

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Leif Seliger

Peltier-Element als autarke und regenerative solar-
thermische Energiequelle für Gebiete mit hoher Glo-
balstrahlung

Leif Seliger

Peltier-Element als autarke und regenerative solar-
thermische Energiequelle für Gebiete mit hoher Glo-
balstrahlung

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Ing. Gustav Vaupel
Zweitgutachter : Prof. Dr. Ing. Michael Röther

Abgegeben am 19. Dezember 2016

Leif Seliger

Thema der Bachelorthesis

Peltier-Element als autarke und regenerative solarthermische Energiequelle für Gebiete mit hoher Globalstrahlung

Stichworte

Peltier-Element, Solarkollektor, Solarthermie, Thermoelektrizität

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird die Entwicklung einer neuartigen, regenerativen und autarken Energiequelle auf thermoelektrischer Basis beschrieben. