bei dem ein Material Photonen (Lichtteilchen) absorbiert und freie Elektronen und Löcher erzeugt, die zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt werden können.

Die Grundstruktur einer Solarzelle besteht aus einer dünnen Halbleiterschicht, die in der Regel aus Silizium besteht. Diese Halbleiterschicht befindet sich zwischen zwei Metallkontakte, von denen einer auf der Ober- und einer auf der Unterseite liegt. Wenn Sonnenlicht auf die Halbleiterschicht fällt, werden die Photonen des Sonnenlichts von dem Halbleitermaterial absorbiert. Dies führt dazu, dass einige der Elektronen im Material angeregt werden und auf ein höheres Energieniveau springen, wobei ein "Loch" im Material zurückbleibt, wo das Elektron vorher war.

Die angeregten Elektronen und die durch die absorbierten Photonen entstandenen Löcher werden dann durch das elektrische Feld getrennt, das durch den Übergang zwischen den beiden Schichten des Halbleiters entsteht. Dieses elektrische Feld wird durch Dotierung des Halbleiters mit Verunreinigungen erzeugt, um einen p-n-Übergang zu schaffen. Die p-Typ-Halbleiterschicht hat einen Überschuss an positiv geladenen Löchern, während die n-Typ-Schicht einen Überschuss an negativ geladenen Elektronen hat.

Die angeregten Elektronen werden in Richtung der n-Typ-Schicht gezogen, während die Löcher in Richtung der p-Typ-Schicht gezogen werden. Durch diese Ladungstrennung entsteht eine Spannungsdifferenz über der Halbleiterschicht, die zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt werden kann. Die schematische Funktionsweise der Solarzelle ist in folgender Abbildung 2 ersichtlich.



**Abbildung 2:** Schematische Funktionsweise der Solarzelle [4]

Die Shockley-Gleichung beschreibt die Beziehung zwischen dem Stromdurchsatz einer Diode und der an ihr anliegenden Spannung. Da eine Solarzelle nichts anderes als eine Diode ist, gilt dieses Gesetz auch in diesem Fall. Die Shockley-Gleichung kann verwendet werden, um die Diodenkennlinie einer Solarzelle anzupassen und wichtige Parameter wie den Fotostrom, den Sättigungsrückstrom und den Idealitätsfaktor zu ermitteln. Diese Informationen sind nützlich, um die Leistung einer Solarzelle zu bewerten und ihr Design für eine maximale Effizienz zu optimieren.

Aus der Shockley-Gleichung geht unter Berücksichtigung der parasitären Widerstände die Gleichung 3 für den gemessenen Strom  $I$  hervor. Berücksichtigt man, dass in der Solarzelle Dotierungsschwankungen vorherrschen, bezeichnet das Zweidiodenmodell aus Gleichung 4 eher das tatsächliche Verhalten.

$$I = I_{S1} \left( e^{\frac{e(U - IR_s)}{f_1 k_B T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{(U - IR_s)}{R_p} \quad (3)$$

$$I = I_{S1} \left( e^{\frac{e(U - IR_s)}{f_1 k_B T}} - 1 \right) + I_{S2} \left( e^{\frac{e(U - IR_s)}{f_2 k_B T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{(U - IR_s)}{R_p} \quad (4)$$

$I_{S1}$  bzw.  $I_{S2}$  bezeichnet dabei den Sättigungsstrom,  $U$  die gemessene Spannung,  $R_s$  den Serienwiderstand,  $R_p$  den Parallelwiderstand,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante,  $e$  die Elementarladung,  $T$  die absolute Temperatur,  $I_{ph}$  den Betrag des Photostroms und  $f_1$  bzw.  $f_2$  die Diodenfaktoren zur Anpassung.

Die Diodenkennlinie einer Solarzelle kann zur Bewertung und Charakterisierung der Leistung der Zelle verwendet werden. Durch die Analyse der Diodenkennlinie können die folgenden Schlüsselparameter der Solarzelle nach den folgenden Formeln bestimmt werden:

1. Leerlaufspannung ( $U_L$ ): Dies ist die Spannung, bei der die Solarzelle keinen Strom erzeugt, und entspricht der maximalen Ausgangsspannung der Zelle. Die Leerlaufspannung wird durch die Beleuchtungsstärke und die intrinsischen Eigenschaften der Zelle bestimmt.
2. Kurzschlussstrom ( $I_k$ ): Dies ist der Strom, der von der Solarzelle erzeugt wird, wenn die Spannung über der Zelle gleich Null ist, und entspricht der maximalen Stromabgabe der Zelle. Der Kurzschlussstrom wird durch die Beleuchtungsstärke und die physikalischen Eigenschaften der Zelle bestimmt.
3. Füllfaktor ( $FF$ ): Er ist ein Maß für den Wirkungsgrad der Solarzelle und wird durch das Verhältnis zwischen der maximalen Ausgangsleistung der Zelle und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bestimmt. Der Füllfaktor wird von den physikalischen Eigenschaften der Zelle, wie der Rekombinationsrate und dem Serien- und Nebenschlusswiderstand, beeinflusst.
4. Maximaler Leistungspunkt (MPP): Dies ist der Punkt auf der Diodenkennlinie, an dem die Solarzelle die maximale Leistung abgibt. Der Punkt maximaler Leistung wird von der Beleuchtungsstärke und den physikalischen Eigenschaften der Zelle beeinflusst.

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

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

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

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

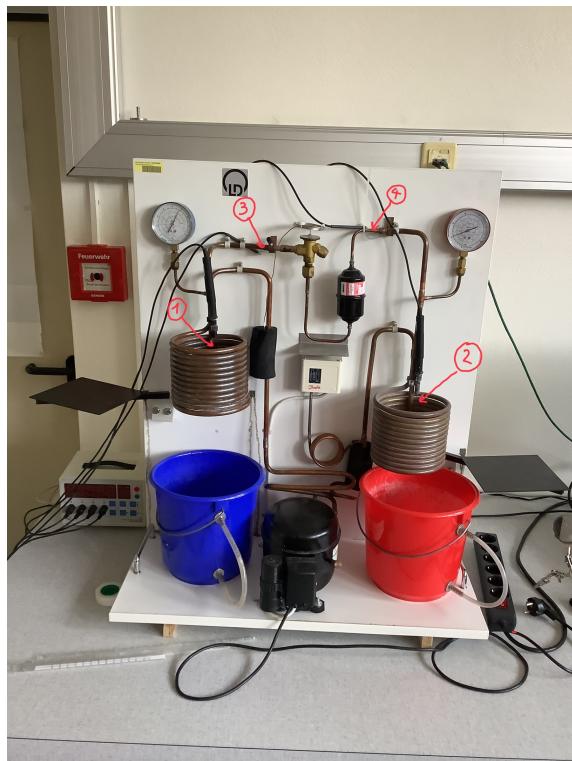
$U_{\max}$  bezeichnet dabei die Spannung beim Punkt maximaler Leistung,  $I_{\max}$  die Stromstärke beim Punkt maximaler Leistung,  $\eta$  den entsprechenden Wirkungsgrad,  $P_{\text{Licht}}$  die gemessene Leistung am Strahlungsmessgerät,  $A$  die aktive Fläche der Solarzelle,  $I_{\text{Licht}}$  die Lichtintensität der Lampe,  $P_{\text{mess}}$  die gemessene Leistung am Strahlungsmessgerät und  $A_{\text{mess}}$  die Fläche des Leistungsmessgeräts.

Durch die Auswertung und Analyse dieser Schlüsselparameter kann die Diodenkennlinie wertvolle Erkenntnisse über die Leistung einer Solarzelle liefern. Diese Informationen können dazu genutzt werden, das Design der Solarzelle zu optimieren und ihren Wirkungsgrad und ihre Leistung zu verbessern [4].

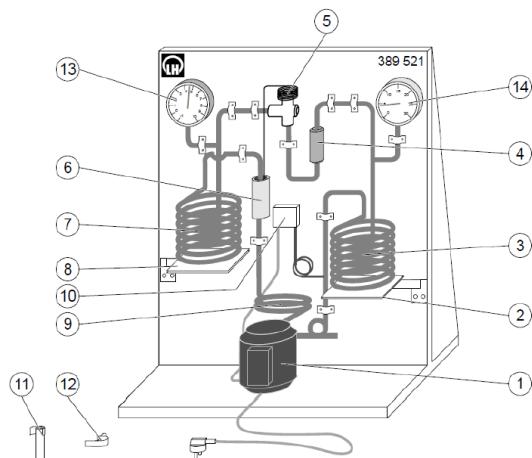
### 3 Versuchsanordnung

#### 3.1 Wärmepumpe

Der reale Versuchsaufbau, Abbildung 3, sowie eine schematische Skizze dessen, Abbildung 4, sind im folgenden sichtbar.



**Abbildung 3:** Versuchsaufbau der Wärmepumpe, am Bild markiert sind die Kanäle, mit denen die entsprechenden Temperatursensoren verbunden sind



**Abbildung 4:** Skizze des Versuchsaufbaus der Wärmepumpe [3, text].

- 1 ...Kompressor 230 V; 50/60 Hz. Leistungsaufnahme ca. 130 W bei 50 Hz
- 2 ...ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter
- 3 ...Verflüssiger
- 4 ...Sammel/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 für Temperaturmessungen an den Kupferrohren des Kältemittelkreislaufs
- 13 ...Manometer für die Niederdruckseite; innere Skala für Druckmessung von -1...+10 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R134a von -60 °C bis +40 °C
- 14 ...Manometer für die Hochdruckseite; innere Skala: Druck von -1...+30 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R 134a von -60 °C bis +85°C.

Die Temperatursensoren werden mit dem Temperaturmessgerät, wie in Abbildung 3 sichtbar, verbunden. Das Temperaturmessgerät wird über die USB-Schnittstelle mit den Rechner verbunden, um eine Auswertung mit der Software Cassy Lab2 zu ermöglichen.

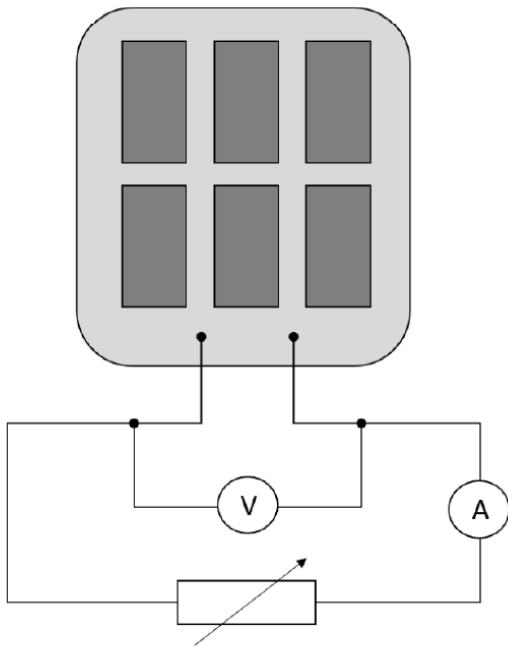
Weil der Temperatursensor im kälteren Behälter laufend zur Spule gerutscht ist und dies die Messung verfälschen würde, wurde er mit einem Stück Lötzinn gegen Verrutschen gesichert, wie in Abbildung 5 sichtbar.



**Abbildung 5:** Sicherung gegen Verrutschen des Temperatursensors

### 3.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Um die Kennlinie der Solarzelle zu bestimmen wird diese, der jeweiligen Schaltung entsprechend, an einen verstellbaren Widerstand geschlossen. Damit Messwerte generiert werden können, werden auch ein Ampermeter, sowie ein Voltmeter nach dem Schaltplan in Abbildung 6 in die Schaltung integriert. Bei den Messgeräten muss darauf geachtet werden, einen geeigneten Messbereich zu wählen.

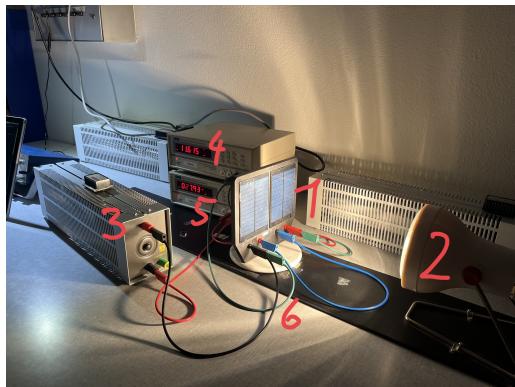


**Abbildung 6:** Schaltplan der Solarzelle [4]

A ...Amperemeter

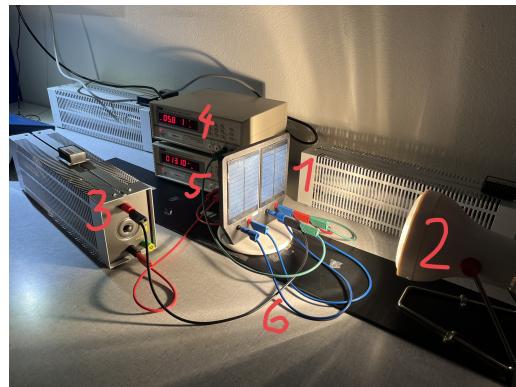
V ...Voltmeter

Die folgenden Abbildungen zeigen die Serienschaltung, Abbildung 7, sowie die Parallelschaltung, Abbildung 8. Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, wird bei den verwendeten Kabeln auf die Farbe geachtet.



**Abbildung 7:** Serienschaltung der beiden Solarzellen

- 1 ...Solarzellenmodule
- 2 ...Lampe
- 3 ...regelbarer Widerstand
- 4 ...Voltmeter
- 5 ...Amperemeter
- 6 ...entsprechende Verkabelung für Serienschaltung



**Abbildung 8:** Parallelschaltung der beiden Solarzellen

- 1 ...Solarzellenmodule
- 2 ...Lampe
- 3 ...regelbarer Widerstand
- 4 ...Voltmeter
- 5 ...Amperemeter
- 6 ...entsprechende Verkabelung für Parallelschaltung

### 3.2.1 Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird

Um die partielle Abschattung einer Solarzelle zu simulieren, wird ein Stück Papier über einen Teil der ersten Solarzelle gelegt. Um sicherzustellen, dass das Papier sich nicht von der Solarzelle löst, wird dieses mit Klebeband gegen verrutschen gesichert. Dabei wird darauf geachtet, dass das Klebeband nur am Plastikrahmen festgeklebt wird, damit keine Kleberückstände auf der Solarzelle zurückbleiben. Die Abdunkelung ist in Abbildung 9 sichtbar.



**Abbildung 9:** Partielle Beschattung einer Solarzelle

### 3.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Um den Diodenparameter, sowie den Wirkungsgrad der Solarzelle zu bestimmen, wird diese auf den entsprechenden Kupferbock zur Kühlung gelegt. Der Sensor wird neben die Solarzelle positioniert und mit einem Block unterlegt, damit sich der Sensor auf der gleichen Höhe, wie die Solarzelle befindet.

Um die Diodenkennlinie aufzuzeichnen wird das Keithley 2450 also Sourcemeter verwendet. Dieses wird über eine USB Schnittstelle mit dem Rechner verbunden. Um den Fehler bei der Spannungsmessung möglichst gering zu halten, wird die Solarzelle mit 4 Kabeln mit dem Sourcemeter verbunden, wobei 2 der Sense-Leitung entsprechen.

Weil der Sonnensimulator leider kaputt war wurden als Lichtquelle eine höhenverstellbare Halogenlampe, sowie eine LED Beleuchtung verwendet. Aus Neugierde wurde der Versuch für 2 verschiedene Abstände der Halogenlampe und einmal für die LED Beleuchtung durchgeführt. Bei der Position der Lampe muss darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen der Lampe und der Solarzelle oder dem Sensor konstant gehalten werden soll. Auch wird sichergestellt, dass die Lichtquelle immer

ober dem Objekt zentriert wird. Um Störlicht von der Umgebung zu vermeiden, wird der Versuch bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung und geschlossenen Türen durchgeführt, um sicherzustellen, dass nur das gewünschte Licht von der, zu untersuchenden Lichtquelle auf den Sensor oder die Solarzelle trifft.

## 4 Geräte liste

Für die Wärmepumpe werden die in Tabelle 1 aufgelisteten Geräte verwendet.

**Tabelle 1:** Verwendete Geräte für die Wärmepumpe

Gerätetyp	Hersteller	Typ	Inventar-Nr	Anmerkung
Wärmepumpe	LD			
Kompressor	Danfoss	TL3G	AA6HA100	(118 ± 2) W
Druckwächter	Danfoss			
Sammler	UL	16H5	023Z4566	
Temperaturfühler		Ni Cr-Ni		4x
Barometer	ITE	823-BC-1.0/447		für warm
Barometer	ITE	825-BC-1.0/447		für kalt
Temperatormessgerät	LD	666209	TOP0000252	mit 4 Anschlüssen
Computersoftware	Cassy Lab 2			
Messbecher	Vit Lab	2 Liter		
Eimer				2x mit Schlauch
Verbindungskabel				
Glasstab				zum Umrühren

Für die beiden Versuche mit den Solarzellen werden die in Tabelle 2 aufgelisteten Geräte verwendet.

**Tabelle 2:** Verwendete Geräte für die beiden Solarzellen Versuche

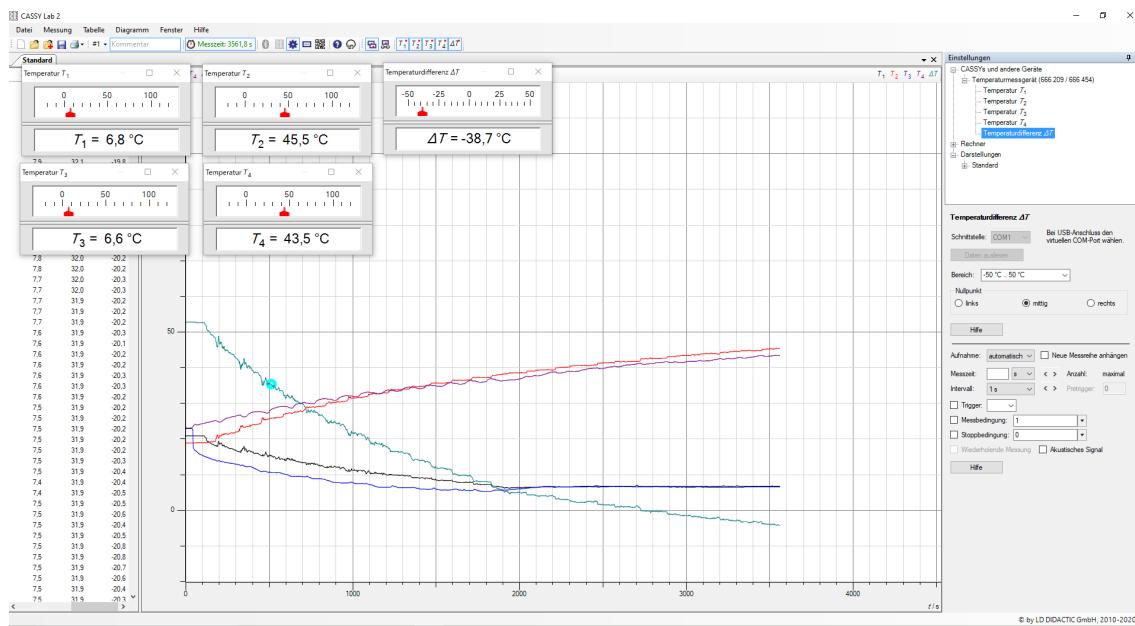
Gerätetyp	Hersteller	Typ	Inventar-Nr	Anmerkung
Solarzellenmodul				2x $(10,0 \pm 0,2)$ cm · $(8,0 \pm 0,2)$ cm
Radium-Lampe		PAR 38-EC		
Verstellbarer Widerstand	ARCOL	VRH 320	CEI 1010-1	
Voltmeter	TTI	1604	TMM-07	
Amperemeter	TTI	1604	TMM-11	
Bananenstecker				
Papier				zum Verdecken
Rollmeter	Schuller	3 m		für Distanzmessung
Solarzellenmodul				
Leistungssensor[2]	Spectra Physics	407A	2775	
Leistungsmessgerät[2]	Spectra Physics	407A	310041630000	
Sourcemeter[1]	Keithley	2450 S	300032370000	
Computersoftware	Kickstart			
Halogenlampe	Osram	24V 150W	HL% 64640	
LED-lampe	Hansa	41-5010.608		

## 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

### 5.1 Wärmepumpe

Zunächst werden beide Kübel mit  $(4000 \pm 40)$  mL Wasser gefüllt. Um diese möglichst genau zu bewerkstelligen, wird ein Messbecher verwendet. Die Kübel werden auf die dafür vorgesehenen Halterungen gestellt und überprüft, ob die Wendeln mit Wasser bedeckt sind. Um die Zirkulationen während des Prozesses besser zu unterstützen wird regelmäßig umgerührt. Zusätzlich ist an den Kübeln ein Schlauch befestigt, um den Wasserfluss zwischen Boden und oberen Bereich des Eimers zu unterstützen.

Um alle 4 Temperaturmessungen gleichzeitig zu erfassen, wird die Software Cassy Lab2 verwendet. Nachdem das Temperaturmessgerät unter dem Fenster "Einstellungen anzeigen" verbunden wurde, muss sichergestellt werden, dass die geforderten Temperaturwerte erfasst und während des Messvorgangs geplottet werden. Das entsprechende Interface ist in Abbildung 10 sichtbar.



**Abbildung 10:** sichtbares Interface

Nun wird der Kompressor ( $(118 \pm 2)$  W) an den Strom angeschlossen und gleichzeitig die Aufzeichnung der Daten über den entsprechenden Knopf gestartet. Zusätzlich zur Temperaturmessung werden ca. im 2 Minuten-Takt die Drücke von den entsprechenden Barometern abgelesen, was in folgender Tabelle 3 sichtbar ist. Um sicherzustellen, dass die Drücke die richtige Zeit zugeordnet bekommen, werden Fotos von den Barometern gemacht und mithilfe der erfassten Metadaten des Smartphones die genaue Zeit notiert.

**Tabelle 3:** Abgelesene Drücke bei der entsprechenden Zeit  
 $t$  ...vergangene Zeit seit dem Start des Messvorgangs in s  
 $p_k$  ...abgelesener Druck auf der kalten Seite in bar  
 $p_w$  ...abgelesener Druck auf der heißen Seite in bar

$t$ / s	$p_k$ / bar	$p_w$ / bar
$0 \pm 2$	$3,20 \pm 0,10$	$6,60 \pm 0,10$
$115 \pm 2$	$3,20 \pm 0,10$	$7,00 \pm 0,10$
$248 \pm 2$	$3,10 \pm 0,10$	$7,70 \pm 0,10$
$383 \pm 2$	$2,65 \pm 0,10$	$8,20 \pm 0,10$
$520 \pm 2$	$2,60 \pm 0,10$	$8,60 \pm 0,10$
$650 \pm 2$	$2,40 \pm 0,10$	$9,00 \pm 0,10$
$777 \pm 2$	$2,50 \pm 0,10$	$9,50 \pm 0,10$
$909 \pm 2$	$2,10 \pm 0,10$	$9,80 \pm 0,10$
$1034 \pm 2$	$2,05 \pm 0,10$	$10,20 \pm 0,10$
$1156 \pm 2$	$1,90 \pm 0,10$	$10,45 \pm 0,10$
$1280 \pm 2$	$1,90 \pm 0,10$	$10,80 \pm 0,10$
$1403 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$11,00 \pm 0,10$
$1530 \pm 2$	$1,75 \pm 0,10$	$11,40 \pm 0,10$
$1650 \pm 2$	$1,75 \pm 0,10$	$11,60 \pm 0,10$
$1770 \pm 2$	$1,70 \pm 0,10$	$11,80 \pm 0,10$
$1915 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$11,75 \pm 0,10$
$2035 \pm 2$	$1,90 \pm 0,10$	$12,20 \pm 0,10$
$2156 \pm 2$	$1,90 \pm 0,10$	$12,80 \pm 0,10$
$2278 \pm 2$	$1,90 \pm 0,10$	$12,50 \pm 0,10$
$2408 \pm 2$	$1,85 \pm 0,10$	$13,40 \pm 0,10$
$2531 \pm 2$	$1,85 \pm 0,10$	$13,20 \pm 0,10$
$2653 \pm 2$	$1,85 \pm 0,10$	$13,90 \pm 0,10$
$2779 \pm 2$	$1,85 \pm 0,10$	$14,00 \pm 0,10$
$2899 \pm 2$	$1,85 \pm 0,10$	$13,90 \pm 0,10$
$3022 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$14,30 \pm 0,10$
$3144 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$14,60 \pm 0,10$
$3264 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$14,80 \pm 0,10$
$3390 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$15,00 \pm 0,10$
$3513 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$15,00 \pm 0,10$
$3632 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$15,20 \pm 0,10$
$3753 \pm 2$	$1,80 \pm 0,10$	$15,60 \pm 0,10$

## 5.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Nachdem die Solarzelle und die Lampe, wie bereits in Abschnitt 3 sichtbar, aufgestellt sind, wird zunächst der Abstand zwischen diesen bestimmt. Dieser beträgt  $(284 \pm 5)$  mm. Die Unsicherheit ist so groß gewählt, weil sich vor der Lampe eine gekrümmte Glasplatte befindet, die die genaue Distanzmessung nicht erleichtert. Zusätzlich sei angemerkt, dass die genaue Distanz zwischen jener Glasplatte und der eigentlichen Glühbirne der Lampe nicht bekannt ist. Weiters fällt auf, dass die Solarzellen nicht genau Parallel zu der Lampe angeordnet sind. Für diese Verdrehung wird ein Winkel von  $(5,0 \pm 1,0)^\circ$  gemessen. Auf diese Verdrehung wird später in der Abschnitt 7 noch genauer eingegangen.

Zusätzlich wird auch die Größe eines Solarzellenmoduls gemessen um die Fläche bestimmen zu können. Der besseren Übersicht halber, werden diese Daten der Aufzählung in Abschnitt 5.2.3 beigelegt.

### 5.2.1 Serienschaltung der beiden Solarzellen

Zunächst werden die Solarzellenmodule, wie in Abbildung 7 sichtbar, in den Schaltplan integriert.

Nun wird der Widerstand mithilfe des, dafür vorgesehenen Reglers, variiert und die abgelesenen Werte der Messgeräte in folgender Tabelle 4 aufgelistet.

Zusätzlich werden noch die Werte bei Leerlauf und einem simulierten Kurzschluss gemessen. Dies geschieht, indem der Stromkreis zunächst geöffnet und dann ohne Widerstand geschlossen wird. Der besseren Übersicht halber, sind diese Werte auch in Tabelle 4 beigelegt.

### 5.2.2 Parallelschaltung der beiden Solarzellen

Auch bei der Parallelschaltung der beiden Solarzellen werden die Messwerte für den varierenden Widerstand und für den Leerlauf, sowie den Kurzschluss, von den Geräten abgelesen und in Tabelle 5 aufgelistet.

**Tabelle 4:** Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Serienschaltung der Solarzellenmodule

$U$  ...Abgelesener Wert der Spannung in V

$I$  ...Abgelesener Wert des Stroms in mA

$U$ / V	$I$ / mA
12,03 $\pm$ 0,03	0,000 $\pm$ 0,003
11,88 $\pm$ 0,02	12,18 $\pm$ 0,13
11,83 $\pm$ 0,02	14,14 $\pm$ 0,15
11,76 $\pm$ 0,02	16,36 $\pm$ 0,17
11,72 $\pm$ 0,02	18,08 $\pm$ 0,19
11,66 $\pm$ 0,02	20,5 $\pm$ 0,3
11,60 $\pm$ 0,02	23,0 $\pm$ 0,3
11,53 $\pm$ 0,02	25,8 $\pm$ 0,3
11,46 $\pm$ 0,02	28,9 $\pm$ 0,3
11,39 $\pm$ 0,02	31,9 $\pm$ 0,4
11,34 $\pm$ 0,02	33,8 $\pm$ 0,4
11,280 $\pm$ 0,019	35,9 $\pm$ 0,4
11,240 $\pm$ 0,019	37,5 $\pm$ 0,4
11,190 $\pm$ 0,019	39,5 $\pm$ 0,4
11,140 $\pm$ 0,019	41,0 $\pm$ 0,5
11,090 $\pm$ 0,019	43,0 $\pm$ 0,5
11,040 $\pm$ 0,019	44,6 $\pm$ 0,5
10,990 $\pm$ 0,019	46,2 $\pm$ 0,5
10,930 $\pm$ 0,019	48,1 $\pm$ 0,5
10,890 $\pm$ 0,019	49,6 $\pm$ 0,5
10,810 $\pm$ 0,019	52,1 $\pm$ 0,6
10,730 $\pm$ 0,019	54,6 $\pm$ 0,6
10,660 $\pm$ 0,018	56,3 $\pm$ 0,6
10,570 $\pm$ 0,018	58,9 $\pm$ 0,6
10,480 $\pm$ 0,018	61,2 $\pm$ 0,7
10,320 $\pm$ 0,018	65,0 $\pm$ 0,7
10,120 $\pm$ 0,018	67,8 $\pm$ 0,7
9,730 $\pm$ 0,017	69,8 $\pm$ 0,8
9,680 $\pm$ 0,017	70,3 $\pm$ 0,8
7,870 $\pm$ 0,014	71,4 $\pm$ 0,8
5,680 $\pm$ 0,011	72,3 $\pm$ 0,8
4,140 $\pm$ 0,009	73,4 $\pm$ 0,8
2,880 $\pm$ 0,007	75,2 $\pm$ 0,8
0,000 $\pm$ 0,002	76,6 $\pm$ 0,8

