

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Bachelorarbeit

Studiengang Umwelttechnik

**Ermittlung der Temperaturdifferenz zwischen der Zelltemperatur eines
Photovoltaik-Modules und der gemessenen Temperatur an der Rückseitenfolie**

von
Denis Miller

Matrikelnummer:



Abgabedatum:

24.01.2019

Gutachter:



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Prof. Dr. Timon Kampschulte

SOLPEG
Solar Power Expert Group

Dipl. -Ing. André Schumann

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

23.01.2019

.....

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Timon Kampschulte, als Betreuer der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, für dessen Anregungen und Hilfestellungen, recht herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. André Schumann, als Betreuer der Firma SolPEG GmbH, für das Bereitstellen des Themas, die zahlreichen Ratschläge, Ideenansätze und Diskussionen beim Erstellen dieser Arbeit.

Ein großes Dankeschön gilt der gesamten Firma SolPEG GmbH: Dieko Jacobi, Dipl.-Ing. Kai Barke, B.Sc. Slawomir Zacharias, B.Sc. Martin John und B.Sc. Julia Netzband für inhaltliche Hilfestellungen sowie Anregungen bei der Formulierung und Gestaltung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Dipl.-Ing. Jan-Claas Böhmke und Dipl.-Ing. Nico Mock für ihre Geduld und Hilfsbereitschaft bedanken.

Außerdem möchte ich meinen Eltern Peter & Natalja Miller danken, die mich während des gesamten Studiums finanziell unterstützt haben und mich immer wieder motivieren konnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
2	Allgemeine Grundlagen	3
2.1	Temperatur	3
2.2	Temperatursensoren.....	3
2.3	Prinzip des Berührungsthermometers.....	3
2.3.1	Thermoelement.....	4
2.3.2	Widerstandsthermometer.....	6
2.4	Berührungslose Temperatursensoren	9
2.5	Newtonsches Abkühlungsgesetz	10
2.6	Zusammensetzung eines Solarmoduls.....	11
3	Experimenteller Aufbau	15
3.1	„Klima-Box“	15
3.2	Messinstrumente und Zubehör	18
4	Vorbereitende Messungen.....	25
4.1	Kalibrierung der Thermoelemente	25
4.1.1	Versuchsaufbau	25
4.1.2	Versuchsdurchführung.....	26
4.1.3	Bestimmung der Kalibrierfunktion.....	26
4.2	Überprüfung der thermischen Homogenität.....	28
4.2.1	Thermische Homogenität der Klima-Box.....	28
4.2.2	Thermische homogenität an der Zelle	30
4.3	Überprüfung der konstanten Bestrahlungsstärke	31
4.3.1	Versuchsaufbau	31
4.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	32
5	Temperaturkoeffizient Bestimmung.....	35
5.1	Versuchsaufbau	35
5.2	Versuchsdurchführung.....	36
5.3	Versuchsauswertung.....	37
6	Bestimmung der Messabweichung gängiger Zelltemperatur- Messmethoden.....	40
6.1	Versuchsaufbau	40
6.2	Versuchsdurchführung.....	41
6.3	Messergebnisse der Testreihen.....	42

6.4	Auswertung der Messergebnisse.....	44
6.4.1	Auswertung der Pt-1.000 und Pt-100 Sensoren	44
6.4.2	Pt-300N	45
6.4.3	Thermoelemente.....	47
7	Zusammenfassung	48
8	Anhang A.1	50
8.1	Quellenverzeichnis	50
8.2	Tabellenverzeichnis.....	52
8.3	Abbildungsverzeichnis	53

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Prozentteil an Strom, der aus Photovoltaik (PV) -Anlagen erzeugt wird, steigt immer weiter an. In Deutschland sind laut der Bundesnetzagentur am Stichtag 31.07.2018 PV-Anlagen mit insgesamt 44,59 GW Nennleistung installiert. Vor der Inbetriebnahme müssen die PV-Anlagen auf normgerechte Ausführung begutachtet werden. Die Überprüfung der tatsächlichen Modulleistung ist eine zentrale Aufgabe bei der unabhängigen Begutachtung von PV-Anlagen. Dabei ist die Temperatur der Module sehr entscheidend, da jedes Modul einen Temperaturkoeffizienten besitzt und mit steigender Temperatur an Leistung verliert. Mehrere Verfahren wurden bereits entwickelt, um die Betriebstemperatur von PV-Modulen zu bestimmen. In dem Fachartikel "Comparison of Solar Photovoltaic Module Temperature Models" von A.Q. Jakhrani, A.K. Othman, A.R.H. Rigit und S.R. Samo von der Universität Sarawak in Malaysia und der Universität Quaid-e-Awam in Pakistan werden verschiedene Methoden der Temperaturmessung von PV-Modulen miteinander verglichen [World, 2011]. Eine derzeit gängige Methode der Temperaturüberwachung ist die Befestigung eines Temperatursensors an der Rückseite des PV-Moduls. Trotz guter Sensoren gibt es einen Temperaturunterschied zwischen der tatsächlichen Zelltemperatur und der gemessenen Temperatur an der Rückseite des PV-Moduls. Die tatsächliche Solarzellentemperatur kann auch über die Leerlaufspannung berechnet werden, wenn der Temperaturkoeffizient bekannt ist.

Viele Gutachter benutzen die Rückseitentemperatur als einen Richt- / Referenzwert und berechnen die tatsächliche Temperatur durch die Leerlaufspannung. Diese Methode funktioniert aber nur für unbeschädigte und fehlerfreie Module bzw. Modulstränge. Wenn ein Modul Defekte, wie z.B. Kurzschluss der Bypass Diode oder Glasbruch aufweist, durch Objekte oder Wolken verschattet ist oder die Anzahl der zu einem Strang verschalteten Module falsch ist, wird die gemessene Spannung entsprechend beeinflusst und die Temperaturberechnung durch die Leerlaufspannung entsprechend verfälscht.

Außerdem erfordert die Methode der Temperaturbestimmung über die Leerlaufspannung eine verlässliche Herstellerangabe des entsprechenden Temperaturkoeffizienten und dessen Konstanz bei verschiedenen Bestrahlungs- und Temperaturbedingungen.

Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit die Abweichung der Modulrückseitentemperatur zur tatsächlichen Solarzellentemperatur genauer untersucht werden, um die derzeitigen Standardverfahren zu hinterfragen und eventuell zu verbessern.

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Bachelorarbeit wird das typische Verfahren einer Temperaturmessung im Außeneinsatz nachsimuliert. Es werden verschiedene Temperatursensoren und verschiedene Herangehensweisen der Temperaturmessung getestet. Der Leser soll mithilfe dieses Dokumentes nachvollziehen können, wie der Versuchsaufbau realisiert und die Messungen durchgeführt werden. Insbesondere sollen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Messbedingungen und Sensormodifikationen verstanden werden.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, sowohl eine aussagekräftige und gut dokumentierte Messreihe der Temperaturdifferenzen zwischen der Zelltemperatur und der gemessenen Temperatur an der Rückseitenfolie zu präsentieren, als auch nutzbare Informationen und Erkenntnisse zu ziehen, die in der Praxis angewandt werden könnten.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Temperatur

Die Temperatur gilt allgemein als eine der wichtigsten und am häufigsten gemessenen technisch-physikalischen Größen. Nahezu alle mechanischen, elektrischen, magnetischen oder optischen Stoffeigenschaften sind mehr oder weniger temperaturabhängig. [Bernhard, 2014]

2.2 Temperatursensoren

Temperatursensoren kommen in den unterschiedlichsten Gebieten zum Einsatz, z.B. in der Verfahrens-, Kraftwerks-, Sicherheits-, Fertigungs-, Maschinenbau-, Feinwerk-, Medizin-, Umwelttechnik und vielen mehr. Ihre Aufgabe ist es, Wärme zu messen und damit zu überwachen, ob ein Prozess in einem bestimmten Temperaturbereich abläuft oder dass eine vorgegebene Temperatur nicht über- bzw. unterschritten wird.

Ein Temperatursensor wandelt die Sensortemperatur in eine elektrisch messbare Größe um. Diese kann weiterverarbeitet und / oder direkt durch ein Messgerät digital ausgegeben werden. Es gibt zwei Hauptarten der Temperaturmessung. Zum einen die berührungslose Temperaturmessung, z.B. mit einem Infrarot (IR)-Pyrometer und zum anderen die Temperaturmessung mit Berührung, z.B. Thermoelemente, Widerstandsthermometer oder Thermistoren.

2.3 Prinzip des Berührungsthermometers

Mit einem Berührungsthermometer wird die Temperatur eines Messobjektes oder Messmediums mittelbar gemessen. Dabei sind die Grundprinzipien der mittelbaren Temperaturmessung wirksam. Hierfür wird ein Berührungsthermometer, mit einem bekannten Kennlinienverlauf, mit dem zu messendem Objekt durch thermische Kopplung in ein thermisches Gleichgewicht gebracht. [Bernhard, 2014]

Messprinzip

Bei Temperaturmessungen mit Berührungsthermometern ist die messtechnische Zielstellung, dass sich das Berührungsthermometer und das Messobjekt im thermischen Gleichgewicht befindet und der Sensor die Temperatur des Messobjektes annimmt. Um das nur theoretisch vollständig erreichbare Temperaturgleichgewicht zu erreichen, muss ein ausreichend langer und intensiver Wärmeaustausch zwischen Messobjekt und Sensor durch Wärmeleitung (an und in Festkörpern), durch Konvektion (in Flüssigkeiten und Gasen) und durch Wärmestrahlung (in Ofenatmosphären) stattfinden. [Bernhard, 2014]

2.3.1 Thermoelement

Jede Metalloberfläche hat einen individuellen Potentialwall, welchen die Elektronen überwinden müssen um auszutreten. Werden zwei verschiedene Metalle A und B an ihren Enden elektrisch verbunden (löten, schweißen) und dort einer anderen Messstellentemperatur T_{AB} als die Vergleichsstellentemperatur T_V (T_A bzw. T_B) an den Enden ausgesetzt, so treten aus dem Metall mit dem kleineren Potentialwall mehr Elektronen in das andere ein, als umgekehrt (Abb. 1).

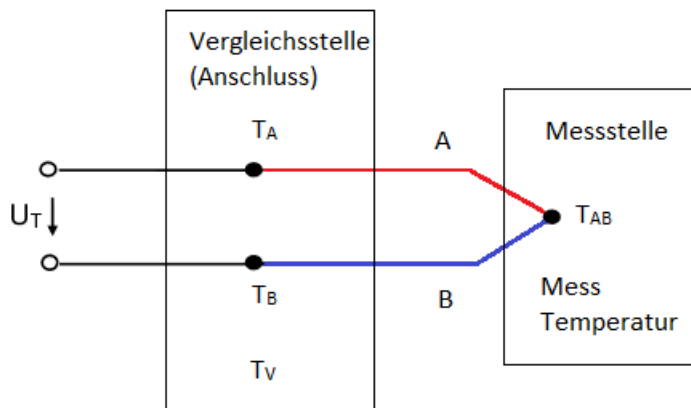


Abbildung 1: Elektrische Schaltung eines Thermoelements

Als Folge der unterschiedlichen Verteilung der Elektronen tritt eine messbare Thermospannung auf (Seebeck-Effekt). Je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen überwinden den Potentialwall und erhöhen damit die messbare Thermospannung. Die Thermospannung ist durch die temperaturabhängige Proportionalitätskonstante $S_{AB}(T)$ (Seebeck-Koeffizient) proportional zum Temperaturunterschied zwischen der Messstelle und der Vergleichsstelle $\Delta T = T_{AB} - T_V$. Der differentielle Seebeck-Koeffizient setzt sich aus den beiden virtuellen Einzelspannungen der Materialien zusammen und ergibt sich aus den jeweiligen Größen der Thermodiffusion in den Materialien:

$$S_{AB}(T) = S_A(T) - S_B(T) \quad (1)$$

Idealerweise besteht ein Thermoelement aus einem p-Halbleiter und einem n-Halbleiter, da der Seebeck-Koeffizient in p-Halbleitern positiv und in n-Halbleitern negativ ist und vom Betrag her umso größer, je geringer die Ladungsträgerdichte in dem Material ist. Der Seebeck-Koeffizient für Platin ist Null. Anhand zweier Kontaktstellen zwischen einem Platindraht und einem zu beschreibenden Draht ist es möglich, die Thermospannung des zu beschreibenden Materials zu ermitteln. In Tabelle 1 sind die Thermospannungen verschiedener Materialien gegenüber Platin bei Kontaktstellen von 0°C und 100°C dargestellt:

Tabelle 1: Thermospannungen verschiedener Materialien nach Hering

Metall	Thermoempfindlichkeit in mV (Seebeck-Koeffizient gegenüber Platin)
Konstantan	-3,2
Nickel	-1,9
Wolfram	0,7
Kupfer	0,7
Eisen	1,9
Nickelchrom	2,2

Thermoelemente können aus verschiedenen Metallen bestehen und in Temperaturbereichen von -200°C bis über $+2000^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden. Für bestimmte Thermopaare sind die Thermospannungen nach DIN EN 60584 genormt. [Hering, 2012]

Die folgende Tabelle zeigt die Genauigkeitsklassen, Temperaturbereiche und Grenzabweichungen der Standardlegierungen von Thermopaaren nach DIN EN 60584:

Tabelle 2: Standardlegierungen für Thermopaare nach DIN EN 60584-1 / ASTM E230 [Wika, 2018]

Typ	Thermopaar	Grenzabweichung	Klasse	Temperaturbereich	Grenzabweichung
K N	NiCr-Ni (NiCr-NiAl) NiCrSi-NiSi	IEC 60584-1	1	-40 ... +1000 °C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0040 \cdot t $
			2	-40 ... +1200 °C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0075 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	0 ... +1260 °C	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,4\%$
			Standard	0 ... +1260 °C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,75\%$
J	Fe-CuNi	IEC 60584-1	1	-40 ... +750 °C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0040 \cdot t $
			2	-40 ... +750 °C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0075 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	0 ... +760 °C	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,4\%$
			Standard	0 ... +760 °C	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,75\%$
E	NiCr-CuNi	IEC 60584-1	1	-40 ... +800 °C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0040 \cdot t $
			2	-40 ... +900 °C	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0075 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	0 ... +870 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,4\%$
			Standard	0 ... +870 °C	$\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,5\%$
T	Cu-CuNi	IEC 60584-1	1	-40 ... +350 °C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ oder $0,0040 \cdot t $
			2	-40 ... +350 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $0,0075 \cdot t $
			3	-200 ... +40 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $0,015 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	0 ... +370 °C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,4\%$
			Standard	-200 ... 0 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 1,5\%$
			Standard	0 ... +370 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,75\%$
R S	Pt13%Rh-Pt Pt10%Rh-Pt	IEC 60584-1	1	0 ... +1600 °C	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ oder $\pm [1 + 0,003(t - 1100)]^{\circ}\text{C}$
			2	0 ... +1600 °C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,0025 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	0 ... +1480 °C	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,1\%$
			Standard	0 ... +1480 °C	$\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,25\%$
B	Pt30%Rh-Pt6%Rh	IEC 60584-1	2	+600 ... +1700 °C	$\pm 0,0025 \cdot t $
			3	+600 ... +1700 °C	$\pm 4,0^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,005 \cdot t $
		ASTM E230	Spezial	-	-
			Standard	+870 ... +1700 °C	$\pm 0,5\%$

Die Kennlinienverläufe von Thermoelementen zeigen ein nahezu lineares Verhalten mit steigender Temperatur, bezogen auf eine Vergleichsstellentemperatur von 0°C. (Abb. 2).

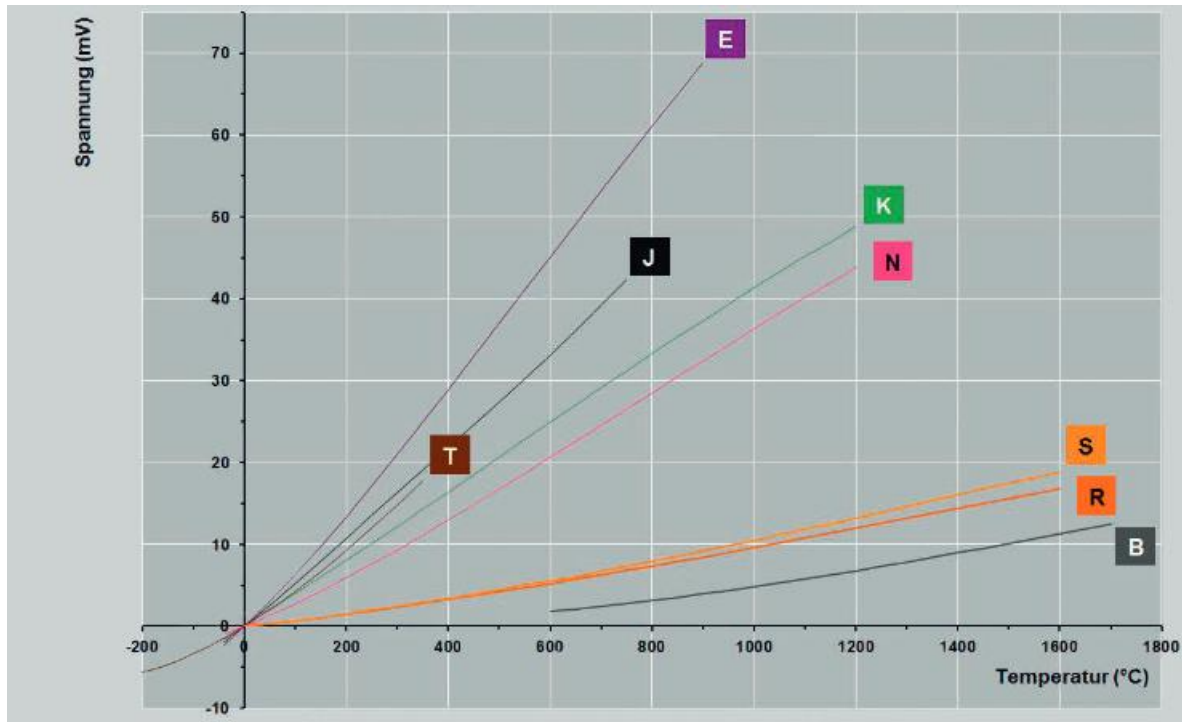


Abbildung 2: Thermospannung in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Thermoepaare nach DIN EN 60584 bei einer Referenztemperatur von 0°C [Wika, 2018]

2.3.2 Widerstandsthermometer

Widerstandsthermometer sind temperaturabhängige, elektrische Bauelemente, welche den elektrischen Widerstand des Materials zur Messung der Temperatur nutzen. Der elektrische Widerstand eines Materials ist abhängig von der Zusammensetzung des Materials, der Homogenität des kristallinen Zustandes und insbesondere von der Temperatur. Zwischen dem elektrischen Widerstand R und der Temperatur T gilt, nach DIN EN 60751, für reine Metalle und Metalllegierungen folgender nicht linearer Zusammenhang: [Hering, 2012]

$$R(T) = R_0 (1 + a(T - T_0) + b(T + T_0)^2) \quad (2)$$

mit

R_0 : Widerstand bei der Bezugstemperatur T_0

a, b : Materialkoeffizienten

In Tabelle 3 sind Grenzabweichungen, sowie Genauigkeitsklassen für Widerstandsthermometer aufgelistet. Diese sind ebenfalls in der DIN EN 60751 festgelegt.

Tabelle 3: Grenzabweichungen für Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751 [Electronic, 2018]

Klasse	Grenzabweichung (°C)	Gültigkeitsbereich (°C)
AA	$\pm (0,1 + 0,0017 [t]) ^1)$	- 50 bis + 250
A	$\pm (0,15 + 0,0020 [t]) ^1)$	- 100 bis + 450
B	$\pm (0,3 + 0,0050 [t]) ^1)$	- 196 bis + 600
C	$\pm (0,6 + 0,0100 [t]) ^1)$	- 196 bis + 600

Anmerkung 1: [t] = Wert der Temperatur ohne Beachtung des Vorzeichens

Platin-Widerstände

Aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber chemisch aggressiven Substanzen, seines hohen Schmelzpunktes ($T = 1.772 \text{ °C}$) und eines sehr hohen spezifischen elektrischen Widerstandes ($\rho = 9,81 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$), ist Platin das am häufigsten benutzte Metall für einen Widerstandssensor. Übliche Platin-Widerstände sind: Pt-100, Pt-200, Pt-500, Pt-1.000 und Pt 10.000. Wobei die Zahl hinter der Bezeichnung Pt den Widerstand in Ohm bei $T = 0 \text{ °C}$ angibt. So hat z.B. ein Pt-100 einen Widerstand von 100 Ohm bei 0°C .

Reine Metalle haben eine stärkere Widerstandsänderung als Metalllegierungen und haben einen weitgehend konstanten Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes. Ein Widerstandsthermometer kann auch aus Halbleitern bestehen. Diese werden Thermistoren genannt und teilen sich in zwei Gruppen von Sensoren, den Heiß- und Kaltleiter. Bei den Heißleitern handelt es sich um „Negative Temperature Coefficient“ Widerstände. Es bedeutet, dass der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt. Bei den Kaltleitern handelt es sich um „Positive Temperature Coefficient“ Widerstände. Hierbei nimmt der elektrische Widerstand, mit steigender Temperatur, zu. [Hering, 2012]

Das Verhalten eines Pt-X ist in der Norm DIN EN 60751 mit der Gleichung (2) beschrieben. Außerdem gilt für Platin:

$$\alpha = a = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K,}$$

$$\beta = b = -5,78 \cdot 10^{-7} \text{ 1/K}^2,$$

$$R_0 = R (\vartheta = 0\text{°C})$$

In Abb. 3 wird ein Kennlinienverlauf für einen Pt-1.000 mit der (2) Gleichung und den Materialkoeffizienten α und β erstellt.

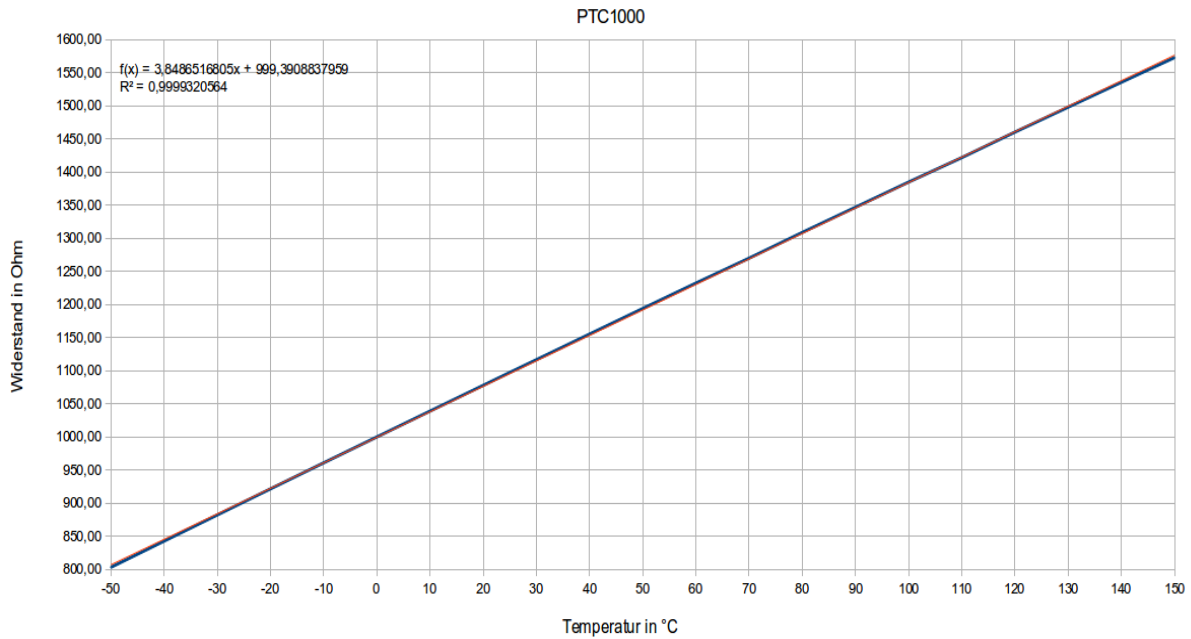


Abbildung 3: Kennlinienverlauf eines Pt-1.000 [MikCon, 2018]

Aus der Gleichung (2) und dem Kennlinienverlauf ergibt sich für eine Temperatur von 25 °C ein Widerstandswert für ein Pt-1000 von

$$R = 1.000 \, \Omega (1 + 3,91 \cdot 10^{-3} \, 1/^{\circ}\text{C} \cdot 25 \, ^{\circ}\text{C} - 5,78 \cdot 10^{-7} \, 1/^{\circ}\text{C}^2 \cdot (25 \, ^{\circ}\text{C})^2) = 1097,38875 \, \Omega.$$

Leitungswiderstände

Die Messung eines Widerstandsthermometers erfolgt über eine einfache Zweileiter-Schaltung (Abb. 4). Bei dieser Variante treten allerdings Leitungswiderstände auf, die bei der Bestimmung der Temperatur berücksichtigt werden müssen. Um den Einfluss der Leitungswiderstände zu umgehen, kann z.B. eine Vierleiter-Schaltung realisiert werden (Abb. 5). Bei dieser Schaltung werden zu der Zweileiter-Schaltung parallel zwei weitere Leiter angeschlossen. Dadurch haben die Leitungswiderstände keinen Einfluss mehr auf die Messung.

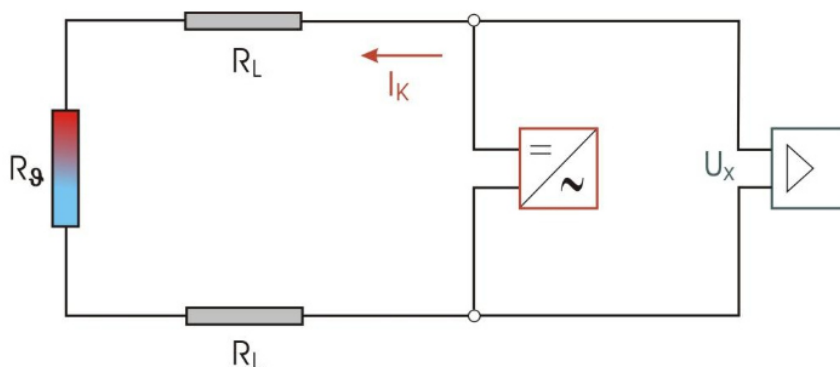


Abbildung 4: Zweileiter-Schaltung mit Konstantstromquelle [HTW-Berlin, 2018]

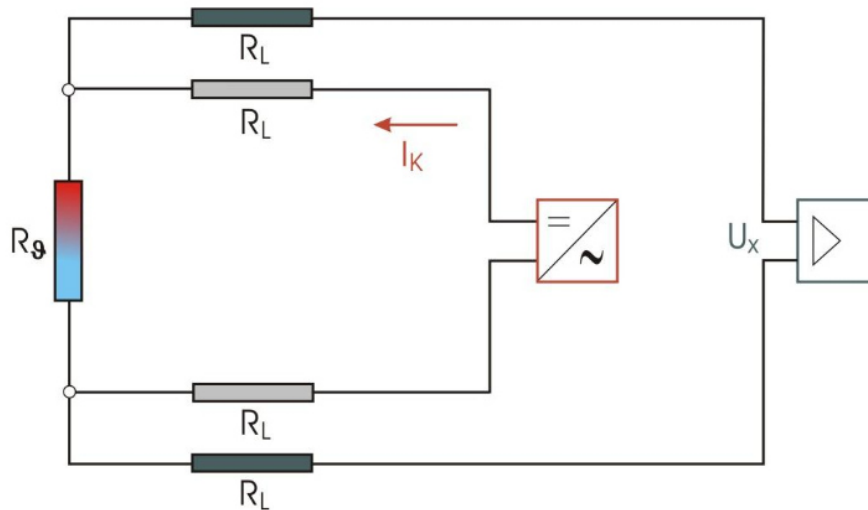


Abbildung 5: Vierleiter-Schaltung mit Konstantstromquelle [HTW-Berlin, 2018]

Eigenerwärmung

Sobald ein Strom durch einen elektrischen Widerstand fließt, erwärmt sich dieser. Bei einem Widerstandsthermometer ist es nicht anders. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass der Strom möglichst gering ist, damit die Eigenerwärmung des Widerstandes nahezu vernachlässigt werden kann. In Tabelle 4 sind die von Herstellern typisch empfohlenen Stromstärken für verschiedene Messbereiche aufgelistet.

Tabelle 4: Empfohlene Messströme für Pt-Sensoren [Heraeus, 2018]

Messbereich in Ω	Bereich der Mess-Ströme
100 Ω	0,3 mA bis max. 1,0 mA
500 Ω	0,1 mA bis max. 0,7 mA
1.000 Ω	0,1 mA bis max. 0,3 mA
2.000 Ω	0,1 mA bis max. 0,3 mA
10.000 Ω	0,1 mA bis max. 0,25 mA

2.4 Berührungslose Temperatursensoren

Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15^{\circ}\text{C}$ (= 0 Kelvin) hat, sendet proportional zu seiner Eigentemperatur elektromagnetische Strahlung (Eigenstrahlung) aus. Es ist aus dem alltäglichen Leben bekannt, dass ein erwärmter Körper eine Strahlung aussendet. Bei höheren Temperaturen kann diese bereits durch den Wärmesinn der Haut wahrgenommen werden. Ab ca. 500°C ist ein schwaches grau-weißes Leuchten des Körpers bemerkbar. Mit weiter steigender Temperatur geht das Leuchten in Rotglut, Gelbglut und Weißglut über. Ein Teil der elektromagnetischen Strahlung ist die Infrarotstrahlung. Diese ermöglicht es, die Temperatur des Körpers berührungslos zu messen und erstreckt sich auf das elektromagnetische Spektrum von $0,7 - 14 \mu\text{m}$ Wellenlänge (Abb. 6). [Miosga, 1980]

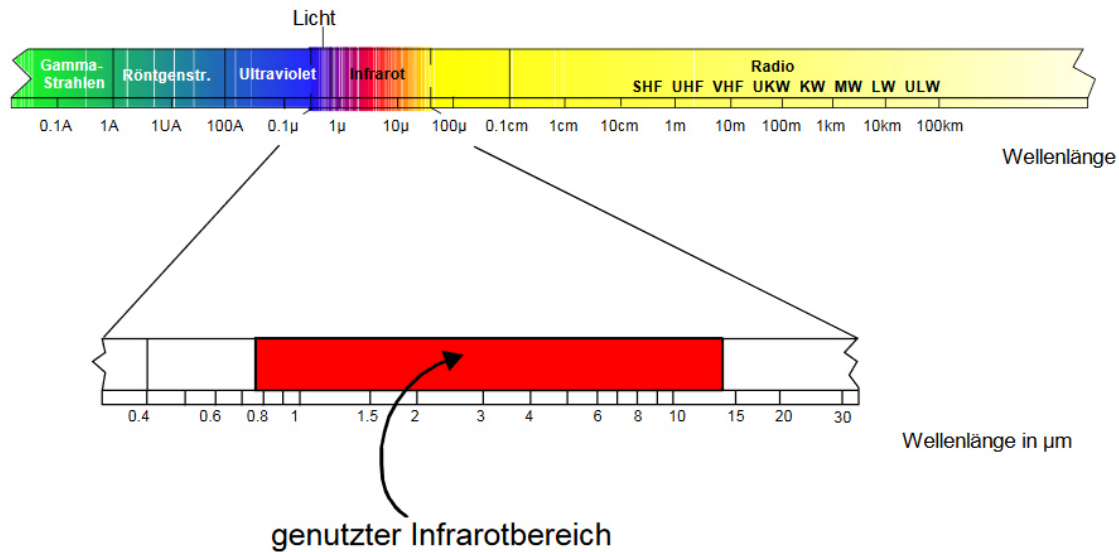


Abbildung 6: Das elektromagnetische Spektrum mit dem genutzten Infrarotbereich [Raytek, 2018]

Messprinzip

Die Infrarotstrahlung wird mit einer Linse (Optik) auf ein Detektorelement (Sensor) fokussiert. Das Detektorelement erzeugt ein, zur Strahlung proportionales, elektrisches Signal. Mit Hilfe der Elektronik wird das Signal verstärkt und auf dem Display als die Objekttemperatur angezeigt oder als analoges Signal ausgegeben (Abb. 7). [Miosga, 1980]

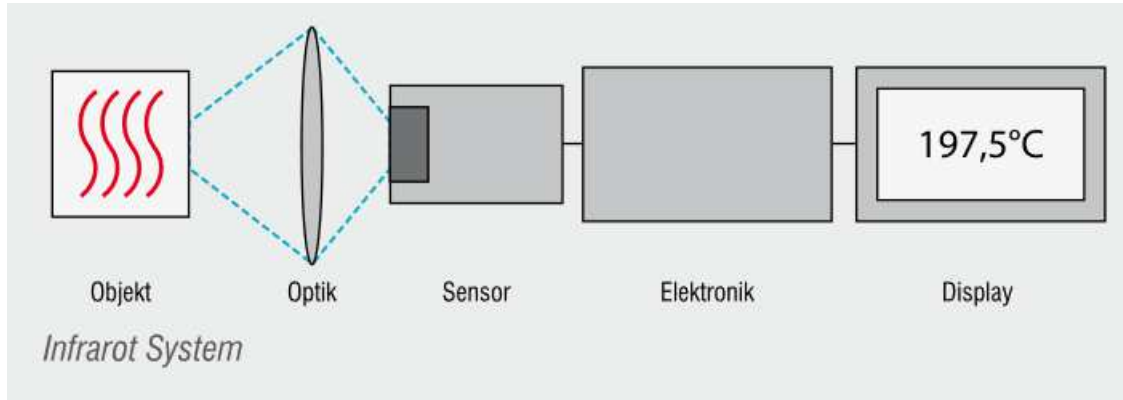


Abbildung 7: Aufbau einer berührungslosen Temperaturmessung [Miosga, 1980]

2.5 Newtonsches Abkühlungsgesetz

Sobald sich ein Körper auf einer Temperatur T befindet, die höher als die Umgebungstemperatur T_u ist, kühlt sich der Körper durch die gleichzeitige Wirkung von Wärmeleitung, -Konvektion und -Strahlung, zusammengefasst im Abkühlungskoeffizienten K , ab. Die Abkühlungskurve $T(t)$ ist eine monoton abfallende Exponentialfunktion (Abb. 8). Der Verlauf entsteht aufgrund der Energiebilanz, bzw. dem Drang der Natur zum thermodynamischen Gleichgewicht.

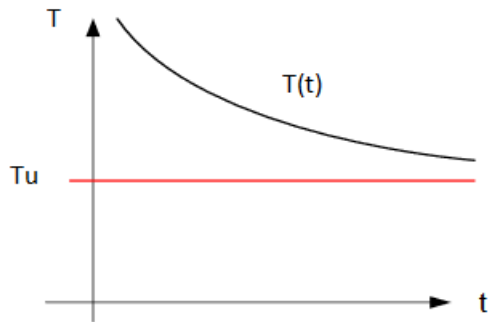


Abbildung 8: Newtonsche Abkühlungskurve

Das Newtonsche Abkühlungsgesetz ist wie folgt definiert:

$$T'(t) = T(t) - T_u = (T(t_0) - T_u) \cdot e^{-K/C \cdot t} \quad (3)$$

mit

$T'(t)$	Differenztemperatur zwischen $T(t)$ und T_u
$T(t)$	Messtemperatur in K
$T(t_0)$	Ausgangstemperatur in K
T_u	Umgebungstemperatur in K
K	Abkühlungskoeffizient
C	Wärmekapazität als Produkt aus Masse m und spezifische Wärmekapazität c in J/K

Die Gleichung beschreibt den zeitlichen Temperaturverlauf eines erwärmten Körpers, der durch die konstante Umgebungstemperatur abgekühlt wird. [TU-Dresden, 2003]

2.6 Zusammensetzung eines Solarmoduls

Ein Solarmodul setzt sich aus mehreren, meist in Serie geschalteten Solarzellen zusammen, dem sogenannten Strang. Die Solarzellen werden normalerweise aus mono- oder polykristallinem Silizium, einem Halbleiter, hergestellt. Für den Schutz der Solarzellen vor Korrosion werden sie in zwei Ethyl-Vinyl-Acetat (EVA) Folien eingebettet. Auf die vordere Seite der Solarzellen kommt eine Glasplatte, als Schutz vor Umwelteinflüssen und für eine bessere Stabilität. Auf die Rückseite der Solarzelle können verschiedene witterungsresistente Kunststoffverbundfolien geklebt werden, z.B. PET, KPE, TPT etc. oder eine weitere Glasplatte (Glas – Glas Module). Um den Modulen mit der Folie auf der Rückseite die benötigte Montagestabilität zu geben, werden diese in einen Aluminiumrahmen montiert (siehe Abb. 9). [Mertens, 2018]

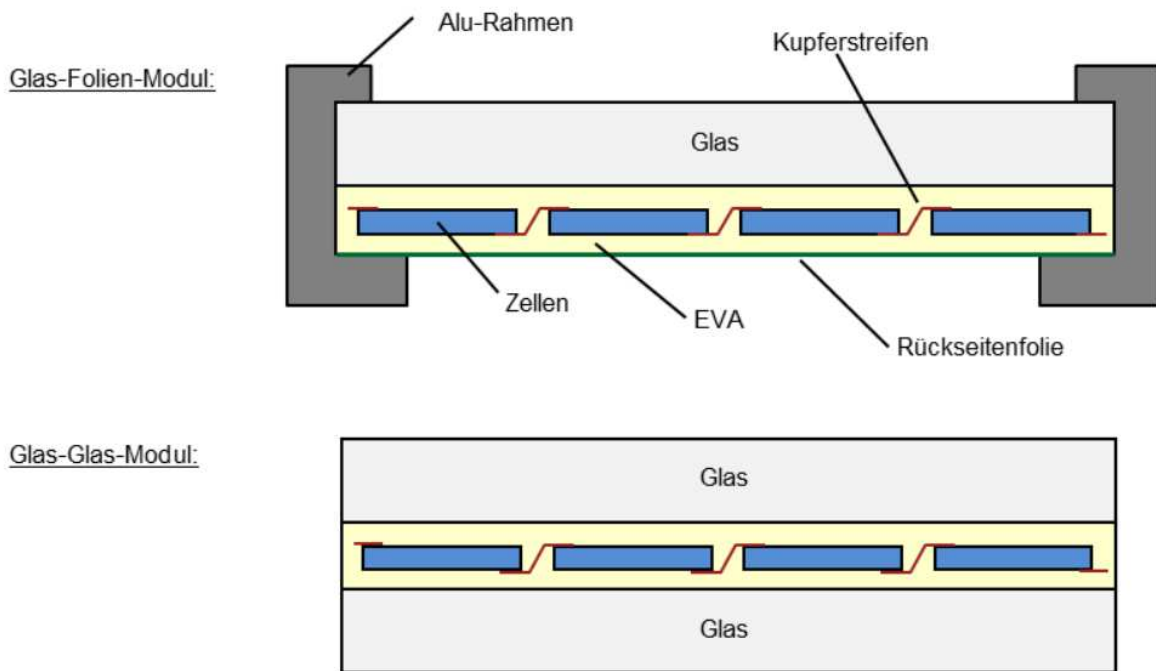


Abbildung 9: Aufbau eines Glas-Folien- / Glas-Glas Moduls [Mertens,2018]

Temperaturabhängigkeit

Mit steigender Temperatur in einem Halbleiter kommt es zu einer verstärkten thermischen Bewegung der eingebauten Elektronen im Kristallgitter. Je stärker die thermische Bewegung, desto mehr Elektronen werden aus ihren Bindungen gerissen und gelangen ins Leitungsband. Dies führt zu einer Steigung der Eigenleitendichte, welche zu einer Erhöhung des Sättigungsstroms in Sperrrichtung führt. [Mertens, 2018].

Da die meisten Solarzellen normalerweise aus dem Halbleiter Silizium hergestellt werden, sind diese demzufolge ebenfalls temperaturabhängig. Die Leistung einer Solarzelle wird aus dem Produkt des Stroms und der Spannung berechnet. Damit ist diese ebenfalls temperaturabhängig.

Aufgrund der erhöhten thermischen Energie sinkt der Bandabstand des Halbleiters. Als Folge sind nun auch Photonen mit geringer Energie in der Lage Elektronen ins Leitungsband zu heben, was zur Erhöhung des Photostroms führt. Der Kurzschlussstrom ist proportional zum Photostrom, dies bedeutet eine Zunahme des Kurzschlussstroms bei steigender Temperatur. Durch die Erhöhung des Sättigungsstroms in Sperrrichtung, verringert sich die Diffusionsspannung im p-n-Übergang. In Abbildung 10 sind Kennlinien einer monokristallinen Si-Solarzelle bei 25°C dargestellt. Zu beachten bei dieser Abbildung, ist die gleichbleibende Temperatur bei sich ändernder Bestrahlungsstärke. Der Abbildung ist deutlich zu entnehmen, dass sich der Strom proportional zu der Bestrahlungsstärke ändert, während die Spannung sich nur geringfügig ändert. [Häberlin, 2007]

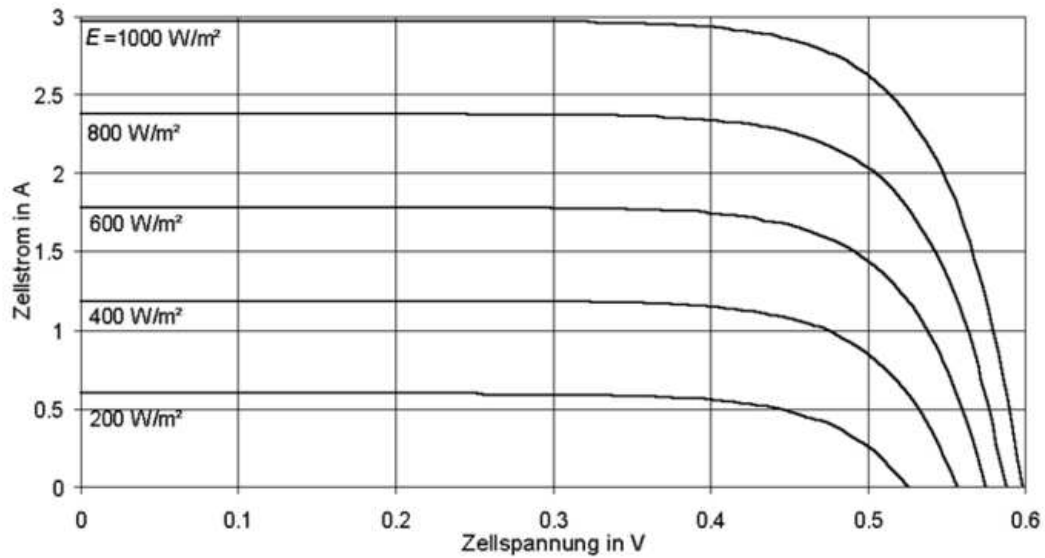


Abbildung 10: I/U-Kennlinien bei verschiedenen Bestrahlungsstärken und konstanter Temperatur [Häberlin, 2007]

In Abbildung 11 sind die I-U-Kennlinien einer typischen Solarzelle bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Den Verläufen ist deutlich zu entnehmen, dass der Kurzschlussstrom, mit steigender Temperatur, langsamer steigt, als die Leerlaufspannung sinkt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Kurzschlussstrom sich proportional zur Bestrahlungsstärke ändert und dass die Leerlaufspannung deutlich stärker von der Temperatur beeinflusst wird, als der Strom. [Häberlin, 2007]

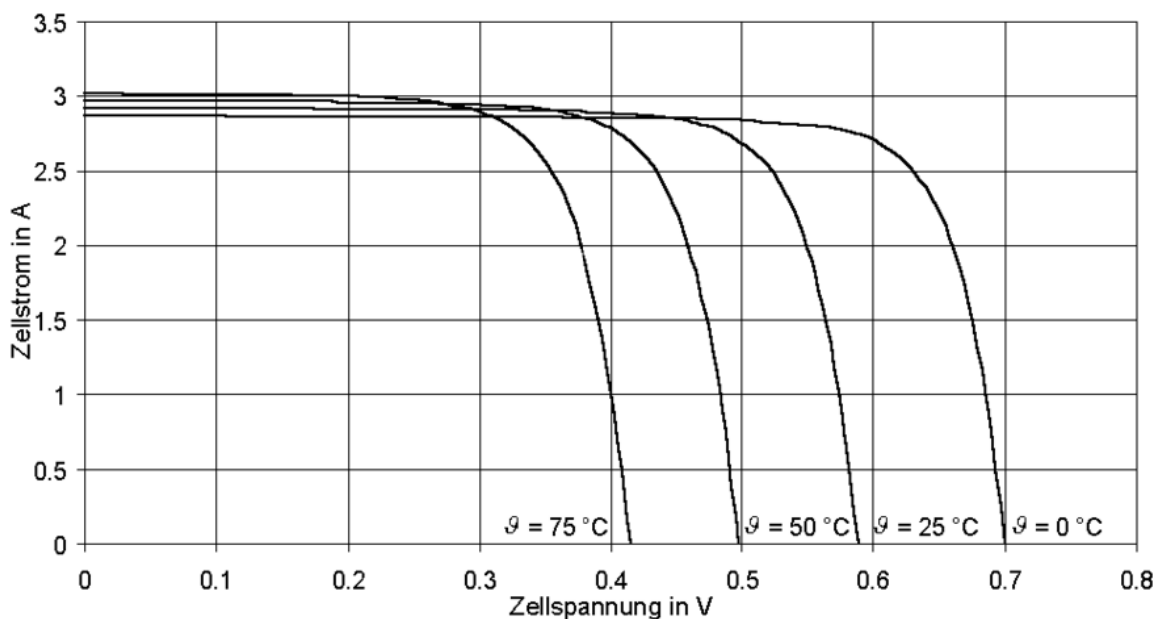


Abbildung 11: I/U Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen und konstanter Bestrahlungsstärke [Häberlin, 2007]

Die Temperaturabhängigkeit von Strom und Spannung wird auch als Temperaturkoeffizient (T_K) bezeichnet. Dieser wird in Datenblättern üblicherweise bei 25 °C angegeben. Für viele Berechnungen ist die Annahme einer linearen Abhängigkeit des Stroms, der Spannung und der Leistung von der Temperatur ausreichend genau. Mit der linearen Abhängigkeit kann die Leerlaufspannung auch für verschiedene Temperaturen wie folgt berechnet werden:

$$U_{OC}(\vartheta_2) = U_{OC}(\vartheta_1) \cdot (1 + T_K \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) \quad (4)$$

mit

ϑ Temperatur in °C

Analog kann auch der Kurzschlussstrom berechnet werden. Der Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung hat ein negatives Vorzeichen, weil diese mit steigender Temperatur sinkt und der Temperaturkoeffizient des Kurzschlussstroms hat ein positives Vorzeichen, weil dieser mit steigender Temperatur steigt (siehe Abb. 11). Wie oben bereits erwähnt, ist die Leistung als das Produkt aus Strom und Spannung definiert. Da die Leerlaufspannung stärker sinkt als der Kurzschlussstrom steigt, hat diese auch einen größeren Einfluss auf die Leistung. Daraus folgt, dass das Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten der Leistung ebenfalls negativ ist. [Quaschnig, 2009]

3 Experimenteller Aufbau

3.1 „Klima-Box“

Um den Temperaturkoeffizienten eines Solarmoduls bzw. einer einzelnen Solarzelle zu bestimmen, wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine „Klima-Box“ entworfen und konstruiert (siehe Abb. 12). Die Klima-Box hat die Maße 2,05 m · 1,65 m · 0,65 m und besteht aus OBS-Platten. Im Innenraum wird sie, um eine möglichst geringe Temperaturentweichung zu gewährleisten, von allen Seiten mit einer 5 cm dicken Schicht Styropor isoliert. Die Lücken zwischen den Styroporplatten werden mit einem handelsüblichen Schnellmontageschaum verdichtet. Für die Befestigung des genutzten Moduls (siehe Kap. 3.2) werden Halterungen in der Mitte der Klima-Box montiert (Abb. 12, 1 & 3). Diese sollen das Modul stabilisieren und für eine fixierte Position sorgen.

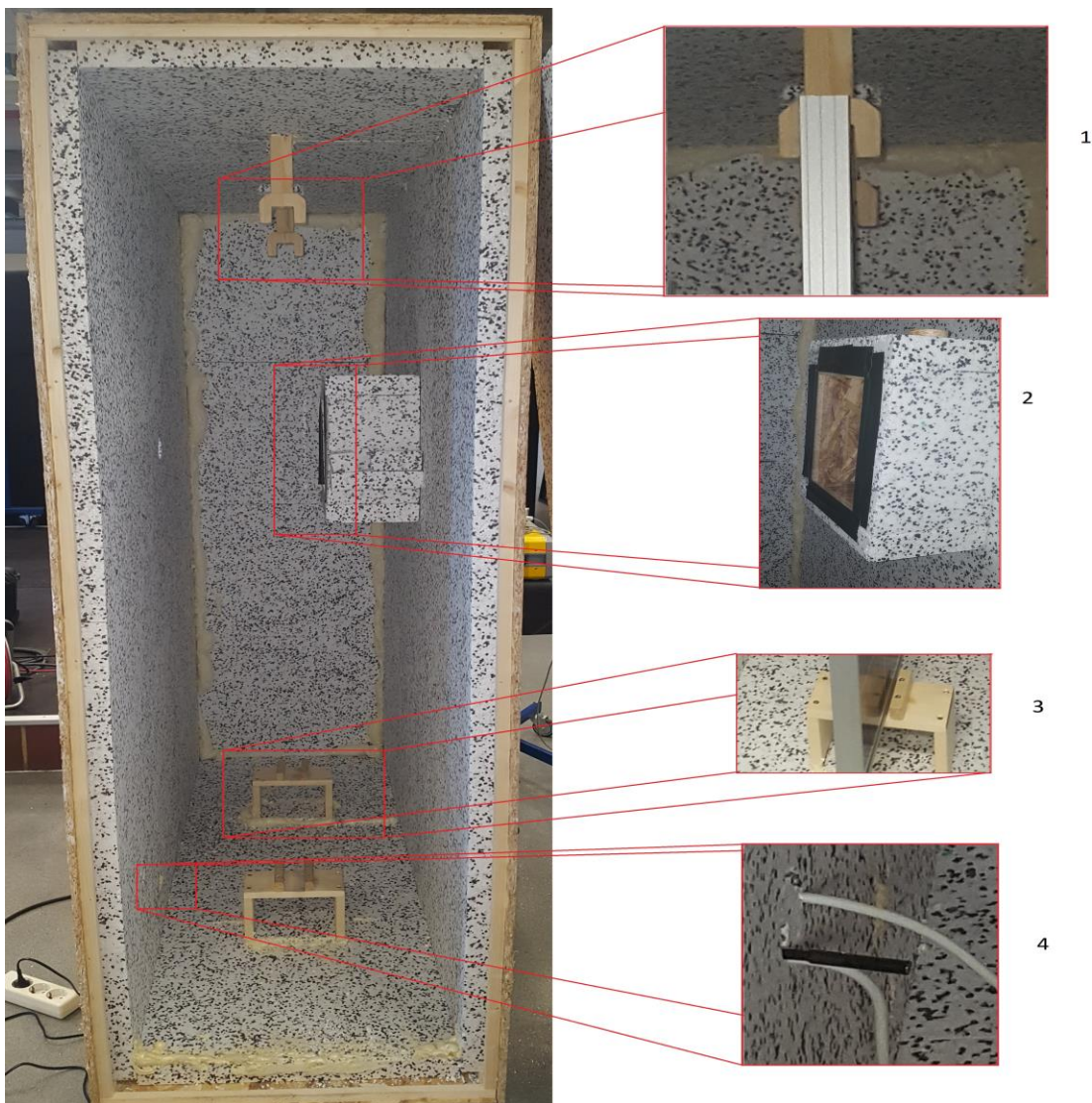


Abbildung 12: Ausstattung der Klima-Box

Für eine Kabeldurchführung werden an der Rückseite der Klima-Box zwei Öffnungen gebohrt (Abb. 13). Die Öffnungen werden mit einem runden Styroporzylinder isoliert. In den Zylinder werden zusätzliche kleinere Kabelkanäle eingeschnitten, damit die Kabel die Isolation so gering wie möglich beeinflussen.



Abbildung 13: Kabelausführung durch die Rückseite der Klima-Box

An der Vorderseite befindet sich ein Fenster der Größe 19 cm · 26 cm. Dieses Fenster ist exakt auf die zu messende Zelle ausgerichtet und hat 6cm Abstand zur Zelle, bzw. zum Modul. Um den Wärmestrom, der durch das Fenster entweichen würde, zu reduzieren, wird in das Fenster eine Plexiglasscheibe installiert. Diese verkleinert nicht nur den Wärmeverlust, sondern ermöglicht auch die Beleuchtung der zu messenden Zelle von außen (siehe Abb. 14). Außerhalb der Messzeiten ist das Fenster zusätzlich durch ein passendes Stück Styropor isoliert, um den Wärmeverlust weiter zu senken.



Abbildung 14: Fenster mit Plexiglasscheibe von Innen / Außen

Während der Aufheizung der Klima-Box wird mit einer Thermographiekamera überprüft, wie gut diese isoliert ist und ob es kritische Stellen gibt. Die Klima-Box weist eine ausreichend gute und homogene Wärmeisolierung mit nur geringen Wärmeverlusten am Fenster und den Kabelkanälen auf.

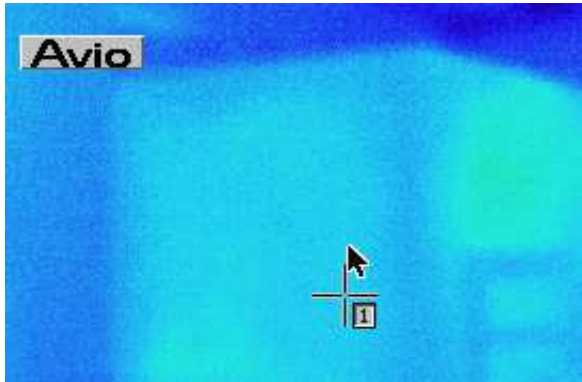


Abbildung 15: Wärmebild der Klima-Box (Seite)

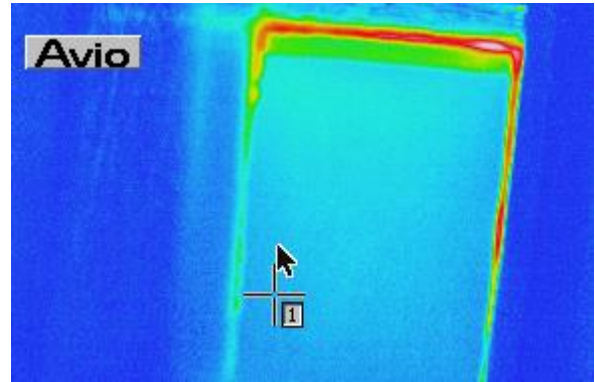


Abbildung 16: Wärmebild der Klima-Box (Fenster)

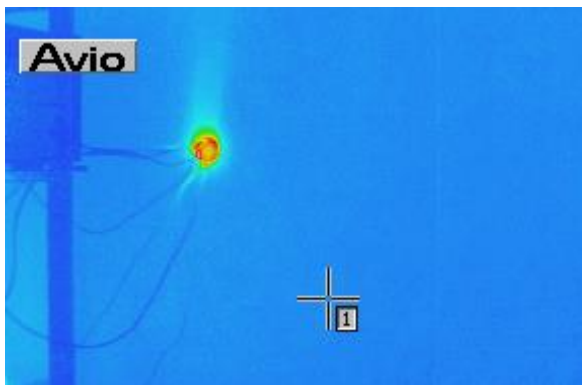


Abbildung 17: Wärmebild der Klima-Box (hinten)

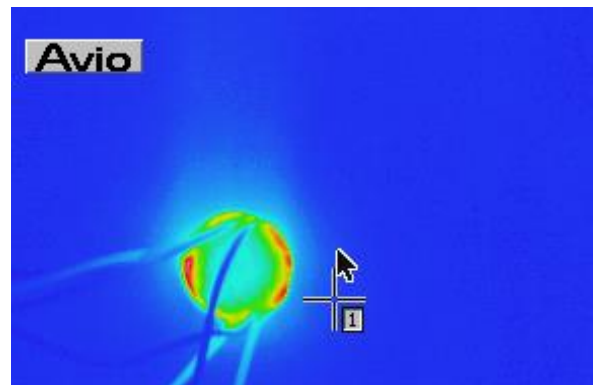


Abbildung 18: Wärmebild der Kabeldurchführung

3.2 Messinstrumente und Zubehör

Solarzelle

Bei der verwendeten Solarzelle handelt es sich um eine Zelle aus einem TALESUN TP660P 270 Wp Modul (Abb.19). Das Modul misst 1640 mm · 990 mm · 40 mm und wiegt 19 kg. Es ist aus 60 einzelnen polykristallinen, in Reihe geschalteten, 156 mm · 156 mm großen Zellen zusammengesetzt. Das Modul hat laut Datenblatt eine positive Leistungstoleranz von bis zu 3 % und die folgenden Temperaturkoeffizienten: Leistung: $-0,45 \text{ %/}^\circ\text{C}$, Kurzschlussstrom: $+0,05 \text{ %/}^\circ\text{C}$, Leerlaufspannung: $-0,35 \text{ %/}^\circ\text{C}$.



Abbildung 19: TALESUN Modul TP660P [Talesun, 2018]

Modifizierung der Solarzelle

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird die Temperaturdifferenz der Zelle und der gemessenen Temperatur an der Rückseitenfolie ermittelt. Da ein Modul dieser Größe den Versuchsaufbau auf verschiedenen Ebenen verkomplizieren und vergrößern würde, wird das Modul so präpariert, dass nur eine Zelle des gesamten Moduls für den Versuchsaufbau genutzt werden kann. Als Erstes wird, auf Basis eines für das verwendete Modul bereits vorliegenden Elektrolumineszenzberichtes der Firma MJB für das verwendete Modul, eine fehlerfreie Solarzelle ausgesucht (von oben: vierte Zeile, vierte Spalte) (A.2). Diese Zelle muss zunächst vorsichtig von den vor und hinter ihr in Reihe geschalteten Zellen getrennt werden. Durch das Entfernen der

Rückseitenfolie zwischen den Zellen werden, die Busbar-Kontakte, welche die Zellen miteinander verbinden, freigelegt (siehe Abb. 20).

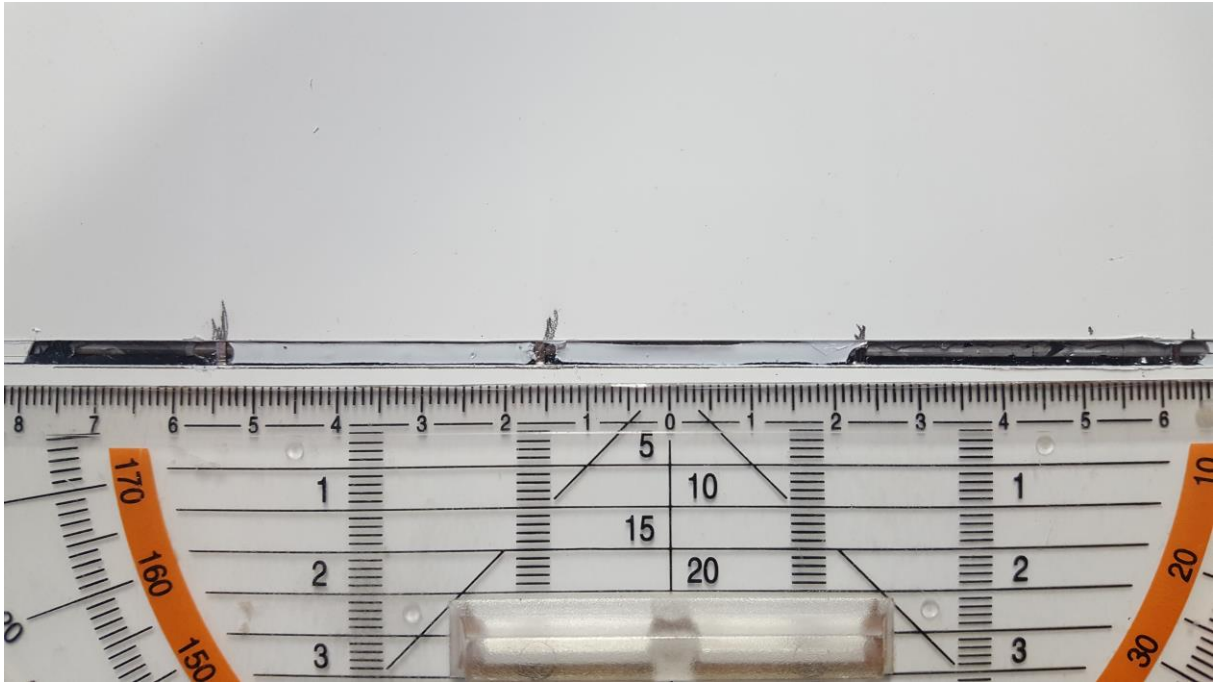


Abbildung 20: Freigelegte Busbar-Kontakte an der Rückseite des Talesun Moduls

Die Kontakte werden getrennt und anschließend mit einer Messleitung verlötet (Abb. 21). So ist die Versuchszelle nun von dem Rest des Moduls abgeschnitten / isoliert und nicht mehr mit den anderen Zellen in Reihe geschaltet. An den verlöteten Kabeln kann nun die Spannung, die über der Versuchszelle anliegt, erfasst werden.

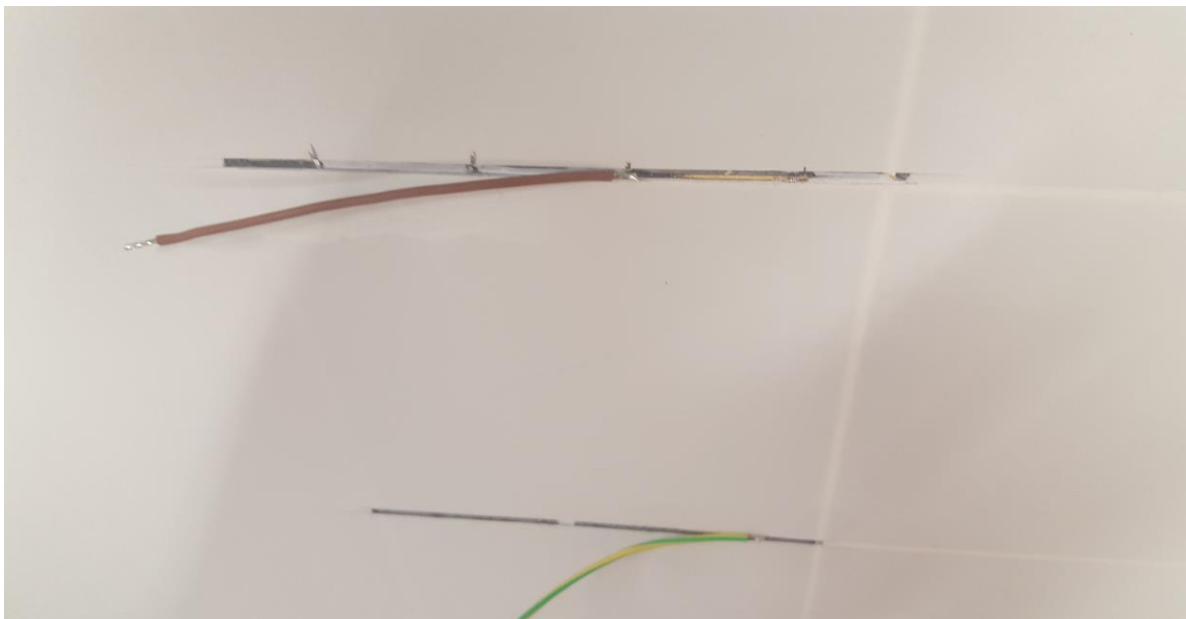


Abbildung 21: Getrennte Busbar-Kontakte und angelötete Leitungskabel

Bestrahlungsquelle

Für eine konstante und fokussierte Bestrahlung wird das YN600L LED Video Light von YONGNUO gewählt (Abb. 22). Mit 600 lichtstarken LEDs werden Bestrahlungswerte über 600 W/m^2 erreicht (siehe Kap. 4.3). Die LEDs sind auf einer Fläche von $23 \text{ cm} \cdot 16 \text{ cm}$ verteilt und bestrahlen damit eine größere Fläche, als die zu messende Zelle ($156 \text{ mm} \cdot 156 \text{ mm}$).



Abbildung 22: YONGNUO YN600L Vor- / Rückseite [Yonguo, 2018]

Das YN600L hat die Möglichkeit der Dimmung der Intensität. Durch die Einstellmöglichkeit zwischen 1 und 99 können verschiedene Intensitäten und damit auch verschiedene Bestrahlungsstärken simuliert / eingestellt werden. Das YN600L liefert eine konstante Lichtstärke mit einem für die Solarzelle nutzbaren Lichtspektrum (siehe Kap. 4.3).

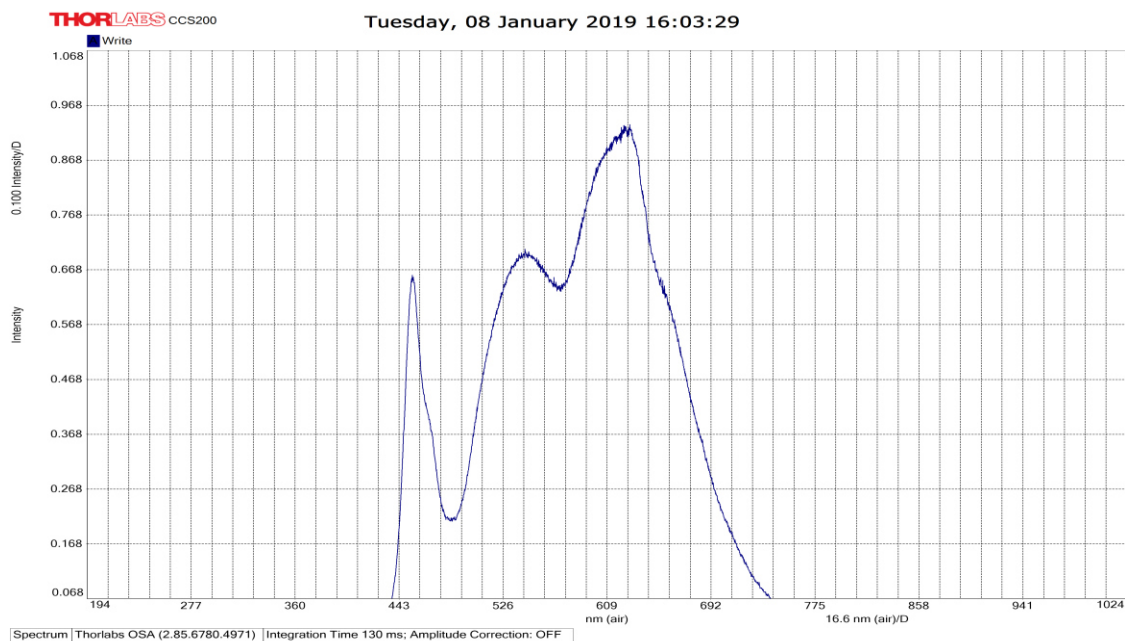


Abbildung 23: Lichtspektrum des LED-Panels

Bestrahlungssensor

Für die Erfassung der Bestrahlungsstärke wird der Einstrahlungssensor SOZ-03 des Herstellers NES verwendet und mithilfe des PVPM1000C des Hersteller pve ausgewertet (Abb. 24).



Abbildung 24: PVPM1000C [Pve, 2018] mit Einstrahlungssensor [NES, 2018]

Multimeter und Konstantstromquelle

Als Spannungsmessgerät für die Pt-1.000 und Pt-100 Sensoren wird das Multimeter KEITHLEY 2.000 des Herstellers Keithley verwendet (Abb. 25). Für die Pt-300N Sensoren wird das SOLAR-02 des Herstellers HT-Instruments genutzt (Abb. 26).



Abbildung 25: KEITHLEY-2.000 [Keithley, 2019]



Abbildung 26: SOLAR-02 [HT, 2019]

Um eine Spannung an den Pt-Sensoren messen zu können, benötigen diese eine Konstantstromquelle. In dieser Arbeit wird das DIGISTAND Typ 4411 dazu genutzt, um den erforderlichen konstanten Strom zu liefern. Es werden jeweils die in Kap. 2.3.2 empfohlenen Stromstärken bei den Messungen verwendet, um die Eigenerwärmung der Sensoren vernachlässigen zu können.



Abbildung 27: Digistand 4411 [Digistand, 2019]

Temperatursensoren

Für die Temperaturerfassung werden insgesamt zehn Sensoren verwendet. Jeweils zwei Pt-100, Pt-1.000 (Abb. 28), Pt-300N (Abb. 50, rechts) und vier Thermoelemente des Typs K. Bei den Pt-300N Sensoren handelt es sich um Pt-300N Sensoren des Herstellers HT-Instruments [HT, 2019]. Diese werden in der Feldmessung für die Temperaturerfassung genutzt und sollen in dieser Arbeit einen Vergleich liefern. Die Temperatur wird mithilfe des SOLAR-02 aufgenommen. Für die anderen Platin-Widerstände wird eine Vierleiterschaltung realisiert (siehe Kap. 2.3.2) und mithilfe einer Konstantstromquelle ein konstanter Strom angelegt. Mit einem Multimeter wird die Spannung aufgenommen und in eine Temperatur umgerechnet. Die beiden Thermoelemente werden an einen Thermoelement-Verstärker des Herstellers I.E.D angeschlossen. Die gemessene Spannung wird mithilfe der Software DIAdem in Temperatur umgerechnet.



Abbildung 28: Pt-100 [Heraeus2, 2018]



Abbildung 29: Thermoelement Typ K [Testo, 2018]

Fehlerberechnung:

Laut Datenblatt gehören beide Pt-Sensoren der Genauigkeitsklasse A an [A.2]. Für die Grenzabweichung dieser Genauigkeitsklasse gilt nach der Norm DIN EN 60751 die folgende Formel:

$$t_g = 0,1 \text{ °C} + 0,002 \cdot t \quad (5)$$

Für eine Temperatur von 25 °C ergibt sich dadurch folgender Fehler für die Pt-Sensoren:

$$t_g = 0,1 \text{ °C} + 0,002 \cdot 25 \text{ °C} = 0,15 \text{ °C}$$

Summiert mit dem Fehler des KEITHLEY 2000 Multimeters (A.2), von umgerechnet 0,001 °C, ergibt sich ein Gesamtfehler von $\pm 0,151 \text{ °C}$ für Messungen mit den Pt-1.000-, bzw. Pt-100-Sensor.

Die Pt-300N, welche über die SOLAR-02 ausgewertet werden, haben laut Datenblatt eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ des abgelesenen Wertes $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für eine Temperatur von $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt es einen Fehler von $\pm 1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nach der DIN EN 60584-1 darf das Thermoelement Typ K einen Fehler von $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufweisen. Da der Temperaturkoeffizient mithilfe der Thermoelemente bestimmt wird, ist der zugelassene Fehler für diese Arbeit unzureichend genau, deshalb werden die Thermoelemente in Kap. 4.1 neu kalibriert.

Heizlüfter

Um die Klima-Box zu erwärmen, werden zwei handelsübliche Heizlüfter verwendet. Beide Heizlüfter verfügen über zwei Heizstufen. Die Leistung beträgt je nach Heizstufe 1.000 W oder 2.000 W . Ebenfalls verfügen beide Heizlüfter über eine Kaltstufe, welche die Verwendung als gewöhnliche Ventilatoren ermöglicht. Als Absicherung gegen Überhitzung, besitzen beide Heizlüfter einen Übertemperaturschutz und eine Kippsicherung an der Unterseite.

Überwachungskameras

Für die Überwachung des Innenraumes während der Erwärmung auf bis zu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird eine Endoskopiekamera des Herstellers Voltcraft verwendet (Abb. 30). Diese Kamera ist eine Sicherheitsmaßnahme, damit im Innenraum kein unbemerkter Brand ausbrechen kann. Die Installation der Endoskopiekamera erfolgte durch einen der beiden Kabelkanäle und wird wie ein Kabel in die Klima-Box geleitet. Die Visualisierung wird über ein Huawei Tablet mit der entsprechenden Software realisiert.



Abbildung 30: Voltcraft Endoskopiekamera: BS-21 HD USB-Endoskop [Voltcraft, 2018]

Für die Isolierungskontrolle und die Temperaturüberwachung des Moduls im zweiten Versuchsaufbau, wird eine „Coratec TVS 200“ Thermokamera des Herstellers Handy Thermo verwendet.



Abbildung 31: Coratec TVS 200 [Coratec, 2018]

Wärmethermometer

Für die Kalibrierung im Wasserbad wird das Wärmethermometer EcoSilver des Herstellers Lauda verwendet (Abb. 32).



Abbildung 32: Lauda EcoSilver [Lauda]



Abbildung 33: P-795 Referenz-Thermometer [P795]

Während der Kalibrierung wird das P – 795 Referenz – Thermometer als Referenzthermometer verwendet (Abb. 33).

4 Vorbereitende Messungen

4.1 Kalibrierung der Thermoelemente

Ein Thermoelement des Typs K und der Klasse 1 hat, nach der DIN EN 60584-2, eine maximale Abweichung von $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Kap. 2.3.1). Dies ist für diese Arbeit nicht akzeptabel. Deshalb werden die verwendeten Thermoelemente im Rahmen dieser Bachelorarbeit im HAW- Labor für Automatisierungstechnik neu kalibriert.

Die Kalibrierung wird erst durchgeführt, nachdem der gesamte Messaufbau samt Verkabelung und Messgeräten feststeht. Damit werden Einflussgrößen wie Leitungswiderstände, Messgerätabweichungen, usw. nicht mehr verändert und fließen in die Kalibrierung mit ein.

4.1.1 Versuchsaufbau

Für die Kalibrierung der Thermoelemente wird ein Wasserbad mit ionisiertem Wasser verwendet. Die Erwärmung und Konstanthaltung der Temperatur erfolgt mit dem Wärmethermostat EcoSilver (siehe Kap. 3.2). Obwohl das Thermostat bereits eine Temperaturkonstanz von $\pm 0,01 \text{ K}$ laut Datenblatt besitzt, wird die Temperatur noch zusätzlich mit dem Referenzthermometer P – 795 mit einer Genauigkeit von $\pm 0,015 \text{ K}$, überwacht (siehe Kap. 3.2). Die vier Thermoelemente werden mit dem Referenzthermometer, wie in Abbildung 34 dargestellt, in das Wasserbad eingetaucht.

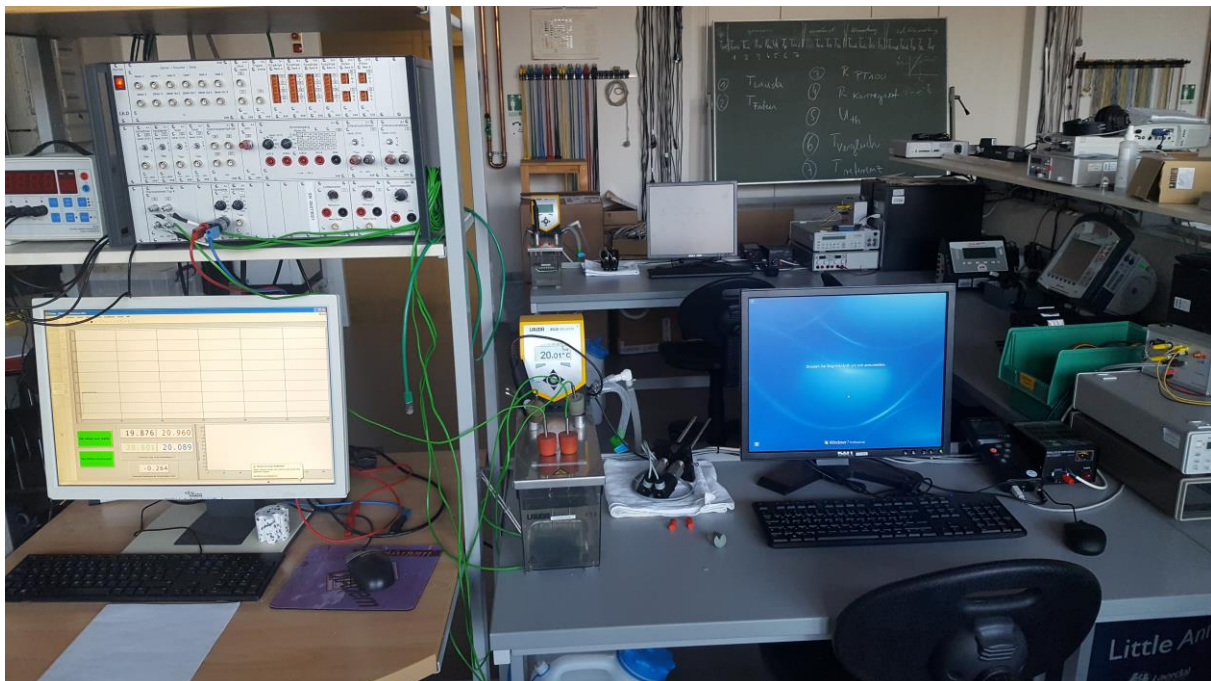


Abbildung 34: Versuchsaufbau Kalibrierung

4.1.2 Versuchsdurchführung

In 5 °-Schritten werden von 25 °C bis 65 °C neun verschiedene Temperaturen aufgezeichnet. Nach jeder Temperaturänderung wird sichergestellt, dass sich die Temperatur des Referenzsensors um nicht mehr als 1/100 °C ändert, bevor die Messungen durchgeführt werden. Die Einstellung der Homogenisierung dauert durchschnittlich ca. fünf Minuten für eine Temperaturerhöhung von 5 °C. Bei jeder Temperatureinstellung werden mehrere Messungen, mit einer Messdauer von ca. 30 Sekunden, aufgenommen.

Dieser Versuchsaufbau und die Messreihe decken gleich zwei verschiedene Risiken ab. Zum einen wird das Verhalten der Thermoelemente zueinander bei verschiedenen Temperaturen überprüft, ob sie sich unterschiedlich stark erwärmen und bei einer Temperaturdifferenz von z.B. 30 °C bereits eine Abweichung zueinander haben oder ob sich alle gleichmäßig erwärmen. Zum anderen werden die vier Thermoelemente, durch den Referenzsensor, kalibriert.

4.1.3 Bestimmung der Kalibrierfunktion

Die elektrische Messgröße eines Thermoelements ist die Spannung. Um von der Spannung auf die Temperatur zu schließen, wird in der Software DIAdem ein Multiplikationsbaustein verwendet, um aus der gemessenen Spannung einen Temperaturwert zu berechnen. Dieser Baustein erfordert einen konstanten Faktor und einen eventuellen Offset, um die Spannungswerte in Temperaturwerte umzurechnen.

Bei den Messungen werden die Spannungen bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen. Für jede Temperatur werden mehrere Messungen in Abständen von wenigen Minuten aufgenommen. Zuerst werden die Messwerte für die einzelnen Temperaturen für jedes Thermoelement gemittelt. Die Mittelwerte werden anschließend in ein Streudiagramm eingefügt. Dies ist beispielhaft für das Thermoelement 1 in Abb. 27 dargestellt (A.2).

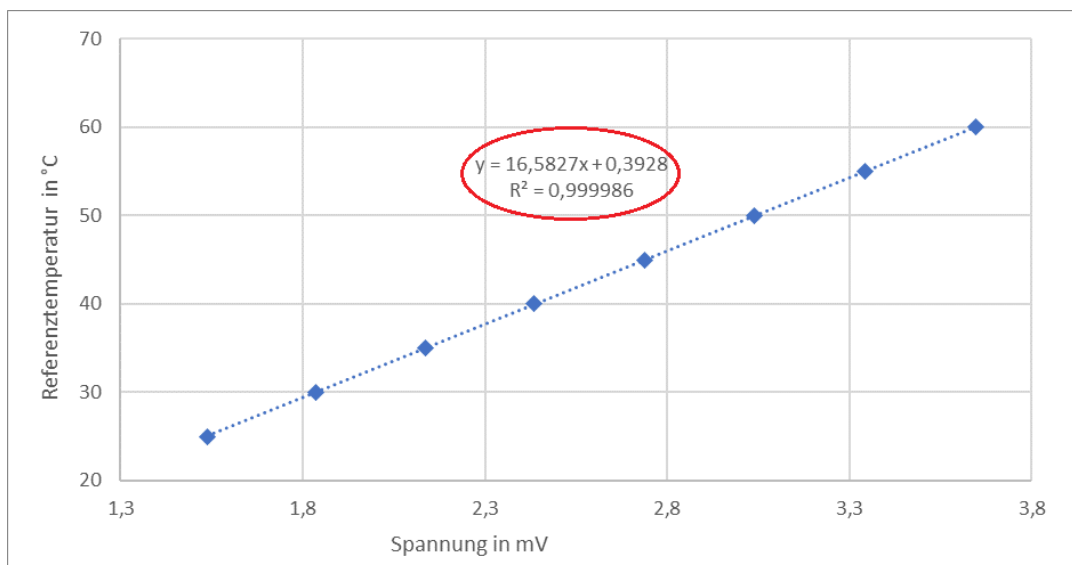


Abbildung 35: Temperatur / Spannungskennlinie des Thermoelements 1

Um nun eine zusammenhängende Funktion zu erstellen, wird eine Regressionsgerade berechnet. Diese legt eine möglichst passende lineare Funktion durch die gestreuten Messwerte. Um die Genauigkeit der Regressionsgerade zu bewerten, wird das Bestimmtheitsmaß ermittelt und jeweils in die Streudiagramme der jeweiligen Thermoelemente integriert (Abb. 35, rot markiert). Je näher das Bestimmtheitsmaß R^2 sich dem Wert 1 nähert, desto besser beschreibt die Regressionsgerade die Streuung.

Für eine lineare Funktion gilt:

$$Y(x) = ax + b \quad (6)$$

Wobei a die Steigung der Geraden und b den Offset bei $x = 0$ angibt. Dasselbe gilt für den Multiplikationsbaustein von DIAdem. Die Funktionen und das jeweilige Bestimmtheitsmaß für die Thermoelemente sind in Tab. 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Regressionsfunktionen mit Bestimmtheitsmaß

Thermoelement	Regression	Bestimmtheitsmaß
Sensor 1	$y = 16,58 \text{ °C/mV} \cdot x + 0,39 \text{ °C}$	0,999986
Sensor 2	$y = 16,78 \text{ °C/mV} \cdot x - 0,26 \text{ °C}$	0,999986
Sensor 3	$y = 16,80 \text{ °C/mV} \cdot x - 0,39 \text{ °C}$	0,999982
Sensor 4	$y = 16,78 \text{ °C/mV} \cdot x - 0,11 \text{ °C}$	0,999980

Um die maximalen Abweichungen gegenüber den gemessenen Werten zu bestimmen, werden die gemessenen Spannungswerte in die oben aufgeführten Regressionen eingesetzt und die Temperatur berechnet (Tab. 6). Anschließend werden diese mit den gemessenen Temperaturwerten des Referenzsensors (T_{ref}) verglichen und eine Differenz gebildet (Tab. 7).

Tabelle 6: Umrechnung der gemittelten Spannungswerte, sowie die absolute Abweichung zu T_{ref}

T_{ref} in °C	Mittelwertumrechnung in °C				Temperaturdifferenz in °C			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
25,00	25,06	25,05	25,08	25,08	0,06	0,05	0,08	0,08
30,00	30,02	30,03	30,00	30,01	0,02	0,03	0,00	0,01
35,00	34,98	34,98	34,97	34,97	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03
40,00	39,94	39,96	39,94	39,91	-0,06	-0,04	-0,06	-0,09
45,00	44,96	44,94	44,95	44,96	-0,04	-0,06	-0,05	-0,04
49,99	49,97	49,96	49,98	49,97	-0,02	-0,03	-0,01	-0,01
54,99	54,98	54,99	54,99	55,01	0,00	0,01	0,00	0,02
59,99	60,06	60,06	60,06	60,05	0,07	0,07	0,07	0,06
64,99	65,09	65,10	65,15	65,11	0,10	0,11	0,16	0,13

Laut Datenblatt, des Referenzsensors, hat dieser einen Fehler von $\pm 0,015 \text{ °C}$. Zusammen mit den relativen Temperaturdifferenzen ergeben sich folgende maximale Abweichungen der Thermoelemente für den Bereich von 25 °C bis 65 °C :

Tabelle 7: Genauigkeit der Thermoelemente im Bereich von 25 °C bis 65 °C

Abweichung	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
ΔT in °C	$\pm 0,11$	$\pm 0,13$	$\pm 0,18$	$\pm 0,15$

4.2 Überprüfung der thermischen Homogenität

Vor der Bestimmung des Temperaturkoeffizienten der Versuchszelle wird die Klima-Box auf die Homogenität der Temperaturverteilung getestet. Damit wird festgestellt, wie homogen das Solarmodul bzw. die Versuchszelle erwärmt wird. Das Ziel ist es, dass die Versuchszelle und ihre umliegenden Zellen die gleiche Temperatur haben.

4.2.1 Thermische Homogenität der Klima-Box

Um die thermische Homogenität in der Klima-Box zu testen, werden vier Thermoelemente in der Klima-Box wie folgt verteilt (Abb. 36, links rot markiert). Ein Sensor wird im oberen Drittel installiert und ein weiterer im unteren Drittel. Damit wird der größte Temperaturunterschied in der Klima-Box erfasst, da kalte Luft schwerer als warme Luft ist und sich am Boden sammelt, während die warme Luft nach oben steigt.

**Abbildung 36:** Homogenitätstest der Klima-Box (links) und der Versuchszelle (rechts)

Zwei weitere Sensoren werden an der Rück- bzw. Vorderseite der Versuchszelle angebracht. Hiermit wird der Temperaturunterschied von der Rück- zur Vorderseite erfasst. Vor den Messungen wird die Klima-Box auf eine Temperatur von ca. 70 °C erwärmt. Um die Homogenität während der Erwärmung weiter zu erhöhen, wird ein zusätzlicher Lüfter in der Klima-Box installiert (Abb. 36, rechts rot markiert). Dieser zirkuliert die sich erwärmende Luft und sorgt für eine homogene Erwärmung des Moduls. Nach dem Abschalten der Heizlüfter wird der zusätzliche Lüfter weiterhin betrieben, um die Temperatur weiter zu homogenisieren. Anschließend wird auch dieser abgeschaltet und die Klima-Box kühlt sich, ohne weitere Einflüsse, auf Raumtemperatur (24°C) ab (Abb. 37).

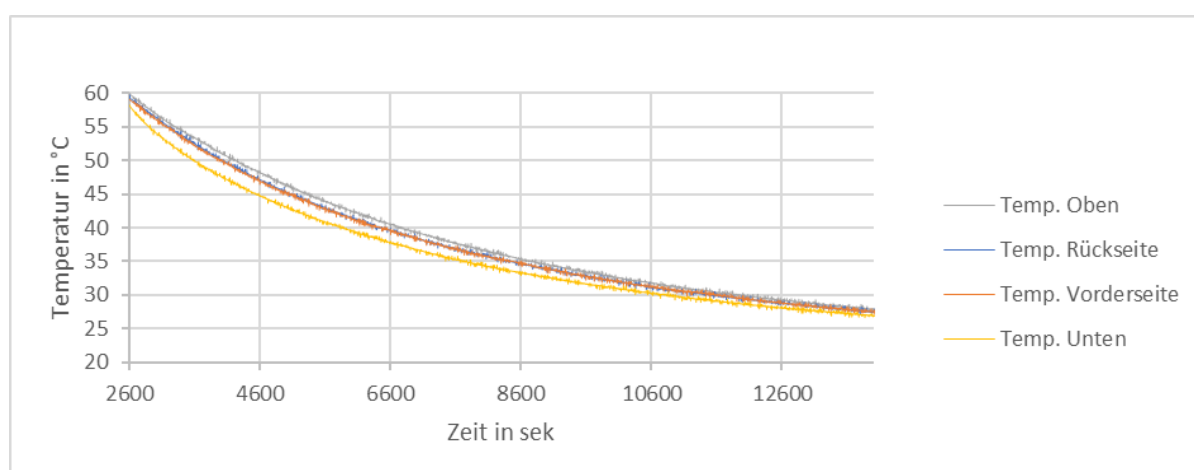


Abbildung 37: Abkühlungskurven der in der Klima-Box

Den Verläufen der Grafik kann entnommen werden, dass es eine deutliche Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und unteren Drittel der Klima-Box gibt. In der folgenden Tabelle 8 sind einige Vergleichsmessungen beispielhaft dargestellt. In der fünften Spalte ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Sensor im oberen und dem Sensor im unteren Drittel aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass sich die beiden Temperaturen nahe der Raumtemperatur kaum unterscheiden, allerdings gibt es eine deutliche Temperaturdifferenz in den hohen Temperaturbereichen. In Werten ausgedrückt herrscht eine Temperaturdifferenz von bis zu 3,4 °C in der Klima-Box.

Tabelle 8: Temperaturvergleich des Homogenitätstests der Klima-Box

Temperatur des Sensors in °C				
1 (oben)	2 (Folie)	3 (Glas)	4 (unten)	ΔT 1 zu 4
55,69	55,13	54,90	52,73	2,97
51,51	50,61	50,38	48,10	3,41
46,02	44,98	44,86	42,78	3,23
41,04	40,11	40,10	38,36	2,68
36,00	35,30	35,28	33,84	2,16
30,90	30,42	30,48	29,60	1,30
25,09	24,84	25,00	24,59	0,50

Eine solch hohe Temperaturdifferenz ist für eine Bestimmung des Temperaturkoeffizienten eines Moduls nicht geeignet. Allerdings kann den Verläufen auch entnommen werden, dass die Temperaturverläufe an der Rück- und Vorderseite der Versuchszelle sich durchgehend überschneiden und nur um wenige zehntel Grad voneinander abweichen.

4.2.2 Thermische Homogenität an der Zelle

Da in dieser Arbeit der Temperaturkoeffizient einer einzelnen Zelle bestimmt werden soll und die Temperaturhomogenität an der Zelle aus dem vorherigen Versuch vielversprechend aussieht, wird ein weiterer Homogenitätstest durchgeführt, der sich nur noch auf die Versuchszelle konzentriert. Dafür werden die vier Sensoren, wie in Abbildung 38 dargestellt, an der Versuchszelle angebracht.

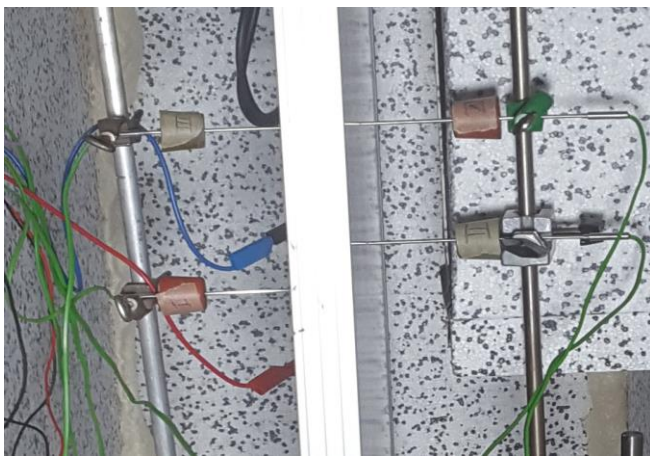


Abbildung 38: Positionierung der Sensoren an der Versuchszelle

Anschließend wird die Klima-Box, wie im vorherigen Versuch, auf eine Temperatur von ca. 70 °C erwärmt und kühlt sich danach wieder auf Raumtemperatur (24 °C) ab. Der Abkühlvorgang der Sensoren ist in Abb. 39 dargestellt. Während die Temperaturdifferenz in der gesamten Klima-Box relativ groß ist (siehe Kap. 4.2.1), verhält sich die Temperatur um die Versuchszelle ausreichend homogen.

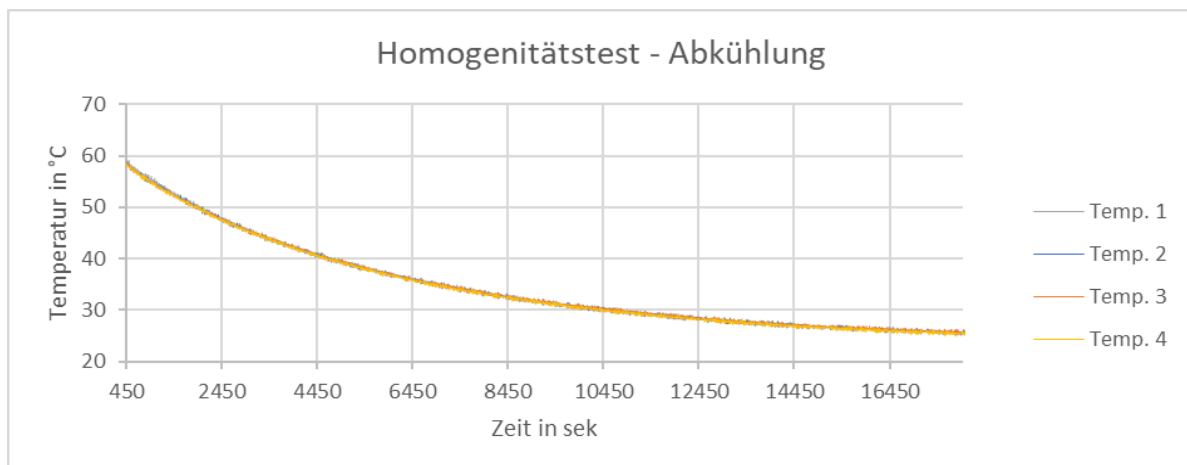


Abbildung 39: Abkühlungskurven der Homogenität an der Versuchszelle

Anhand des Verlaufes sind die einzelnen Sensoren kaum zu unterscheiden. Deshalb werden in Tab. 9 einige Zwischenwerte dargestellt. In Spalte fünf ist die jeweilige maximale Temperaturdifferenz aufgelistet. Die Temperaturdifferenzen liegen durchgehend bei wenigen zehntel Grad. Unter Berücksichtigung der Messtoleranz liegt die Abweichung bei weniger als 0.1 °C (siehe Kap. 4.1.4).

Tabelle 9: Temperaturvergleich des Homogenitätstests an der Versuchszelle

Messung	Temperatur in °C				
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	ΔT_{\max}
1	55,87	55,94	55,85	56,07	0,22
2	50,17	50,33	50,18	50,26	0,16
3	44,45	44,50	44,46	44,65	0,20
4	39,56	39,67	39,69	39,77	0,21
5	35,30	35,32	35,43	35,40	0,13
6	30,05	30,13	30,25	30,16	0,20
7	24,97	25,11	25,20	25,06	0,23

Mit diesem Ergebnis wird die Klima-Box als geeignet eingestuft, mit dem beschriebenen Versuchsaufbau und – ablauf den Temperaturkoeffizienten der Versuchszelle ausreichend genau bestimmen zu können.

4.3 Überprüfung der konstanten Bestrahlungsstärke

Um den Temperaturkoeffizienten mittels der Leerlaufspannung bestimmen zu können, wird eine konstante Bestrahlungsquelle benötigt. In Kapitel 3.2 wird das YONGNUO – YN600L Pro LED Panel vorgestellt. In diesem Kapitel wird geprüft, ob eine ausreichende Homogenität und Reproduzierbarkeit der Bestrahlungsstärke vorliegt.

4.3.1 Versuchsaufbau

Für den ersten Versuch wird das LED-Panel in einem Abstand von ca. 25 cm zu dem Bestrahlungssensor platziert. Der Fokus des Versuchsaufbaus liegt darin, in der Messung keine Fremdeinstrahlung zu erfassen. Deshalb wird der Sensor in einem Holzrahmen platziert und das obere Ende mit dem LED-Panel abgedeckt (Abb. 40). Für den zweiten Versuch wird das LED-Panel, wie auch später im Versuch „Bestimmung des Temperaturkoeffizienten“ (Kap. 5), in einem Abstand von 6cm zum Sensor platziert. Nach einem ersten Durchlauf wird anschließend eine Plexiglasscheibe zwischen dem Sensor und dem LED-Panel installiert. Damit wird in dieser Testreihe sowohl die Bestrahlungsstärke des LED-Panels auf die Versuchszelle erfasst, als auch die Abnahme der Bestrahlungsstärke durch die Plexiglasscheibe.

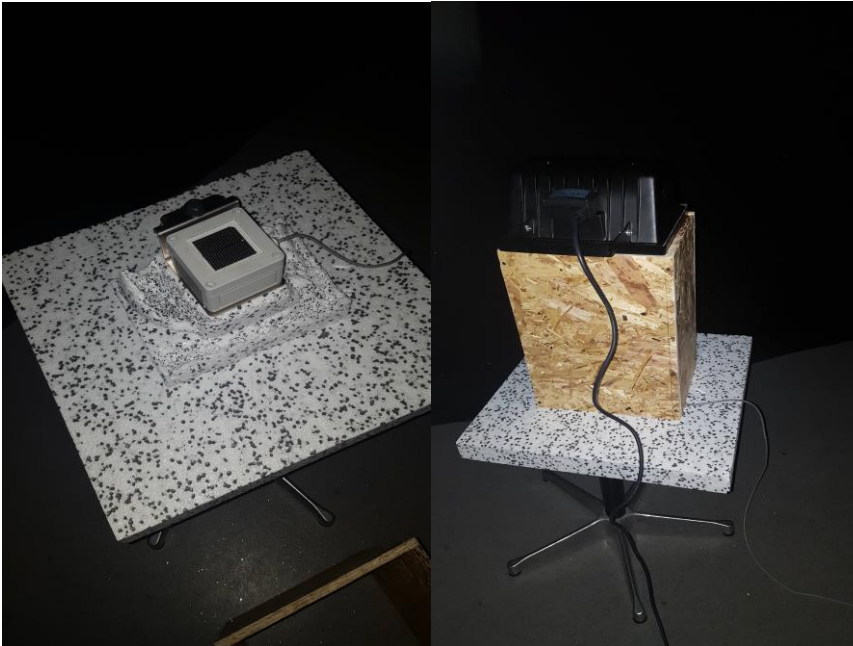


Abbildung 40: Versuchsaufbau: Überprüfung der konstanten Bestrahlungsstärke

4.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Bei dem ersten Versuch wird die Konstanz der Bestrahlungsstärke in verschiedenen Zeitintervallen bei gleichbleibendem Abstand (25 cm) und Reglerstellung auf maximale Leistung (99) getestet. Dabei werden, wie in Tabelle 10 aufgelistet, drei verschiedene Varianten gemessen:

Tabelle 10: Messvarianten der LED-Testreihe

Variante	Beleuchtung	Intervall
Kurzzeitbeleuchtung	5 sek	5 min
Schnellzeitbeleuchtung	5 sek	30 sek
Langzeitbeleuchtung	30 min	30 min

In den Tabellen 11 – 13 sind die Messergebnisse der verschiedenen Testreihen aufgeführt. Die ersten beiden Testreihen zeigen ein sehr stabiles und konstantes Bestrahlungsverhalten des LED-Panel. In Testreihe 3 ist eine deutliche Abnahme der Bestrahlungsstärke, in den ersten fünf Minuten zu beobachten, sie sinkt von 244 W/m² auf 232 W/m². Diese Abnahme ist aber eher auf die Erwärmung der Referenzzelle im Einstrahlungssensor zurückzuführen, als auf die abnahme der Bestrahlungsstärke vom LED-Panel. Nachdem sich die Betriebstemperatur der Referenzzelle, nach ca. 5 min, eingestellt hat, bleibt die Bestrahlungsstärke des LED-Panels ähnlich konstant wie in den ersten beiden Testreihen.

Tabelle 11: Messergebnisse Testreihe 1

Testreihe 1: Kurzzeitbeleuchtung		
Zeit (min)	Einstrahlung (W/m ²)	Abstand (cm)
0	253	25
5	252	25
10	251	25
15	251	25
20	251	25
25	251	25
30	251	25

Tabelle 12: Messergebnisse Testreihe 2

Testreihe 2: Schnellzeitbeleuchtung		
Zeit (sec)	Einstrahlung (W/m ²)	Abstand (cm)
0	251	25
30	251	25
60	251	25
90	250	25
120	250	25
150	250	25
180	249	25
210	249	25
240	249	25

Tabelle 13: Messergebnisse Testreihe 3

Testreihe 3: Langzeitbeleuchtung		
Zeit (min)	Einstrahlung (W/m ²)	Abstand (cm)
1	244	25
2	240	25
3	237	25
4	235	25
5	232	25
10	231	25
15	230	25
20	230	25
25	228	25
30	228	25

Bei der zweiten Testreihe zur Überprüfung der konstanten Bestrahlungsstärke geht es um die Wiederholbarkeit und den Einfluss durch eine Plexiglasscheibe auf die Bestrahlungsstärke. Um den Test möglichst nah an den eigentlichen Versuchsaufbau anzupassen (Kap. 5), wird der Sensor in einem Abstand von 6 cm zum LED-Panel platziert. Es werden mehrere Messungen bei verschiedenen Reglerstellungen in einem Intervall von 5 min an verschiedenen Tagen aufgenommen.

Tabelle 14: Messergebnisse Testreihe 4 ohne Plexiglasscheibe

Testreihe 4: Wiederholbarkeit der konstanten Bestrahlungsstärke												
Datum	19.11.2018				20.11.2018				21.11.2018			
Messung	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Reglerstellung	Bestrahlungsstärke in W/m ²				Bestrahlungsstärke in W/m ²				Bestrahlungsstärke in W/m ²			
99	546	545	546	548	550	550	550	549	549	549	548	548
79	453	455	456	455	458	456	456	455	455	452	450	450
59	354	352	356	356	359	356	357	356	350	357	359	356
39	250	252	251	250	255	252	252	250	250	250	252	248

Tabelle 15: Messergebnisse Testreihe 5 mit Plexiglasscheibe

Testreihe 5: Bestrahlungsstärke mit Plexiglasscheibe								
Datum	21.11.2018				22.11.2018			
Messung	1	2	3	4	1	2	3	4
Reglerstellung	Bestrahlungsstärke in W/m ²				Bestrahlungsstärke in W/m ²			
99	522	520	522	521	524	521	521	520
79	431	430	428	427	430	431	431	428
59	335	334	333	332	340	335	337	333
39	235	235	234	233	240	236	238	234

Die Messergebnisse der Testreihen 4 und 5, aus den Tabellen 14 und 15, bestätigen die Messergebnisse aus den Testreihen 1 – 3. Die leichten Bestrahlungsschwankungen zwischen den Tagen sind auf leicht unterschiedliche Raumtemperaturen zurückzuführen. Nichtsdestotrotz sind diese ebenfalls sehr gering und die Bestrahlungsstärke über Tage hinweg ausreichend konstant. Durch die Plexiglasscheibe nimmt die Bestrahlungsstärke um ca. 5% ab. Die Bestrahlungsstärke bleibt aber weiterhin über 500W/m² bei einer Reglereinstellung von 99.

5 Temperaturkoeffizient Bestimmung

5.1 Versuchsaufbau

Jedes Solarmodul und jede Solarzelle besitzen einen eigenen individuellen Temperaturkoeffizienten. Diese sind sich zwar alle ähnlich aber nicht gleich. Deshalb geht es bei diesem Versuch um die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten der Versuchszelle. Hierfür wird das Photovoltaik-Modul, in dem sich die Versuchszelle befindet, wie in Kap. 3.2 beschrieben, modifiziert. Anschließend wird das Modul in der Klima-Box installiert. Die Versuchszelle wird exakt auf das Fenster ausgerichtet (siehe Kap. 3.1). Für die Temperaturüberwachung werden, wie in Kap. 4.2.2 aufgeführt, vier Sensoren an der Versuchszelle angebracht (Abb. 38). Die beiden Heizlüfter (siehe Kap. 3.2) sind, wie in Abbildung 41, grün markiert dargestellt, links und rechts neben dem Modul platziert.

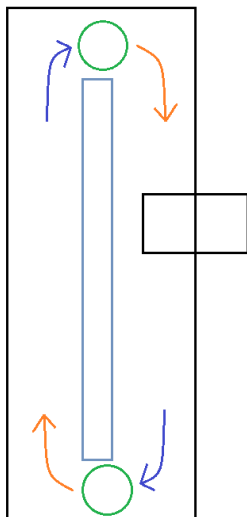


Abbildung 41: Ansicht der Klima-Box von oben

Sie sind so ausgerichtet, dass der Wärmestrom das Modul nicht direkt trifft, sondern die Umgebungsluft erwärmt und diese dann das Modul. Dies sorgt dafür, dass keine Stelle des Moduls eine deutlich höhere Temperatur durch die Heizlüfter annimmt, als das restliche Modul. Zusätzlich sind die beiden Heizlüfter so platziert, dass der Wärmestrom, den sie verursachen, sich in einer Kreisbewegung befindet. Beides sorgt für eine homogenere Erwärmung des Moduls. In dem Fenster wird, während der Messung, das LED-Panel hinter der Plexiglasscheibe installiert (Kap. 3.2) und mit Styropor isoliert. Während des Aufheizens bzw. des Abkühlens, wenn keine Spannungsmessung stattfindet, wird das Fenster mit Styropor isoliert, um den

Wärmestromverlust möglichst gering zu halten. Des Weiteren wird, wie auch schon in den Versuchen in Kap. 4.2 und 4.3, ein zusätzlicher Lüfter dazu genutzt, um die Luft bei der Erwärmung zu zirkulieren. Dieser ist im oberen Drittel, in einem leichten Winkel nach unten gerichtet, installiert (Abb. 42). Damit wird die wärmere Luft, die sich an der Decke der Klima-Box sammelt, wieder nach unten zirkuliert. Dies sorgt für eine weitere Verbesserung der Homogenität bei der Erwärmung.



Abbildung 42: Versuchsaufbau – Temperaturkoeffizient Bestimmung

5.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wird die Klima-Box kontinuierlich erwärmt. Nach mehreren Testläufen wird eine Erwärmungsdauer von ca. zwei Stunden festgelegt. Nach dieser Zeit pendelt sich die Temperatur innerhalb der Klima-Box bei ca. 70 °C ein. Anschließend werden die Heizlüfter abgeschaltet, wobei der zusätzliche Zirkulationslüfter noch weiter betrieben wird, um die nachgestrahlte Temperatur der Heizlüfter ebenfalls in der Klima-Box zu verteilen. Nach einigen Minuten wird auch der Zirkulationslüfter abgeschaltet. Der Klima-Box und dem Modul wird noch einmal Zeit gelassen, damit sich der Luftstrom, der durch die Heizlüfter und den Zirkulationslüfter entstanden ist, legt und das Photovoltaik-Modul sich in einer windfreien Umgebung befindet. Anschließend beginnt der Messvorgang bei ca. 55 °C.

Während des Abkühlvorganges werden mehrere Messungen in 5 °C Abständen aufgenommen. Das Newtonsche Abkühlungsgesetz besagt, dass die Abkühlung der Versuchszelle einer monoton abfallenden Exponentialfunktion entspricht (siehe Kap. 2.5). Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass sich die Versuchszelle mit einer Größe von ca. 15 cm · 15 cm in einer windfreien Umgebung homogen abkühlt und keine Temperaturschwankungen auftreten. Damit kann die Annahme getroffen werden, dass die Zelltemperatur der Umgebungstemperatur, direkt an der Moduloberfläche, entspricht.

Aus dem Fachartikel „Variation of Temperature Coefficient of Different Technology Photovoltaic Moduls with respect to Irradiance“, von P. K. Dash und N. C. Gupta kann entnommen werden, dass sich der Temperaturkoeffizient eines Moduls bei den Temperaturen zwischen 20 °C und 80 °C nahezu linear verhält [Dash, 2015]. Um den Messfehler bei der Bestimmung des Temperaturkoeffizienten möglichst gering zu halten, wird eine möglichst große Temperaturdifferenz benötigt. Deshalb werden die Spannungen bei möglichst hohen und möglichst niedrigen Temperaturen mit Zwischenmessungen aufgenommen.

5.3 Versuchsauswertung

Die Versuchsdurchführung erstreckt sich auf insgesamt drei Tage, vom 11.12.2018 bis 13.12.2018. Wie oben beschrieben, werden Temperatur- und Spannungswerte, in 5 °C-Schritten abwärts, aufgenommen. Die Messergebnisse von drei Messtagen sind in A.2 aufgelistet. Die gemittelten Temperaturen der vier Sensoren T_M und die Zellspannungen V_M der drei Versuchsdurchläufe sind in Tab. 16 dargestellt. Dabei blieb der Versuchsaufbau- und ablauf unverändert.

Tabelle 16: Gemittelte Temperaturmessergebnisse von drei Messtagen

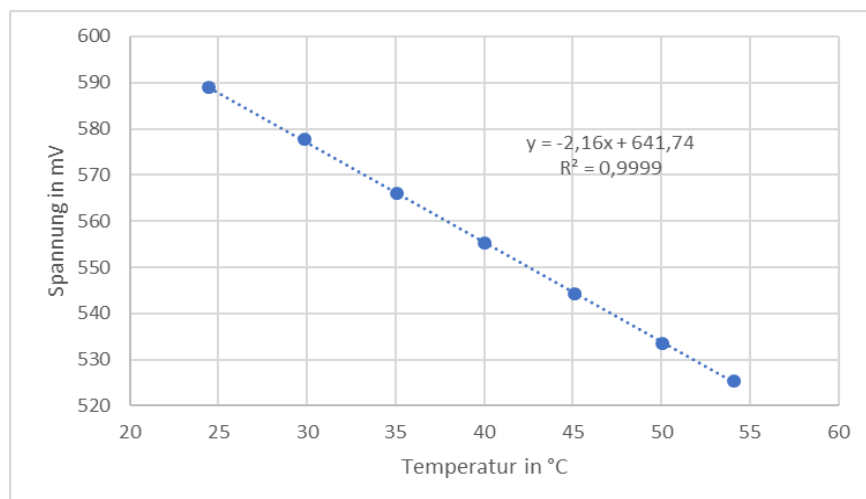
Messung	11.12.2018		12.12.2018		13.12.2018	
	T_M in °C	V_M in mV	T_M in °C	V_M in mV	T_M in °C	V_M in mV
1	54,11	525,26	56,02	521,75	55,46	524,03
2	50,05	533,55	50,33	533,83	50,58	533,85
3	45,11	544,36	44,54	545,26	45,16	545,21
4	40,05	555,19	39,70	555,59	40,28	555,52
5	35,05	565,92	35,37	565,11	35,13	566,60
6	29,83	577,69	30,13	576,69	29,92	578,17
7	24,47	588,89	26,38	584,06	25,09	588,63

Für die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten wird für jeden Tag ein individueller Temperaturkoeffizient bestimmt. Die Temperaturkoeffizienten werden anhand von zwei verschiedenen Methoden ermittelt. Zum einen wird nur der maximale Temperaturunterschied für die Berechnung verwendet und der jeweilige Temperaturkoeffizient mit dem Dreisatz berechnet (Tab. 17).

Tabelle 17: Temperaturkoeffizient Bestimmung T_k absolut und relativ durch ΔT_{\max}

	11.12.2018		12.12.2018		13.12.2018	
	T_M in °C	V_M in mV	T_M in °C	V_M in mV	T_M in °C	V_M in mV
T_{\max} & V_{\min}	54,11	525,26	56,02	521,75	55,46	524,03
T_{\min} & V_{\max}	24,47	588,89	26,38	584,06	25,09	588,63
T_k in mV/°C		-2,15		-2,10		-2,13
T_k in %/°C		-0,36		-0,36		-0,36

Zum anderen wird mithilfe der Messergebnisse eine lineare Regression bestimmt (A.2), beispielhaft gezeigt in Abb. 43 für den 11.12.2018.

**Abbildung 43:** Regressionsgerade für die Temperaturkoeffizient Bestimmung vom 11.12.2018

Die Steigung der Regression entspricht dabei dem Temperaturkoeffizienten. Die Funktionen, das Bestimmtheitsmaß und die Temperaturkoeffizienten für die drei Tage sind in Tab. 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Temperaturkoeffizient Bestimmung durch lineare Regression

Datum	Regression	Bestimmtheitsmaß	Temperaturkoeffizient	
			in mV/°C	in %/°C
11.11.2018	$y = -2,16 \text{ mV/°C} \cdot x + 641,74 \text{ mV}$	0,9999	-2,16	-0,36
12.11.2018	$y = -2,11 \text{ mV/°C} \cdot x + 639,81 \text{ mV}$	0,9997	-2,11	-0,36
13.11.2018	$y = -2,13 \text{ mV/°C} \cdot x + 641,79 \text{ mV}$	0,9998	-2,13	-0,37

Für die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten für einen Tag werden die beiden bisher bestimmten Temperaturkoeffizienten gemittelt. Um den Fehler des Temperaturkoeffizienten weiter zu verkleinern, werden die Temperaturkoeffizienten von allen Tagen gemittelt und ein „finaler“ Temperaturkoeffizient bestimmt (Tab. 19).

Tabelle 19: Bestimmung des finalen Temperaturkoeffizienten T_k

T _k ermittelt am		11.12.2018	12.12.2018	13.12.2018	Mittelwert	Finaler T _k
T _k bestimmt durch	ΔT max in %/°C	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36
	Regression in %/°C	-0,36	-0,36	-0,37	-0,36	

Abschließend werden die Zelltemperaturen unter Verwendung des ermittelten Temperaturkoeffizienten und den gemessenen Zellspannungen berechnet. In Tabelle 20 sind die Temperaturabweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten dargestellt.

Tabelle 20: Temperaturabweichung der berechneten Werte mit dem finalen Temperaturkoeffizienten

Datum	11.12.2018	12.12.2018	13.12.2018
Messung	Abweichung in °C		
1	-0,23	0,39	0,05
2	-0,40	0,37	-0,23
3	-0,26	-0,06	-0,31
4	-0,24	-0,05	-0,36
5	-0,20	0,09	-0,31
6	0,11	0,29	-0,08

Mit einer Abweichung von maximal 0,4 °C kann die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten als ausreichend genau betrachtet werden.

6 Bestimmung der Messabweichung gängiger Zelltemperatur-Messmethoden

Eine gängige Messmethode der Temperaturerfassung im Feldeinsatz ist es, den Temperatursensor mithilfe eines Klebebandes an der Rückseitenfolie zu befestigen. Dieser ist sowohl der Umgebungstemperatur, als auch Windgeschwindigkeiten ausgesetzt, welche die Temperatur beeinflussen. In diesem Kapitel wird unter Einsatz von verschiedenen Sensoren und Befestigungen eine Temperaturabweichung zur Referenztemperatur T_{ref} , welche durch den oben bestimmten Temperaturkoeffizienten ermittelt wird, erfasst.

6.1 Versuchsaufbau

Das Modul wird, wie in Abb. 44 dargestellt, in der geöffneten Klima-Box installiert. An der Rückseite der Versuchszelle werden in jeder Testreihe zwei Sensoren befestigt. Die Sensoren werden in Kap. 3.2 vorgestellt. Einer der beiden Sensoren wird, wie in der oben beschriebenen Messmethode, mit einem handelsüblichen Klebeband an der Rückseitenfolie befestigt, während der andere mithilfe eines isolierenden Zellkautschukbands befestigt wird (Abb. 45).



Abbildung 44: Geöffnete Klima-Box mit installiertem Modul

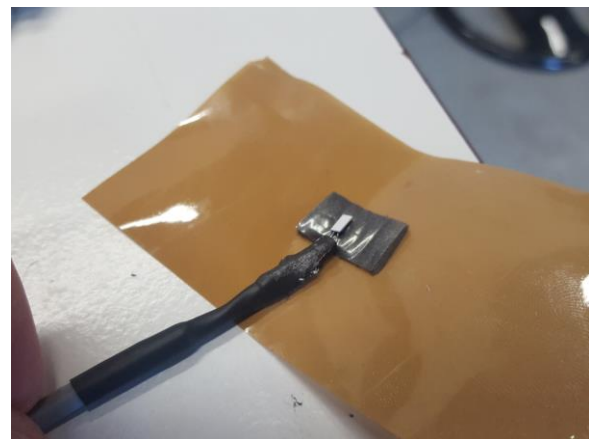


Abbildung 45: Isolierte Befestigung des Pt-1000

Zusätzlich zu den verschiedenen Sensoren und Befestigungen werde unterschiedliche Windgeschwindigkeiten von 0 m/s, ca. 1 m/s und ca. 2 m/s mit handelsüblichen Ventilatoren simuliert. Diese werden in einem Winkel vor und hinter dem Modul aufgestellt (Abb. 44). Die Windgeschwindigkeit wird mit einem handelsüblichen Windmessgerät erfasst. Mit handelsüb-

lichen Halogenstrahlern wird eine Bestrahlungsstärke an der Vorderseite des Moduls simuliert. Durch zwei verschiedene Abstände der Halogenstrahler zum Modul werden verschiedene Bestrahlungsstärken realisiert und unterschiedliche Betriebstemperaturen erreicht. Die Halogenstrahler sollen die Versuchszelle und ihre umliegenden Zellen möglichst homogen erwärmen und auf Betriebstemperatur bringen. Die Erwärmung der umliegenden Zellen ist wichtig, damit die Wärme der Versuchszelle nicht zu den Seiten abgeleitet und die Zelltemperatur damit beeinflusst wird. Die Halogenstrahler werden so ausgerichtet (Abb 46), dass sich die Versuchszelle in der Mitte des Wärmekegels befindet, den die Halogenstrahler projizieren (Abb. 47).



Abbildung 46: Halogenstrahler

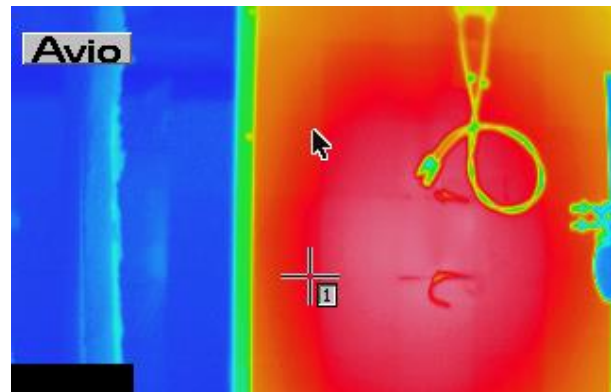


Abbildung 47: Wärmekegel der Halogenstrahler

6.2 Versuchsdurchführung

Nach einer Bestrahlungsdauer von ca. einer Stunde werden die Halogenstrahler abgeschaltet und das LED-Panel in einem Abstand von 6 cm vor der Versuchszelle platziert. So ist die Versuchszelle der gleichen Bestrahlungsstärke ausgesetzt, wie in Kap. 5. Gleichzeitig wird die Referenztemperatur und die Temperaturen der beiden Sensoren an der Rückseitenfolie erfasst. Bei den Testreihen mit einer Windgeschwindigkeit wird die Versuchszelle, nach der oben beschriebenen Bestrahlungsdauer und vor Beginn der Messungen, zehn Minuten lang einer Windgeschwindigkeit ausgesetzt. Der gesamte Versuch erstreckt sich auf 21 Testreihen. Dabei werden in jeder Testreihe zwei Sensoren desselben Typs, mit den unterschiedlichen Befestigungen an der Rückseitenfolie befestigt. Die unterschiedlichen Testreihen sind in Tab. 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Auflistung der verschiedenen Testreihen

Testreihe	Sensortyp	Windgeschw. in m/s	Abstand Halogen- strahler in m
1	Pt-1.000	0	1
2	Pt-1.000	1	1
3	Pt-1.000	2	1
4	Pt-100	0	1
5	Pt-100	1	1
6	Pt-100	2	1
7	Pt-300N	0	1
8	Pt-300N	1	1
9	Pt-300N	2	1
10	Thermoe.	0	1
11	Thermoe.	1	1
12	Thermoe.	2	1
13	Pt-1.000	0	0,5
14	Pt-1.000	1	0,5
15	Pt-1.000	2	0,5
16	Pt-100	0	0,5
17	Pt-100	1	0,5
18	Pt-100	2	0,5
19	Pt-300N	0	0,5
20	Pt-300N	1	0,5
21	Pt-300N	2	0,5

6.3 Messergebnisse der Testreihen

Wie in Tabelle 21 aufgelistet, befinden sich die Halogenstrahler, für Testreihe 1 – 12, in einem Abstand von 1 m zum Modul. Dabei wird die Versuchszelle einer Bestrahlungsstärke von ca. 330 W/m² ausgesetzt. Unter der Voraussetzung einer windstillen Umgebung und einer Bestrahlungsdauer von ca. einer Stunde wird eine Zelltemperatur von über 45 °C, bei einer Umgebungstemperatur von ca. 25 °C, erreicht. In Tabelle 22 sind die Temperaturen der Testreihen aufgeführt. Eine detaillierte Darstellung der Messwerte befindet sich im Anhang A.2.

Tabelle 22: Gemittelte Temperaturen in °C bei einem Abstand von 1 m

Sensor	Befestigung	Windgeschw. in m/s		
		0	1	2
Pt – 1.000	Isoliert	47,87	37,71	33,61
	Klebeband	45,17	33,80	30,57
T _{ref} in °C		47,62	36,91	33,38
Pt - 100	Isoliert	47,27	36,39	32,79
	Klebeband	45,41	34,09	30,94
T _{ref} in °C		47,99	36,84	33,32
Pt - 300N	Isoliert	52,92	43,51	40,10
	Klebeband	49,19	39,25	35,78
T _{ref} in °C		48,45	37,97	34,93
Therm. Typ K	Isoliert	45,58	35,27	31,63
	Klebeband	45,66	34,97	31,79
T _{ref} in °C		48,87	36,86	32,68

In den Testreihen 13 – 21 befinden sich die Halogenstrahler, wie in Tab 21 aufgelistet, in einem Abstand von 0,5 m. Dabei wird eine Bestrahlungsstärke von über 1.000 W/m² gemessen. Unter der Voraussetzung einer windstillen Umgebung und einer Bestrahlungsdauer von ca. einer Stunde wird eine Zelltemperatur von ca. 80 °C, bei einer Umgebungtemperatur von ca. 30 °C, erreicht. In Tabelle 23 werden die mittleren Temperaturen der Testreihen aufgeführt. Eine detaillierte Darstellung der Messwerte befindet sich im Anhang A.2.

Tabelle 23: Gemittelte Temperaturen in °C bei einem Abstand von 0,5 m

Sensor	Befestigung	Windgeschw. in m/s		
		0	1	2
Pt – 1.000	Isoliert	86,16	60,91	54,89
	Klebeband	74,05	50,40	44,68
T _{ref} in °C		79,91	54,12	48,63
Pt - 100	Isoliert	84,64	62,63	51,4
	Klebeband	72,81	51,26	39,64
T _{ref} in °C		78,32	58,05	43,94
Pt - 300N	Isoliert	-	75,20	64,60
	Klebeband	89,94	62,74	54,82
T _{ref} in °C		86,83	59,50	52,04

Zusätzlich zu den Mittelwerten werden in Tabelle 24 und 25 die absoluten und relativen Abweichungen zur Referenztemperatur der verschiedenen Abstände der Halogenstrahler dargestellt.

Tabelle 24: Abweichung der Temperaturen in °C zur Referenztemperatur bei einem Abstand von 1 m

Abweichung bei 1 m		absolut in °C			relativ in %		
Sensor	Befestigung	Windgeschw. in m/s			Windgeschw. in m/s		
		0	1	2	0	1	2
Pt – 1.000	Isoliert	0,25	0,8	0,23	0,52	2,17	0,69
	Klebeband	-2,45	-3,11	-2,81	-5,15	-8,42	-8,41
Pt - 100	Isoliert	-0,72	-0,45	-0,53	-1,51	-1,23	-1,60
	Klebeband	-2,58	-2,76	-2,38	-5,38	-7,48	-7,14
Pt - 300N	Isoliert	4,47	5,54	5,17	9,22	14,60	14,80
	Klebeband	0,74	1,28	0,85	1,52	3,38	2,43
Therm. Typ K	Isoliert	-3,29	-1,59	-1,05	-6,73	-4,32	-3,21
	Klebeband	-3,21	-1,89	-0,89	-6,57	-5,14	-2,73

Tabelle 25: Abweichung der Temperaturen in °C zur Referenztemperatur bei einem Abstand von 0,5m

Abweichung bei 0,5 m		absolut in °C			relativ in %		
Sensor	Befestigung	Windstärke in m/s			Windstärke in m/s		
		0	1	2	0	1	2
Pt - 1000	Isoliert	6,24	6,79	6,26	7,81	12,55	12,86
	Klebeband	-5,86	-3,72	-3,95	-7,34	-6,87	-8,12
Pt - 100	Isoliert	6,31	4,58	7,46	8,06	7,89	16,97
	Klebeband	-5,52	-6,79	-4,3	-7,04	-11,70	-9,80
Pt - 300N	Isoliert	-	15,7	12,56	-	26,39	24,13
	Klebeband	3,11	3,24	2,78	3,58	5,45	5,34

6.4 Auswertung der Messergebnisse

Allgemein kann den Messwerten entnommen werden, dass die isolierten Pt-Sensoren, wie erwartet, immer eine höhere Temperatur anzeigen, als die mit dem Klebeband. Zusätzlich sinkt auch die Temperatur mit steigender Windgeschwindigkeit, was ebenfalls erwartet wurde.

6.4.1 Auswertung der Pt-1.000 und Pt-100 Sensoren

Die Pt-1000 und Pt-100 Sensoren verhalten sich, wie erwartet, sehr ähnlich. Beide Sensoren weisen, je nach Abstand der Halogenstrahler, ähnliche Abweichungen auf. Die Windgeschwindigkeiten haben, bei einer Bestrahlungsstärke von 330 W/m² und im Rahmen der Toleranzen, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die isolierten Sensoren.

Die Temperaturen der Sensoren mit der Klebeband-Befestigung zeigen durchgehend eine niedrigere Temperatur als die Referenztemperatur an. Da das Klebeband dem Sensor nur eine geringe Isolation bietet, wird er durch Konvektion stärker gekühlt, als der isolierte Sensor. Diese Vermutung stärkt sich auch in den Messwerten bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Durch den Einfluss des Windes steigt die Abweichung zur Referenztemperatur um etwa 2,5 %.

Während die isolierten Sensoren bei 330 W/m^2 einen vernachlässigbaren Einfluss zeigen, so zeigen sie bei höherer Bestrahlungsstärke (über 1.000 W/m^2) eine deutliche Überschätzung der Zelltemperatur. Aufgrund dieser Ergebnisse entsteht die Vermutung eines Wärmestaus an der isolierten Stelle der Versuchszelle. Durch das Erreichen von einer deutlich höheren Referenztemperatur ($80 \text{ }^\circ\text{C}$), vergrößert sich auch die Temperaturdifferenz zur Umgebung ($30 \text{ }^\circ\text{C}$). Dies hat zur Folge, dass die Versuchszelle besser durch die Umgebungstemperatur gekühlt wird, als die isolierten Sensoren. Werden die Ergebnisse für die isolierten Sensoren relativ betrachtet, so bestärkt dies die Vermutung eines Wärmestaus, da die Überschätzung der Zelltemperatur mit steigender Windgeschwindigkeit größer wird.

Im Gegensatz zu den isolierten Sensoren zeigen die Sensoren mit der Klebeband-Befestigung bei höherer Bestrahlungsstärke weiterhin eine ähnliche Tendenz, mit einer größeren Abweichung, wie bei der niedrigeren Bestrahlungsstärke.

6.4.2 Pt-300N

Die Messergebnisse von den isolierten Pt-300N Sensoren zeigen eine ähnliche Tendenz bei Windgeschwindigkeiten, wie die beiden oben beschriebenen Sensoren. Allerdings tendieren diese zu einer größeren Überschätzung der Temperatur. So haben diese bei einer Bestrahlungsstärke von 330 W/m^2 bereits eine Überschätzung von ca. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und bei einer Bestrahlungsstärke von über 1.000 W/m^2 deutlich über $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Unterschied zu den beiden anderen Sensoren liegt vermutlich an der Größe des Pt-300N (Abb. 48). Während die Pt-1.000 und Pt-100 Sensoren relativ klein sind, ist der Pt-300N Sensor um ein vielfaches größer. Dadurch benötigt dieser bei der Isolierung deutlich mehr Isoliermaterial. Dies hat zur Folge, dass ein größerer Teil der Versuchszelle abgedeckt wird. Diese Feststellungen unterstützen die oben geschilderte Vermutung eines Wärmestaus bei der isolierten Befestigung.



Abbildung 48: Temperatursensoren: Pt-1000 (links), Pt-100 (mitte) Pt-300N (rechts)

Zusätzlich lässt sich diese Vermutung anhand von Wärmebildern weiter stärken. In Abbildung 49, 1 ist der erwärmte Versuchsaufbau mit dem Pt-300N zu sehen. Schon hier ist zu erkennen, dass hinter dem isolierten Sensor (links) eine höhere Temperatur ist, als am Rest der Zelle.

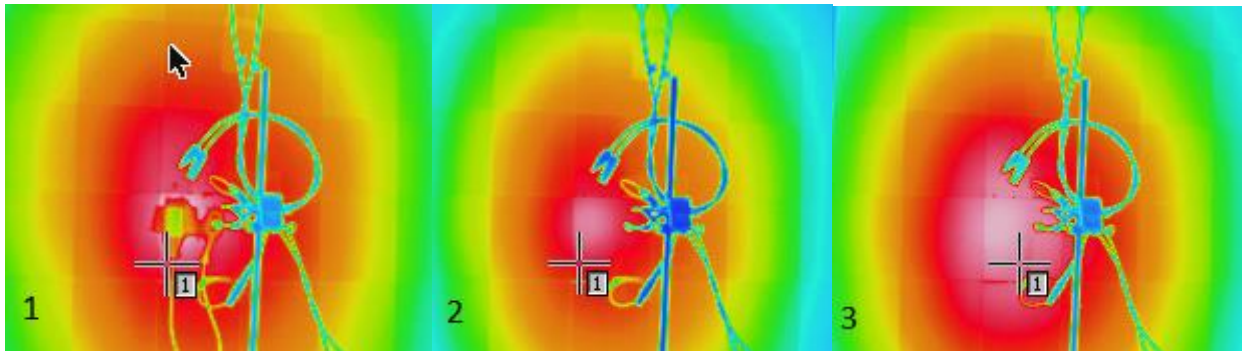


Abbildung 49: 1. Wärmebild mit Sensor bei ca. 80 °C; 2. Wärmebild nach Entfernung der Sensoren 3. Wärmebild der Zelle 5 min nach Entfernung der Sensoren

Direkt nach dem Entfernen der Sensoren ist ein klarer Temperaturunterschied zwischen der Stelle, an der sich der isolierte Sensor befand und dem Rest der Versuchszelle zu erkennen (Abb. 49, 2). Nach wenigen Minuten stellt sich wieder eine homogene Temperaturverteilung über der Zelle ein (Abb. 49, 3). Die Farbskala dient nur der Verdeutlichung einer Temperaturdifferenz und gibt keine Auskunft über die absolute Temperatur.