**Tabelle 5:** Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Parallelschaltung der Solarzellenmodule

$U$  ...Abgelesener Wert der Spannung in V

$I$  ...Abgelesener Wert des Stroms in mA

$U$ / V	$I$ / mA
5,760 ± 0,011	0,000 ± 0,003
5,840 ± 0,011	5,99 ± 0,07
5,830 ± 0,011	6,68 ± 0,07
5,820 ± 0,011	7,80 ± 0,09
5,810 ± 0,011	10,14 ± 0,11
5,800 ± 0,011	11,74 ± 0,13
5,770 ± 0,011	17,32 ± 0,18
5,750 ± 0,011	22,3 ± 0,3
5,720 ± 0,011	29,0 ± 0,3
5,700 ± 0,011	34,2 ± 0,4
5,670 ± 0,011	40,7 ± 0,5
5,640 ± 0,011	46,9 ± 0,5
5,620 ± 0,011	52,3 ± 0,6
5,560 ± 0,011	65,0 ± 0,7
5,510 ± 0,011	76,7 ± 0,8
5,470 ± 0,011	84,5 ± 0,9
5,410 ± 0,011	96 ± 1
5,340 ± 0,011	109,2 ± 1,1
5,28 ± 0,01	120,6 ± 1,3
5,19 ± 0,01	135,3 ± 1,4
5,04 ± 0,01	153,8 ± 1,6
4,660 ± 0,009	191 ± 2
4,550 ± 0,009	196 ± 2
4,170 ± 0,009	206 ± 3
3,620 ± 0,008	207 ± 3
3,090 ± 0,007	207 ± 3
2,510 ± 0,006	208 ± 3
1,680 ± 0,005	208 ± 3
1,080 ± 0,004	209 ± 3
0,330 ± 0,003	209 ± 3
0,000 ± 0,002	211 ± 3

### **5.2.3 Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird**

Zunächst wird die Größe vermessen, die durch das Blatt Papier verdeckt ist, wie in Abbildung 9 sichtbar. Die entsprechenden Maße sind gemeinsam mit den anfangs gemessenen Werten der Solarzelle in folgender Aufzählung angeführt.

1. Fläche ganz:  $(10,0 \pm 0,2) \text{ cm} \cdot (8,0 \pm 0,2) \text{ cm} = (80 \pm 3) \text{ cm}^2$
2. Fläche bedeckt:  $(10,0 \pm 0,2) \text{ cm} \cdot (7,0 \pm 0,2) \text{ cm} = (70 \pm 3) \text{ cm}^2$

Nun wird die gesamte Messung, wie bereits erklärt, für die verschiedenen Widerstände, den Leerlauf und den Kurzschluss durchgeführt und die Messwerte in Tabelle 6 aufgelistet.

**Tabelle 6:** Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Serienschaltung mit einem abgedeckten Solarzellenmodul

$U$  ...Abgelesener Wert der Spannung in V

$I$  ...Abgelesener Wert des Stroms in mA

$U$ / V	$I$ / mA
11,45 ± 0,02	0,000 ± 0,003
6,540 ± 0,012	6,68 ± 0,07
5,610 ± 0,011	6,79 ± 0,08
5,360 ± 0,011	6,84 ± 0,08
4,85 ± 0,01	6,92 ± 0,08
4,090 ± 0,009	7,02 ± 0,08
3,760 ± 0,008	7,04 ± 0,08
3,470 ± 0,008	7,06 ± 0,08
2,930 ± 0,007	7,11 ± 0,08
2,500 ± 0,006	7,14 ± 0,08
2,100 ± 0,006	7,20 ± 0,08
1,660 ± 0,005	7,30 ± 0,08
1,470 ± 0,005	7,34 ± 0,08
0,990 ± 0,004	7,44 ± 0,08
0,670 ± 0,004	7,55 ± 0,08
0,390 ± 0,003	7,63 ± 0,08
0,490 ± 0,003	7,68 ± 0,08
0,190 ± 0,003	7,69 ± 0,08
0,000 ± 0,002	7,65 ± 0,08

## 5.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

### 5.3.1 Messung der Dunkelkennlinie

Zunächst wird die Solarzelle komplett abgedunkelt. Dazu wird diese vollflächig mit einem Stück Papier abgedeckt. Zusätzlich wird dieses Papier mit einem schwereren Gegenstand beschwert, um dafür zu sorgen, dass die Solarzelle wirklich vollflächig abgedeckt ist.

Um die Diodenkennlinie aufzuzeichnen, wird das Sourcemeter mit dem Rechner verbunden und das Programm, Kickstart geöffnet. Nun wird in der entsprechenden Software unter dem Menüpunkt "new" eine neue Messung gestartet. Nach erfolgreicher Verbindung mit dem Sourcemeter 2450 und der eingabe aller Parameter, wie z.B. den Maximalen Strom, wie in den Unterlagen aus [4] beschrieben, kann die Messung gestartet werden. Die so erzeugte Diodenkennlinie ist in Abbildung 11 sichtbar.

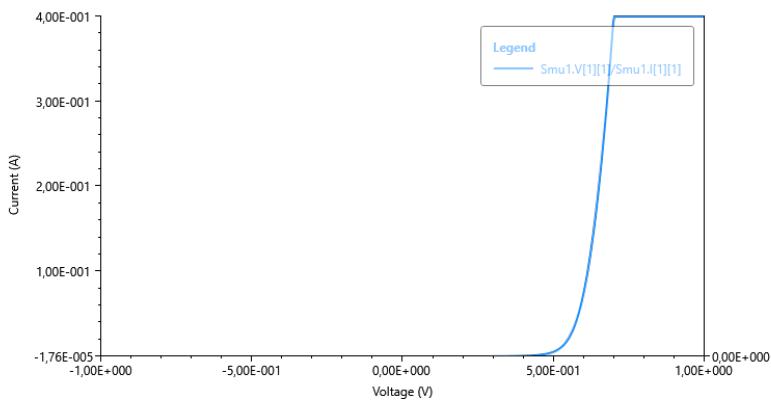
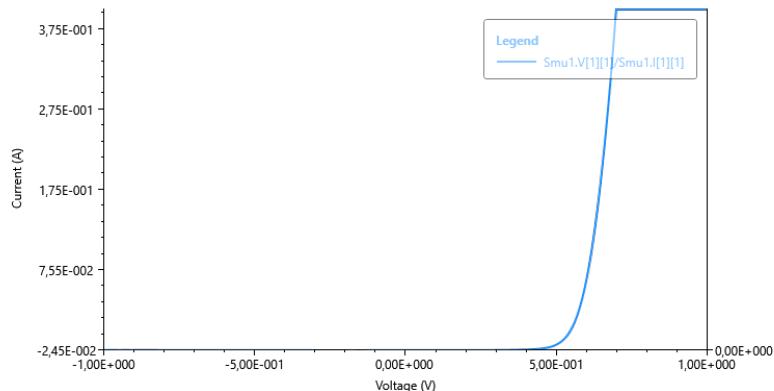


Abbildung 11: Erzeugte Dunkelkennlinie der Solarzelle

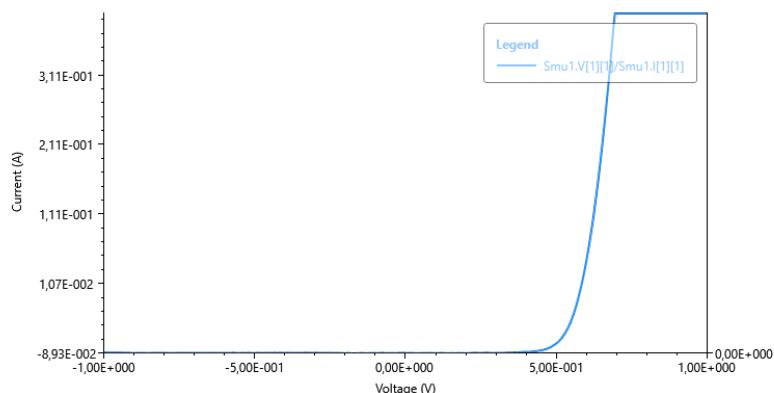
### 5.3.2 Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades

Nun werden die Lampen, wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben, positioniert und ebenfalls die Kennlinien aufgenommen. Die entsprechende Leistung der Lichtquelle wird anhand des Sensors bestimmt und vom analogen Messgerät abgelesen, was gemeinsam mit den entsprechenden Größen in folgender Aufzählung in Abschnitt 5.3.2 ersichtlich ist. Auch die Diodenkennlinien für die verschiedenen Lampen werden, wie zuvor die Dunkelkennlinie, aufgenommen und sind in den folgenden Abbildung 12 bis Abbildung 14 sichtbar.

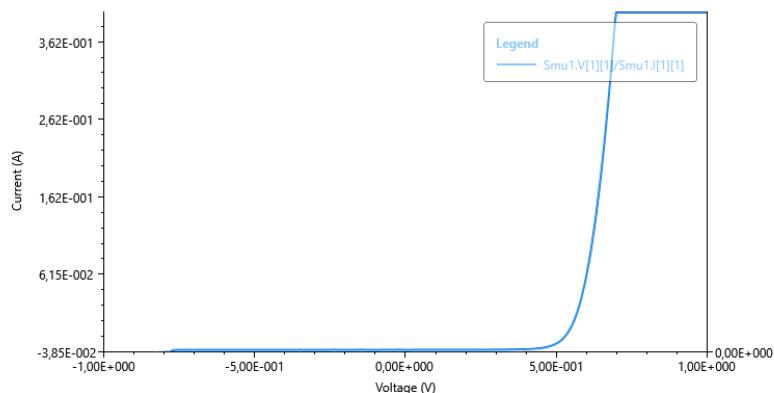
1. Durchmesser des Sensors:  $(1,80 \pm 0,05)$  cm[1]
2. Fläche der Solarzelle:  $(1,70 \pm 0,10)$  cm  $\cdot$   $(3,90 \pm 0,10)$  cm
3. Strahlungsfluss Lampe Messung 1:  $(63 \pm 2)$  mW
4. Strahlungsfluss Lampe Messung 2:  $(106 \pm 3)$  mW
5. Strahlungsfluss LED Messung 2:  $(264 \pm 3)$  mW



**Abbildung 12:** Erzeugte Diodenkennlinie für die Halogenlampe



**Abbildung 13:** Erzeugte Diodenkennlinie für die Halogenlampe mit geringeren Abstand zur Solarzelle



**Abbildung 14:** Erzeugte Diodenkennlinie für die LED-Lampe

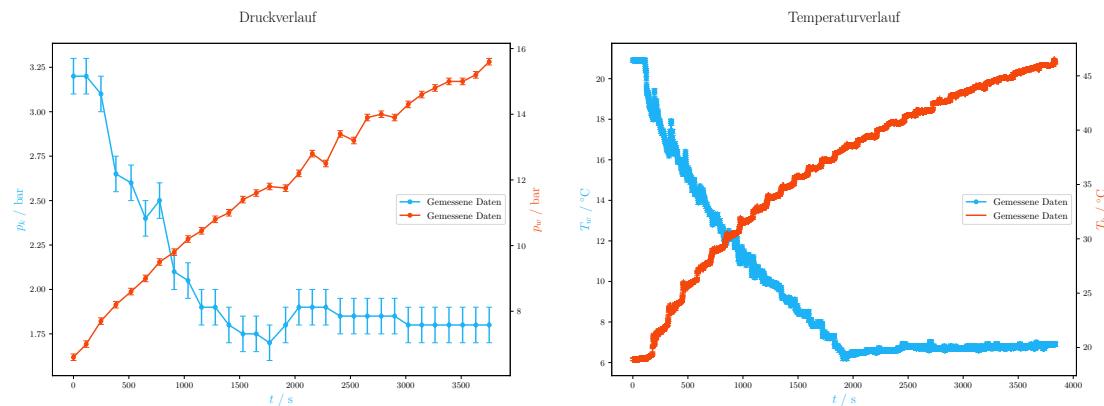
## 6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fort- pflanzt, ist erweiterte Gauss-Methode verwendet worden. Die Grundlagen dieser Methode stammen von den Powerpointfolien von GUM [5]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen die Pakete `labtool-ex2`, `pandas`, `sympy`, `lmfit` zur Hilfe genommen worden. `lmfit` wurde für das Fitten verwendet, `sympy` wurde für symbolische Manipulation verwendet und die restlichen Pakete für leichteres Handhaben der Daten. Dies wurde aber alles durch `labtool-ex2` abstrahiert.

Um höchstmögliche Genauigkeit zu garantieren wird erst bei der Darstellung der Wert in Tabellen gerundet.

### 6.1 Wärmepumpe

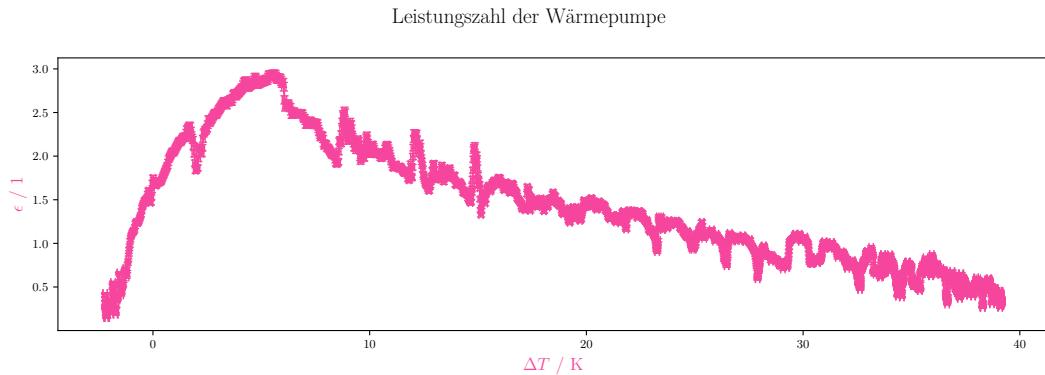
Zunächst gilt es die zeitlichen Temperatur und Druckverläufe des kalten und des warmen Bereich darzustellen dazu sind die Daten in zwei Diagrammen geplottet worden. Dies ist gemacht worden um zeitliche Tendenzen besser zu präsentieren.



**Abbildung 15:** Zeitliche Verläufe von den Drücken und Temperaturen, während dem Betrieb der Wärmepumpe. Wobei  $p_k$  der Druck und  $T_k$  die Temperatur des Reservoirs der kalten Seite der Wärmepumpe sind.  $p_w$  und  $T_w$  sind dementsprechend, die der warmen Seite der Wärmepumpe.

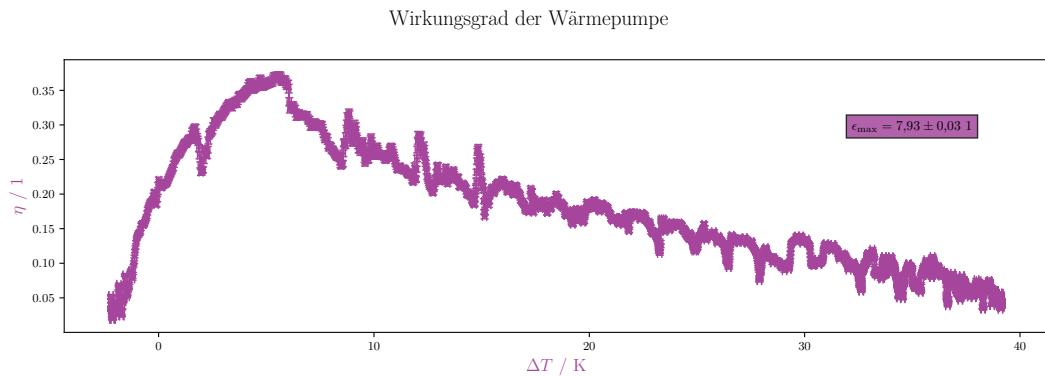
Nun wird mittels der zeitlichen Änderung der warmen Reservoir-Temperatur der Wärmefluss mittels der Masse und Wärmekapazität des Reservoirs errechnet  $\dot{Q} = (m_1)c_w\Delta\dot{T}$ .

Hier wurde die Warne Aufgrund des stetigeren Temperaturverlaufs gewählt. Schlussendlich wird durch die zugeführte elektrische Leistung dividiert um die Leistungszahl zu bekommen, siehe Gleichung 1.



**Abbildung 16:** Verlauf der Leistungszahl  $\epsilon$  einer Wärmepumpe, während diese durch ihren Betrieb die Temperaturdifferenz der zwei Reservoirs  $\Delta T$  erhöht.

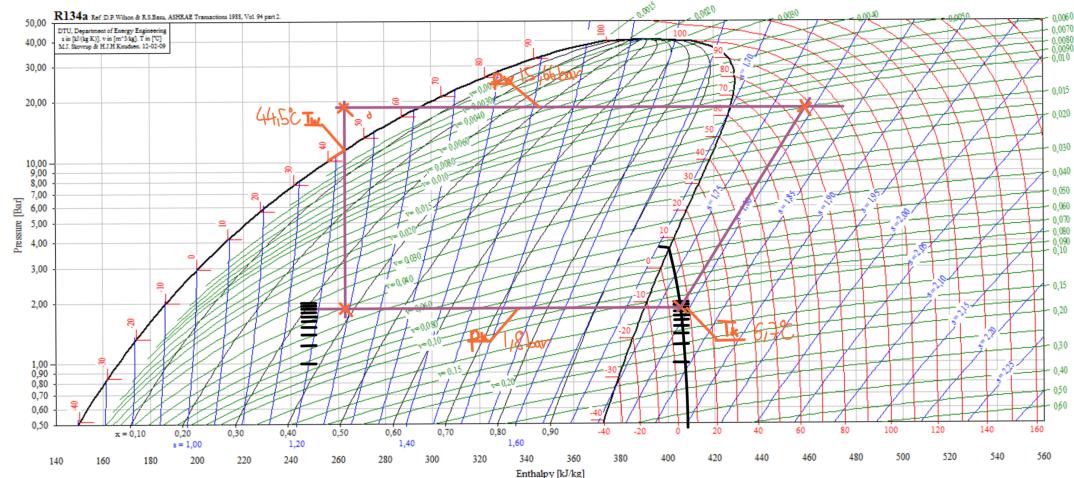
Indem nun diese Leistungszahlen  $\epsilon$  in Relation zu dem hier theoretisch Maximalen  $\epsilon_{\max}$  gesetzt wird, kann der Gütefaktor  $\eta$  bestimmt werden, wie in Gleichung 2 sichtbar. Dabei wurde  $\epsilon_{\max}$  durch den Kehrwert des Carnot-Wirkungsgrad bestimmt, die höchst und tiefst Temperaturen sind aus den Daten genommen worden  $\epsilon_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{T_k}{T_w}}$ .



**Abbildung 17:** Dynamischer Gütegradverlauf  $\eta$  der Wärmepumpe. Der Gütegrad  $\eta$  wird bezüglich der Temperaturdifferenz der zwei Reservoirs  $\Delta T$  aufgetragen. Die, für diese Graphik errechnete, theoretisch maximale Leistungszahl  $\epsilon_{\max}$  ist auch angeführt.