Der Pt-300N Sensor mit der Klebeband-Befestigung zeigt, entgegen der Erwartung, ein ähnliches Verhalten, wie die isolierten Sensoren. Er überschätzt die Temperatur bei bereits niedrigeren Bestrahlungsstärken. Diese Überschätzung nimmt mit steigender Bestrahlungsstärke geringfügig zu. Dadurch entsteht die Vermutung, dass auch das Klebeband dem Sensor eine gewisse, wenn auch nicht hohe, Isolierung bietet und / oder dass die Größe des Sensors bereits selbst isolierend auf die Zelle wirkt. Allerdings zeigt der Sensor eine gleichmäßigere Übereinstimmung mit der Referenztemperatur über die gesamte Testreihe, als die restlichen Sensoren.

6.4.3 Thermoelemente

Beide Befestigungen zeigen bei den Thermoelementen ein ähnliches Verhalten, welches keinem der oben beschriebenen Sensoren entspricht. Dies liegt vermutlich daran, dass die Thermoelemente zwar zu den Seiten vor der Umgebungstemperatur isoliert sind (Abb. 50), aber aufgrund der Bauform nicht die Möglichkeit haben, so befestigt zu werden, wie die oben beschriebenen Sensoren (Abb. 45) und mithilfe eines Stativs an der Versuchszelle installiert werden müssen. Die Abweichung zu der Referenztemperatur wird auch mit zunehmender Windgeschwindigkeit, was eine Näherung an die Raumtemperatur zur Folge hat, geringer. Dies unterstützt die Vermutung der Isolationsproblematik.



Abbildung 50: Isoliertes und nicht isoliertes Thermoelement

7 Zusammenfassung

Ziel in der vorliegenden Arbeit ist es, die Temperaturunterschiede zwischen der Zelltemperatur eines Solarmoduls und der gemessenen Temperatur an der Rückseitenfolie zu erfassen. Nach der Bestimmung des Temperaturkoeffizienten für eine einzelne Zelle werden verschiedene Varianten der Befestigung und unterschiedliche Sensoren an der Rückseitenfolie der Zelle miteinander und mit der, durch die Leerlaufspannung bestimmten, Temperatur verglichen. Bei den ersten Testreihen wird der Temperaturunterschied zwischen verschiedenen Befestigungen erfasst. Hierzu wird zum einen eine einfache Befestigung mit einem Klebeband verwendet und zum anderen eine Befestigung mit einem isolierendem Zellkautschukband. Das Klebeband gewährleistet einen guten Kontakt zwischen der Sensor- und der Versuchszelloberfläche. Das Zellkautschukband hingegen soll den Sensor vor der Raumtemperatur und eventuellen Windeinflüssen isolieren. Anschließend wird die Versuchszelle mithilfe von Halogenstrahlern auf Betriebstemperatur erwärmt. Direkt danach wird die Versuchszelle mit dem LED-Panel bestrahlt und sowohl die Spannung, als auch die Temperaturen gemessen. Dieser Versuch wird bei windstillen Bedingungen und verschiedenen Windgeschwindigkeiten wiederholt.

Aus den Messergebnissen der isolierten Pt-1.000 und Pt-100 Sensoren kann entnommen werden, dass diese bei niedriger Bestrahlungsstärke die Zelltemperatur sehr gut treffen. Allerdings weicht der isolierte Pt-300N Sensor deutlich davon ab. Die Vermutung wird aufgestellt, dass sich ein Wärmestau an der isolierten Stelle der Zelle bildet. Dieser Wärmestau ist bei kleiner Isolierfläche und niedriger Bestrahlungsstärke kaum zu beobachten. Allerdings stärken die Messungen bei höherer Bestrahlungsstärke, dass auch bei kleiner Isolierfläche der Zelle ein Wärmestau entsteht.

Bei den Sensoren mit der Klebeband-Befestigung zeigen die Pt-1,000 und Pt-100 Sensoren eine kontinuierliche Unterschätzung der Zelltemperatur in Form von einer negativen Temperaturdifferenz. Die Temperaturdifferenz vergrößert sich unter dem Einfluss von Wind und höheren Bestrahlungsstärken. Das Pt-300N zeigt mit der Klebeband-Befestigung allerdings ein ähnliches Verhalten, wie die isolierten Sensoren. Bereits bei niedriger Bestrahlungsstärke überschätzt dieser die Zelltemperatur. Diese Überschätzung steigt auch mit höherer Bestrahlungsstärke. Nichtsdestotrotz zeigt der Pt-300N Sensor durchschnittlich die beste Übereinstimmung, über die gesamten Testreihe, mit der Referenztemperatur.

Aus den Messergebnissen der Thermoelemente lassen sich aufgrund der Isolierproblematik keine Aussagen bezüglich des Verhaltens der Sensoren oder der Befestigungen treffen. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, sollten in weiteren Versuchen die Isolierproblematik gelöst werden, oder Thermoelemente einer ähnlichen Bauform wie die Pt-Sensoren gewählt werden. Da die Messungen im Feldeinsatz bei mittleren und hohen Bestrahlungsstärken durchgeführt werden, welche zu unterschiedlichen Zelltemperaturen führen, ist es für den Feldeinsatz zu empfehlen, die Pt-300N Sensoren ohne Isolierung an der Rückseitenfolie des Moduls zu befestigen, da diese Variante durchschnittlich die kleinste Abweichung zur Zelltemperatur zeigt.

Zum Abschluss lässt sich sagen, dass durch die vorgestellten Versuche und Methoden ein gewisser Eindruck darüber gewonnen werden konnte, wie sich die gemessene Temperatur an der Rückseitenfolie einer Solarzelle, unter verschiedenen Bedingungen, gegenüber der berechneten Zelltemperatur über die Leerlaufspannung verhält und von dieser abweicht. Um eindeutige Aussagen darüber treffen zu können, müssen weitere Versuchsreihen bei verschiedenen Bestrahlungsstärken und Umgebungstemperaturen in folgenden wissenschaftlichen Abhandlungen durchgeführt werden.

8 Anhang A.1

Der Anhang dieser Arbeit wird in zwei Teile getrennt. Zusätzlich zu Anhang A.1 befindet sich Anhang A.2 in digitaler Form als CD-ROM anbei dieser Arbeit. Dieser beinhaltet Datenblätter der verwendeten Komponenten, sowie ergänzende Tabellen der Messwerte.

8.1 Quellenverzeichnis

- Bernhard, 2014 Frank, Bernhard: *Grundlagen der Temperaturmesstechnik*, Berlin 2014
- Coratec, 2018 Coratec (Hrsg.): Technische Daten TVS 200.
<http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/tvs-200ex/spec.html>, abgerufen am 22.01.2019
- Dash, 2015 International Journal of Current Engineering and Technology: *Variation of Temperature Coefficient of Different Technology Photovoltaic Modules with respect to Irradiance*, E-ISSN 2277–4106, P-ISSN 2347–5161
<https://inpressco.com/wp-content/uploads/2015/01/Paper24150-1551.pdf>, abgerufen am 05.10.2018
- Digistand, 2019 Digistand (Hrsg.): Datenblatt Digistand 4411.
https://www.mtk-messtechnik.de/media/doc/device/burster_digistand4411.pdf, abgerufen am 18.01.2019
- Electronic, 2018 ElectronicSensor (Hrsg.): Grenzabweichung für Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751.
http://www.electronic-sensor.de/attachments/article/68/ti-5_kennlinien-pt100-widerstaende-nach-toleranzklassen.pdf, abgerufen am 29.12.2018
- EPDM, 2018 www.schaumstofflager.de
- Häberlin, 2007 Heinrich Häberlin: *Photovoltaik: Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen*, Aarau: AZ Fachverlage AG, 2007
- Heraeus, 2018 Heraeus (Hrsg.): Empfohlene Mesströme für Widerstandsthermometer
https://www.heraeus.com/media/media/group/doc_group/products_1/hst/Heraeus_Sensorbroschuere_2017_Web.pdf, abgerufen ab 29.12.2018
- Heraeus2, 2018 Heraeus (Hrsg.): Datenblatt Pt-1000.
http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/181390-da-01-de-Temperatursensor_PT_100.pdf, abgerufen am 14.12.18
- Hering, 2012 Ekbert, Hering: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*, Berlin 2012
- HT, 2019 HT-Instruments (Hrsg.): Datenblatt SOLAR-02.
<https://ht-instruments.de/wp-content/files/Bedienungsanleitungen/SOLAR->

- HTW-Berling, 2018 [02_RF_DE_1.pdf](#), abgerufen am 18.01.2019
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin: Zwei- und Vierleiterschaltung eines Widerstandsthermometers
https://mb-master.htw-berlin.de/files/Stg/MB/Versuchsanleitungen_Messtechnik/Temp_statisch.pdf, abgerufen am 29.12.2018
- Keithley, 2019 Keithley (Hrsg.): Datenblatt Keithley-2000.
<http://www.testequipmenthq.com/datasheets/KEITHLEY-2000-Datasheet.pdf>, abgerufen 18.01.2019
- Lauda Lauda (Hrsg.): Manual Evo Silver.
<https://www.lauda-brinkmann.com/downloads/manuals/Eco%20Silver.pdf>, abgerufen am 15.12.18
- Mertens, 2018 Konrad Mertens: *Photovoltaik*. München: Carl Hanser, 2018
- MikCon, 2018 Mikrocontroller (Hrsg.): Kennlinie eines Pt-1000.
https://www.mikrocontroller.net/attachment/231265/PT_1000_Kennlinie.png, abgerufen am 29.12.2018
- Miosga, 1980 Stahl Miosga: Grundlagen Infrarottechnik, Berlin: Hütig Verlag, 1980
- Nes, 2018 NES (Hrsg.): Technische Daten Einstrahlungssensor NES SOZ-03.
http://www.nes-datalogger.de/produkte_soz03.htm, abgerufen am 18.12.2018
- Pve, 2018 Pve (Hrsg.): Datenblatt PVPM1000C.
https://www.pv-engineering.de/fileadmin/user_upload/Produkte/PVPM1000C/pvpm-datenblatt_09.pdf, abgerufen am 18.12.2018
- P795 Thermometershop.ch (Hrsg.): Datenblatt P-795.
<https://www.thermometershop.ch/resources/P795.pdf>, abgerufen am 15.12.2018
- Quaschnig, 2009 Volker Quaschnig: *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung- Simulation*, Hamburg: Verlag Hanser, August 2009
- Raytek, 2018 Raytek (Hrsg.): Elektromagnetische Spektrum.
http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/9250266_GER_C_W.PDF abgerufen am 30.12.2018
- Talesung, 2018 Talesun (Hrsg.): Datenblatt Talesun Modul TP660P.
<https://www.dp-solar-shop.de/media/content/TP660P%2035mm%20frame..pdf>, abgerufen am 20.11.2018
- Testo, 2019 Testo (Hrsg.): Datenblatt Kreuzbandfühler Typ K.

- 199999/181390-da-01-de-Temperatursensor_PT_100.pdf, abgerufen am 18.01.2019
- Tu-Dresden, 2003 Technische Universität Dresden: Physikalisches Praktikum, 2003
- Voltcraft, 2018 Voltcraft (Hrsg.): Datenblatt HD USB-Endoskop.
http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/1400000-1499999/001431289-an-01-ml-VOLTcraft_BS_21_HD_USB_ENDOS_de_en_fr_nl.pdf, abgerufen am 14.12.18
- Wika, 2018 WIKA (Hrsg.): Einsatz von Thermoelementen.
https://de-de.wika.de/upload/DS_IN0023_de_de_51541.pdf, abgerufen am 16.12.2018
- World, 2011 World Applied Sciences: Journal 14: *Special Issue of Food and Environment* ISSN 1818-4952© IDOSI Publications, 2011
- Yonguo, 2018 Yongnuo (Hrsg.): Usermanual YN600LII.
<http://www.yongnuo.com.cn/usermanual/pdf/YN600LIIsy.pdf>, abgerufen am 14.12.18

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Thermospannungen verschiedener Materialien nach Hering	5
Tabelle 2: Standardlegierungen für Thermopaare nach DIN EN 60584-1 / ASTM E230 [Wika, 2018]	5
Tabelle 3: Grenzabweichungen für Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751 [Electronic, 2018]	7
Tabelle 4: Empfohlene Messströme für Pt-Sensoren [Heraeus, 2018].....	9
Tabelle 5: Zusammenfassung der Regressionsfunktionen mit Bestimmtheitsmaß	27
Tabelle 6: Umrechnung der gemittelten Spannungswerte, sowie die absolute Abweichung zu T_{ref}	27
Tabelle 7: Genauigkeit der Thermoelemente im Bereich von 25 °C bis 65 °C.....	28
Tabelle 8: Temperaturvergleich des Homogenitätstests der Klima-Box.....	29
Tabelle 9: Temperaturvergleich des Homogenitätstests an der Versuchszelle.....	31
Tabelle 10: Messvarianten der LED-Testreihe	32
Tabelle 11: Messergebnisse Testreihe 1	33
Tabelle 12: Messergebnisse Testreihe 2	33
Tabelle 13: Messergebnisse Testreihe 3	33
Tabelle 14: Messergebnisse Testreihe 4 ohne Plexiglasscheibe.....	33
Tabelle 15: Messergebnisse Testreihe 5 mit Plexiglasscheibe	34
Tabelle 16: Gemittelte Temperaturmessergebnisse von drei Messtagen.....	37
Tabelle 17: Temperaturkoeffizient Bestimmung T_k absolut und relativ durch ΔT_{max}	38
Tabelle 18: Temperaturkoeffizient Bestimmung durch lineare Regression	38
Tabelle 19: Bestimmung des finalen Temperaturkoeffizienten T_K	39
Tabelle 20: Temperaturabweichung der berechneten Werte mit dem finalen Temperaturkoeffizienten	39
Tabelle 21: Auflistung der verschiedenen Testreihen	42
Tabelle 22: Gemittelte Temperaturen in °C bei einem Abstand von 1 m	43
Tabelle 23: Gemittelte Temperaturen in °C bei einem Abstand von 0,5 m	43

Tabelle 24: Abweichung der Temperaturen in °C zur Referenztemperatur bei einem Abstand von 1 m	44
Tabelle 25: Abweichung der Temperaturen in °C zur Referenztemperatur bei einem Abstand von 0,5m	44

8.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektrische Schaltung eines Thermoelements	4
Abbildung 2: Thermospannung in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Thermopaare nach DIN EN 60584 bei einer Referenztemperatur von 0°C [Wika, 2018]	6
Abbildung 3: Kennlinienverlauf eines Pt-1.000 [MikCon, 2018]	8
Abbildung 4: Zweileiter-Schaltung mit Konstantstromquelle [HTW-Berlin, 2018]	8
Abbildung 5: Vierleiter-Schaltung mit Konstantstromquelle [HTW-Berlin, 2018]	9
Abbildung 6: Das elektromagnetische Spektrum mit dem genutzten Infrarotbereich [Raytek, 2018]	10
Abbildung 7: Aufbau einer berührungslosen Temperaturmessung [Miosga, 1980]	10
Abbildung 8: Newtonsche Abkühlungskurve	11
Abbildung 9: Aufbau eines Glas-Folien- / Glas-Glas Moduls [Mertens,2018]	12
Abbildung 10: I/U-Kennlinien bei verschiedenen Bestrahlungsstärken und konstanter Temperatur [Häberlin, 2007]	13
Abbildung 11: I/U Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen und konstanter Bestrahlungsstärke [Häberlin, 2007]	13
Abbildung 12: Ausstattung der Klima-Box	15
Abbildung 13: Kabelausführung durch die Rückseite der Klima-Box	16
Abbildung 14: Fenster mit Plexiglasscheibe von Innen / Außen	16
Abbildung 15: Wärmebild der Klima-Box (Seite).....	17
Abbildung 16: Wärmebild der Klima-Box (Fenster)	17
Abbildung 17: Wärmebild der Klima-Box (hinten).....	17
Abbildung 18: Wärmebild der Kabeldurchführung	17
Abbildung 19: TALESUN Modul TP660P [Talesun, 2018]	18
Abbildung 20: Freigelegte Busbar-Kontakte an der Rückseite des Talesun Moduls.....	19
Abbildung 21: Getrennte Busbar-Kontakte und angelötete Leitungskabel.....	19
Abbildung 22: YONGNUO YN600L Vor- / Rückseite [Yonguo, 2018]	20
Abbildung 23: Lichtspektrum des LED-Panels	20
Abbildung 24: PVPM1000C [Pve, 2018] mit Einstrahlungssensor [NES, 2018]	21
Abbildung 25: KEITHLEY-2.000 [Keithley, 2019]	21
Abbildung 26: SOLAR-02 [HT, 2019]	21
Abbildung 27: Digistand 4411 [Digistand, 2019].....	21
Abbildung 28: Pt-100 [Heraeus2, 2018]	22
Abbildung 29: Thermoelement Typ K [Testo, 2018]	22
Abbildung 30: Voltcraft Endoskopiekamera: BS-21 HD USB-Endoskop [Voltcraft, 2018] .	23
Abbildung 31: Coratec TVS 200 [Coratec, 2018]	24
Abbildung 32: Lauda EcoSilver [Lauda]	24

Abbildung 33: P-795 Referenz-Thermometer [P795]	24
Abbildung 34: Versuchsaufbau Kalibrierung	25
Abbildung 35: Temperatur / Spannungskennlinie des Thermoelements 1	26
Abbildung 36: Homogenitätstest der Klima-Box (links) und der Versuchszelle (rechts)	28
Abbildung 37: Abkühlungskurven der in der Klima-Box.....	29
Abbildung 38: Positionierung der Sensoren an der Versuchszelle	30
Abbildung 39: Abkühlungskurven der Homogenität an der Versuchszelle.....	30
Abbildung 40: Versuchsaufbau: Überprüfung der konstanten Bestrahlungsstärke	32
Abbildung 41: Ansicht der Klima-Box von oben	35
Abbildung 42: Versuchsaufbau – Temperaturkoeffizient Bestimmung	36
Abbildung 43: Regressionsgerade für die Temperaturkoeffizient Bestimmung vom 11.12.2018.....	38
Abbildung 44: Geöffnete Klima-Box mit installiertem Modul	40
Abbildung 45: Isolierte Befestigung des Pt-1000	40
Abbildung 46: Halogenstrahler	41
Abbildung 47: Wärmekegel der Halogenstrahler.....	41
Abbildung 48: Temperatursensoren: Pt-1000 (links), Pt-100 (mitte) Pt-300N (rechts)	45
Abbildung 49: 1. Wärmebild mit Sensor bei ca. 80 °C; 2. Wärmebild nach Entfernung der.	46
Abbildung 50: Isoliertes und nicht isoliertes Thermoelement	47