Schlussendlich wird noch ein  $\log p - H$ -Diagramm für den Kreisprozess erstellt. Dazu wurden die Equilibrium Temperaturen und Drücke die sich am Ende eingestellt

haben genommen. Um das Diagramm zu zeichnen wurde die in den Unterlagen zur Verfügung gestelltes Referenzdiagramm für das R134a Gas verwendet[3].



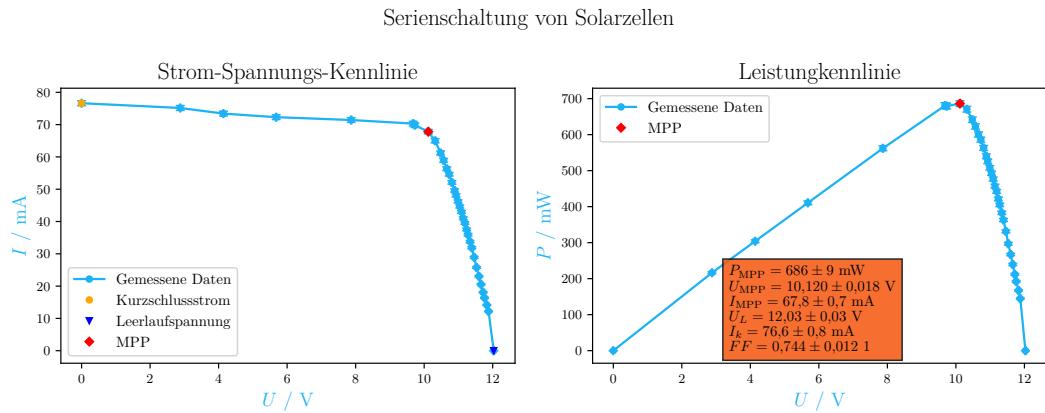
**Abbildung 18:**  $\log p - H$  Diagramm des linkslaufenden Kreisprozesses der Wärmepumpe. Dabei wurden die Equilibrium Temperaturen und Drücke für die Warme und kalte Seite eingezeichnet. Wobei  $p_k$  der Druck und  $T_k$  die Temperatur der kalten Seite der Wärmepumpe sind;  $p_w$  und  $T_w$  sind dementsprechend, die der warmen Seite der Wärmepumpe.

## 6.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Damit die invertierte Strom-Spannung Kennlinie und die Leistungskennlinie leserlich bleiben sind diese in zwei nebeneinanderliegenden Plots gezeichnet

Um die Kenndaten zu erzeugen sind folgende Statistiken auf die Datensätze angewandt worden. Damit der Kurzschlussstrom  $I_k$  ermittelt werden kann ist der Messwert bei der Spannung von 0 V, für die Leerlaufspannung  $U_L$  der Messwert mit keinem Strom 0 A genommen worden. Für den Betriebspunkt der maximalen Leistung ist zunächst die Leistung mit  $P = UI$  berechnet und von diesen Werten das Maximum genommen worden, um  $P_{MPP}$  zu bestimmen, und die Spannung  $U_{MPP}$  und Strom  $I_{MPP}$ , die diese Leistung produzierten, vermerkt worden. Dieses Verfahren ist für die verschiedenen Beschaltungen und Belichtungsflächen durchgeführt worden.

### 6.2.1 Serienschaltung der beiden Solarzellen



**Abbildung 19:** Untersuchung der invertierten Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Serienschaltung von Solarzellen. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser verglichen zu können, auch angeführt:

$I_k$  ... Kurzschlussstrom

$U_L$  ... Leerlaufspannung

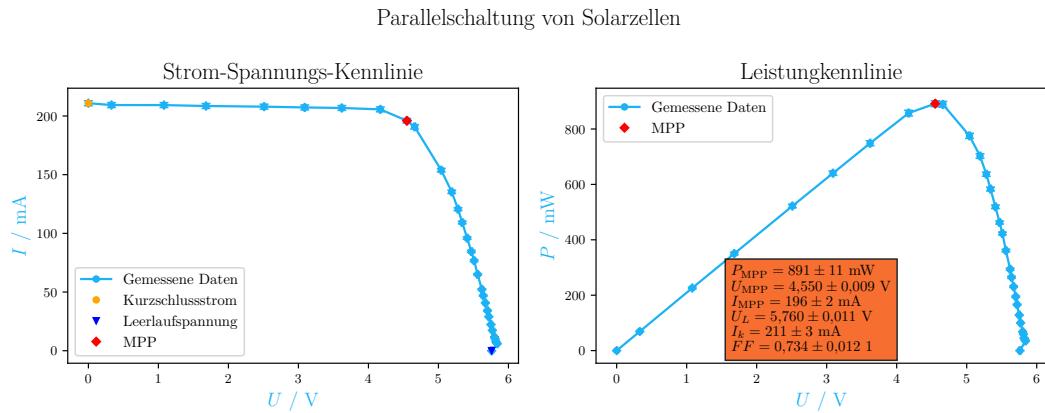
$P_{MPP}$  ... Leistung am MPP

$I_{MPP}$  ... Strom am MPP

$U_{MPP}$  ... Spannung am MPP

$FF$  ... Füllfaktor der Solarzellenkonfiguration

### 6.2.2 Parallelschaltung der beiden Solarzellen



**Abbildung 20:** Untersuchung der invertierten Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Parallelschaltung von Solarzellen. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser verglichen zu können, auch angeführt:

$I_k$  ... Kurzschlussstrom

$U_L$  ... Leerlaufspannung

$P_{MPP}$  ... Leistung am MPP

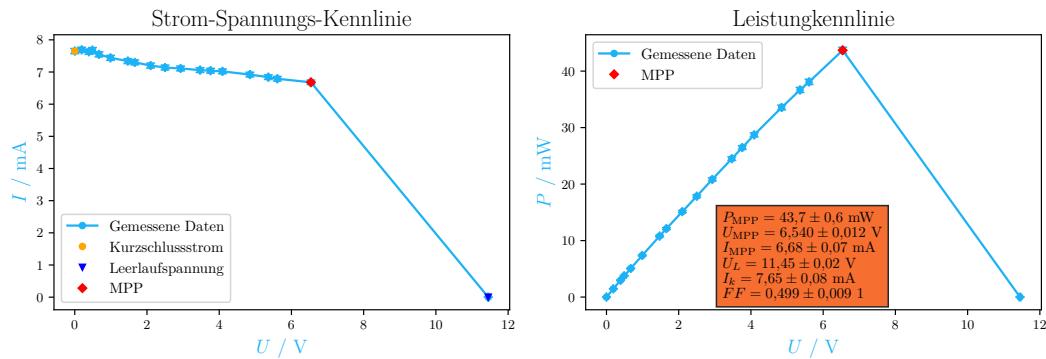
$I_{MPP}$  ... Strom am MPP

$U_{MPP}$  ... Spannung am MPP

$FF$  ... Füllfaktor der Solarzellenkonfiguration

### 6.2.3 Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird

Serienschaltung von Solarzellen abgedeckt



**Abbildung 21:** Untersuchung der invertierten Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Serienschaltung mit Teilbedeckung der Solarzellen. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser vergleichen zu können, auch angeführt:

$I_k$  ... Kurzschlussstrom

$U_L$  ... Leerlaufspannung

$P_{\text{MPP}}$  ... Leistung am MPP

$I_{\text{MPP}}$  ... Strom am MPP

$U_{\text{MPP}}$  ... Spannung am MPP

$FF$  ... Füllfaktor der Solarzellenkonfiguration

### 6.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Nun werden die Diodencharakteristik einer Solarzelle bei verschiedenen Belichtungsstufen untersucht. Dazu wurde die Strom-Spannung Kennlinien gemessen und an die Gleichung für das Zweidioden-Modell gefittet. Um dies zu bewerkstelligen wurden folgende Vereinfachungen getroffen: Die implizite Anteile werden vernachlässigt, was bewirkt dass die gefittet Funktion höher sein wird als wenn die Terme berücksichtigt werden. Beim fitten war der zweite Diodenparameter nahe 0 und deshalb wurde die Fit-Kurve nochmals vereinfacht und dieser Term weggelassen. Somit wurde schlussendlich mit folgender Gleichung gefittet:

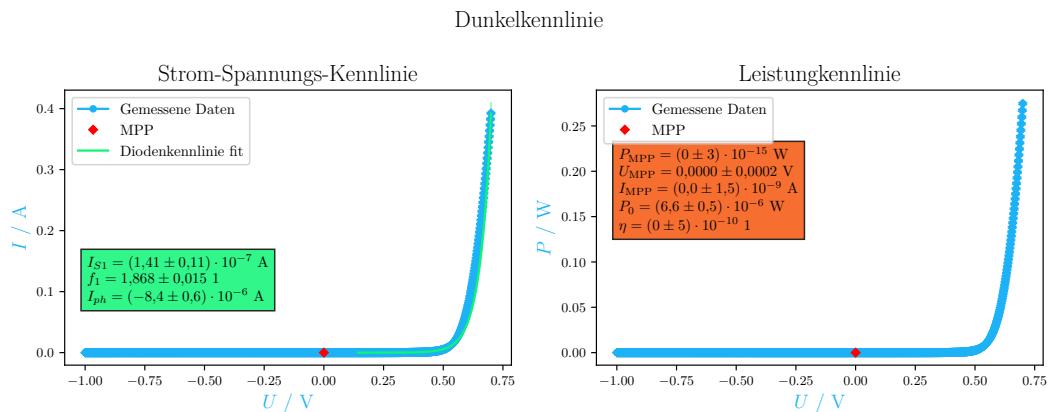
$$I(U) = I_{S1} \left( \exp \left\{ \frac{eU}{f_1 k_b T} \right\} - 1 \right) - I_{ph} \quad (9)$$

Dabei ist  $I_{S1}$  der Sättigungsstrom,  $U$  die gemessene Spannung,  $k_b$  die Boltzmann-Konstante,  $e$  die Elementar Ladung,  $T$  die Temperatur der Solarzelle,  $f_1$  der Diodenfaktor und  $I_{ph}$  der Photostrom.

Damit die Konvergenz der Parameter funktionieren konnte, wurde die Anzahl der freien Parameter reduziert. Dafür wurde die Temperatur gewählt, welche am besten abgeschätzt werden konnte. Weiters wurde, wegen demselben Grund, der Cutoff Bereich von 0,4 A verworfen, da es nicht den echten Verlauf wiederspiegelt.

### 6.3.1 Messung der Dunkelkennlinie

Nun wird die Dunkelkennlinie bestimmt. Dabei wurden bei den aufgenommenen Daten die Werte mit einer Spannung unter 0,15 V verworfen, da zunächst der Tail zu großen Einfluss auf den Fit hatte. Die Kurve hat viel zu spät zum Steigen begonnen und damit den dynamischen Teil nicht richtig beschrieben. Deshalb wurde auch nur der interpolierte Bereich geplottet und es wurde nichts extrapoliert.



**Abbildung 22:** Untersuchung der Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei keiner Belichtung der Solarzelle. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser vergleichen zu können, auch angeführt:

$P_{MPP}$  ... Leistung am MPP

$I_{MPP}$  ... Strom am MPP

$U_{MPP}$  ... Spannung am MPP

$P_0$  ... Zugeführte Strahlungsfluss

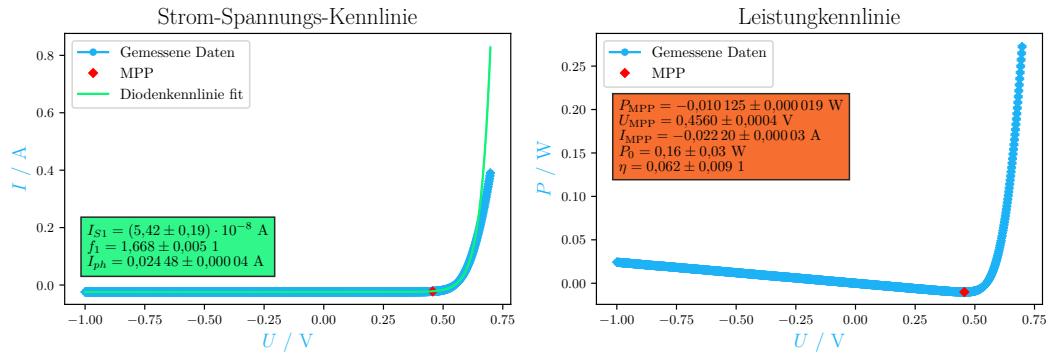
$\eta$  ... Wirkungsgrad

### 6.3.2 Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades

Für die Hellkennlinien musst der Tail nicht weniger gewichtet werden, da die Fits auch so zu einem sinnvollen Ergebnis konvergiert sind. Um die Wirkungsgrade berechnen zu können muss die Bestrahlte Leistung der Solarzelle gekannt werden, diese wird mittels der Bestrahlungsstärke bestimmt, die jedoch durch die gemessene Leistung am Leistungssensor bestimmt wird. Dies wird durch das Dividieren der Leistung durch die Fläche des Sensor berechnet.

$$P_0 = EA_{\text{Solar}} = \frac{P_{\text{Sensor}}}{A_{\text{Sensor}}} A_{\text{Solar}} \quad (10)$$

Hellkennlinie @  $(2,5 \pm 0,3) \cdot 10^2 \text{ W m}^{-2}$



**Abbildung 23:** Untersuchung der Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Bestrahlungsstärke der Solarzelle von  $(250 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$  mittels einer Halogenlampe. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser vergleichen zu können, auch angeführt:

$P_{\text{MPP}}$  ... Leistung am MPP

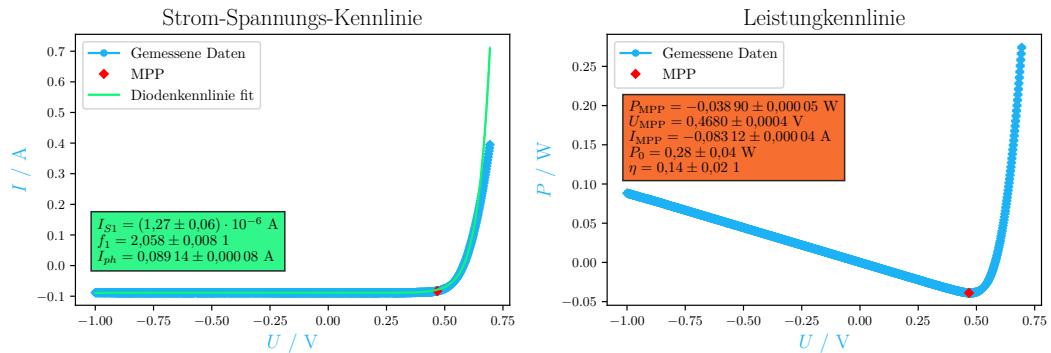
$I_{\text{MPP}}$  ... Strom am MPP

$U_{\text{MPP}}$  ... Spannung am MPP

$P_0$  ... Zugeführte Strahlungsfluss

$\eta$  ... Wirkungsgrad

Hellkennlinie @  $(4.2 \pm 0.6) \cdot 10^2 \text{ W m}^{-2}$



**Abbildung 24:** Untersuchung der Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Bestrahlungsstärke der Solarzelle von  $(420 \pm 60) \text{ W m}^{-2}$  mittels einer Halogenlampe. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser vergleichen zu können, auch angeführt:

$P_{MPP}$  ... Leistung am MPP

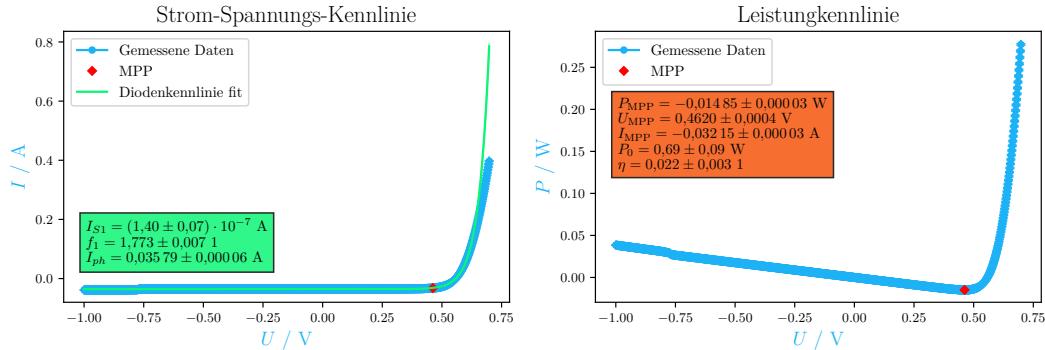
$I_{MPP}$  ... Strom am MPP

$U_{MPP}$  ... Spannung am MPP

$P_0$  ... Zugeführte Strahlungsfluss

$\eta$  ... Wirkungsgrad

Hellkennlinie @  $(1.04 \pm 0.12) \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$



**Abbildung 25:** Untersuchung der Strom-Spannungs Kennlinie (links) und Leistungskennlinie (rechts) bei einer Bestrahlungsstärke der Solarzelle von  $(1040 \pm 120) \text{ W m}^{-2}$  mittels einer bläulichen LED-Lampe. Folgende Größen wurden errechnet und, um Effizienz für dieser Konfiguration besser vergleichen zu können, auch angeführt:

$P_{MPP}$  ... Leistung am MPP

$I_{MPP}$  ... Strom am MPP

$U_{MPP}$  ... Spannung am MPP

$P_0$  ... Zugeführte Strahlungsfluss

$\eta$  ... Wirkungsgrad

## 7 Diskussion

### 7.1 Wärmepumpe

Beim Betrachten der Grafik in Abbildung 15 wird klar ersichtlich, dass es besser wäre die Flüssigkeit immer konstant umzurühren, da sonst, immer wenn umgerührt wird, Spikes in den Temperatur und Druckverläufen entstehen, die vermeiden werden sollten.

Nach dem Versuch beim Entfernen des Kübels wurde festgestellt, dass sich auf der Kalten Seite Eis gebildet hat, wie in Abbildung 26 sichtbar, welches natürlich isolierende Auswirkungen hat und somit das Ergebnis verfälscht. Bei einer erneuten Durchführung des Versuchs sollte daher die Flüssigkeit, nicht nur wegen der Spikes sondern auch gegen die Eisbildung deutlich öfter umgerührt werden.



**Abbildung 26:** Eisbildung

## 7.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Bei einer erneuten Durchführung wäre es wichtig, die Lampe einige Zeit auf die Solarzelle scheinen zu lassen, damit sich eine konstante Betriebstemperatur einstellen kann, bevor die Messung begonnen wird.

Die Solarzelle waren zur Lichtquelle verdreht, deshalb ist die effektive Fläche mit dem Cosinus zur ganzen Fläche verbunden ( $A' = A \cos(\theta)$ ). Der dadurch entstandene prozentuelle Fehler beträgt somit  $100(1 - \frac{A'}{A}) = 0,38\%$ .

### 7.2.1 Serienschaltung der beiden Solarzellen

Ein Vergleich der Werte zeigt, dass die Serienschaltung eine höhere Spannung bei einem niedrigeren Strom liefert, als die Parallelschaltung, wie es zu erwarten war.

### 7.2.2 Parallelschaltung der beiden Solarzellen

Die Parallelschaltung bietet einen höheren Strom bei niedriger Spannung als die Serienschaltung, wie bei Parallelschaltung üblich. Zudem ist die Leistung höher als bei Serienschaltung, was der Ohmschen-Model widerspricht (eigentlich sollten sie gleich sein). Da sich dieses aber nicht linear verhält ist dies wahrscheinlich der Grund für die Diskrepanz zum Ohmschen-Model.

### 7.2.3 Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird

Bei den teils bedeckten, in Serie geschalteten Solarzellen ist ein enormer Abfall in der gewonnene Leistung vonstatten gegangen. Dies lässt sich erklären, da die beschattete Fläche ein parasitärer Widerstand ist.

## 7.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Bei der Dunkelkennlinie entsprechen die meisten Parameter(e.g. wie  $I_{ph}$ ) null was auch mit der Erwartung übereinstimmt.

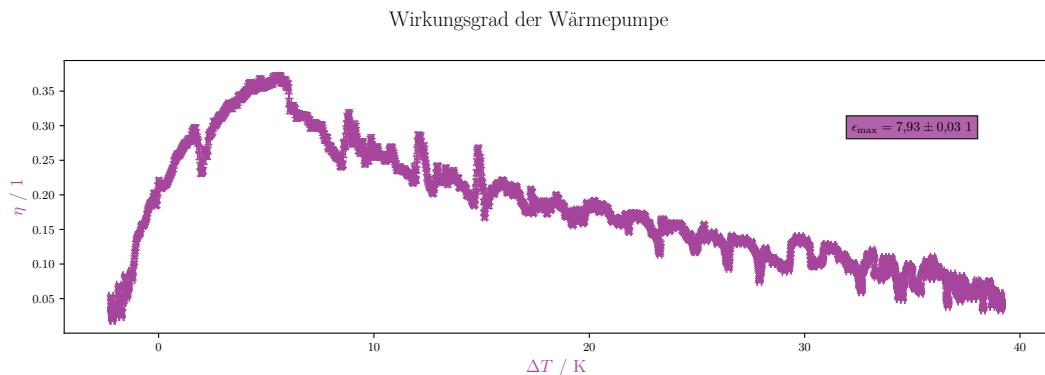
Da die Bestrahlungsstärke mit dem Abstand zum Quadrat absinkt, ist der gemessene Punkt nur ein Informations Punkt und nicht representative für die gesamte Bestrahlungsstärke der Solarzelle. Deshalb wäre eine Technik, um die Watt Messung wahrheitsgetreuer zu machen, sinnvoll. Dies kann zum Beispiel mit einer Approximation der Abstrahlungsfläche durch Kugelfächen gemacht werden. Um dies zu machen muss der Sensor ein Paar Punkte abfahren und dann ein Flächenmittelwert, für die interessierte Fläche, erstellt werden.

Bei der bläulichen LED Lampe wird Energie schlechter von der Solarzellen aufgenommen. Deshalb wird trotz der hohen Bestrahlungsstärke kaum etwas konvertiert, da Solarzellen für das Sonnenabstrahlungsspektrum optimiert werden.

## 8 Zusammenfassung

Hier werden nochmals alle Ergebnisse dieser Experimentenfolge aufgelistet. Wobei die meisten zu erstellenden Diagramme Aufgrund der Länge der Abschnitt 6 entnommen werden sollen.

## 8.1 Wärmepumpe



**Abbildung 27:** Dynamischer Gütegradverlauf  $\eta$  der Wärmepumpe. Der Gütegrad  $\eta$  wird bezüglich der Temperaturdifferenz der zwei Reservoirs  $\Delta T$  aufgetragen. Die, für diese Graphik errechnete, theoretisch maximale Leistungszahl  $\epsilon_{\max}$  ist auch angeführt.

## 8.2 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

1.  $P_{\text{MPP}} = (686 \pm 9) \text{ mW}$
2.  $U_{\text{MPP}} = (10,120 \pm 0,018) \text{ V}$
3.  $I_{\text{MPP}} = (67,8 \pm 0,7) \text{ mA}$
4.  $U_L = (12,03 \pm 0,03) \text{ V}$
5.  $I_k = (76,6 \pm 0,8) \text{ mA}$
6.  $FF = (0,744 \pm 0,012) \text{ 1}$

### 8.2.1 Serienschaltung der beiden Solarzellen

1.  $P_{\text{MPP}} = (891 \pm 11) \text{ mW}$
2.  $U_{\text{MPP}} = (4,550 \pm 0,009) \text{ V}$
3.  $I_{\text{MPP}} = (196 \pm 2) \text{ mA}$
4.  $U_L = (5,760 \pm 0,011) \text{ V}$
5.  $I_k = (211 \pm 3) \text{ mA}$
6.  $FF = (0,734 \pm 0,012) \text{ 1}$

### 8.2.2 Parallelschaltung der beiden Solarzellen

1.  $P_{MPP} = (43,7 \pm 0,6) \text{ mW}$
2.  $U_{MPP} = (6,540 \pm 0,012) \text{ V}$
3.  $I_{MPP} = (6,68 \pm 0,07) \text{ mA}$
4.  $U_L = (11,45 \pm 0,02) \text{ V}$
5.  $I_k = (7,65 \pm 0,08) \text{ mA}$
6.  $FF = (0,499 \pm 0,009) 1$

### 8.2.3 Serienschaltung der beiden Solarzellen, wobei eine Solarzelle partiell abgeschattet wird

## 8.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Dunkelkennlinie:

1.  $f_1 = (1,868 \pm 0,015) 1$

Hellkennlinie Halogen Lampe @ $(250 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$ :

1.  $P_{MPP} = (10,125 \pm 0,019) \text{ mW}$
2.  $U_{MPP} = (0,4560 \pm 0,0004) \text{ V}$
3.  $I_{MPP} = (22,20 \pm 0,03) \text{ mA}$
4.  $\eta = (0,062 \pm 0,009) 1$
5.  $f_1 = (1,668 \pm 0,005) 1$

Hellkennlinie Halogen Lampe @ $(420 \pm 60) \text{ W m}^{-2}$ :

1.  $P_{MPP} = (38,90 \pm 0,05) \text{ mW}$
2.  $U_{MPP} = (0,4680 \pm 0,0004) \text{ V}$
3.  $I_{MPP} = (83,12 \pm 0,04) \text{ mA}$
4.  $\eta = (0,14 \pm 0,02) 1$
5.  $f_1 = (2,058 \pm 0,008) 1$

Hellkennlinie bläuliche Led @ $(1040 \pm 120) \text{ W m}^{-2}$ :

1.  $P_{MPP} = (14,85 \pm 0,03) \text{ mW}$

2.  $U_{\text{MPP}} = (0,4620 \pm 0,0004) \text{ V}$
3.  $I_{\text{MPP}} = (32,15 \pm 0,03) \text{ mA}$
4.  $\eta = (0,022 \pm 0,003) \text{ l}$
5.  $f_1 = (1,773 \pm 0,007) \text{ l}$

## Literaturverzeichnis

- [1] *2450 Source Measure Unit (SMU) Instrument Datasheet*. URL: <https://www.tek.com/en/datasheet/smu-2400-graphical-sourcemeter/model-2450-touchscreen-source-measure-unit-smu-instrument-> (besucht am 12.03.2023).
- [2] *407A - Newport Optical Power Meters - BRL Test*. URL: [https://www.brltest.com/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=4317](https://www.brltest.com/index.php?main_page=product_info&products_id=4317) (besucht am 21.03.2023).
- [3] Andreas Hohenau. *Wärmepumpe*. andreas.hohenau@uni-graz.at. 28. Aug. 2014.
- [4] Peter Knoll, A Schöffmann und Günther Platauf. *Die Solarzelle*. guenther.palatauf@uni-graz.at.
- [5] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht:Schätzwert & Messunsicherheit*. 2004.

## Abbildungsverzeichnis

1	p-H Diagramm des Kreisprozesses . . . . .	6
2	Schematische Funktionsweise der Solarzelle . . . . .	8
3	Versuchsaufbau der Wärmepumpe . . . . .	10
4	Skizze des Versuchsaufbaus der Wärmepumpe . . . . .	11
5	Sicherung gegen Verrutschen des Temperatursensors . . . . .	12
6	Schaltplan der Solarzelle . . . . .	13
7	Serienschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	14
8	Parallelschaltung der beiden Solarzellen . . . . .	14
9	Partielle Beschattung einer Solarzelle . . . . .	15
10	sichtbares Interface . . . . .	18
11	Erzeugte Dunkelkennlinie der Solarzelle . . . . .	25
12	Erzeugte Diodenkennlinie für die Halogenlampe . . . . .	26
13	Erzeugte Diodenkennlinie für die Halogenlampe mit geringeren Abstand zur Solarzelle . . . . .	26
14	Erzeugte Diodenkennlinie für die LED-Lampe . . . . .	26
15	Zeitliche Verläufe von den Drücken und Temperaturen, während dem Betrieb der Wärmepumpe . . . . .	27
16	Verlauf der Leistungszahl . . . . .	28
17	Dynamischer Gütegradverlauf $\eta$ der Wärmepumpe . . . . .	28
18	Log P-H Diagramm des Kreisprozesses der Wärmepumpe . . . . .	29
19	Kennlinien Serienschaltung Solarzellen . . . . .	30
20	Kennlinien Parallelschaltung Solarzellen . . . . .	31
21	Kennlinien Serienschaltung mit teils bedeckten Solarzellen . . . . .	32

22	Dunkelkennlinie einer Solarzelle . . . . .	33
23	Kennlinie durch Halogen-Lampen 1.te Belichtung . . . . .	34
24	Kennlinie durch Halogen-Lampen 2.te Belichtung . . . . .	35
25	Kennlinie durch LED-Lampen Belichtung . . . . .	36
26	Eisbildung . . . . .	37
27	Dynamischer Gütegradverlauf $\eta$ der Wärmepumpe . . . . .	39

## Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Geräte für die Wärmepumpe . . . . .	16
2	Verwendete Geräte für die beiden Solarzellen Versuche . . . . .	17
3	Abgelesene Drücke bei der entsprechenden Zeit . . . . .	19
4	Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Serienschaltung der Solarzellenmodule . . . . .	21
5	Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Parallelschaltung der Solarzellenmodule . . . . .	22
6	Abgelesene Strom und Spannungswerte für die Serienschaltung mit einem abgedeckten Solarzellenmodul . . . . .	24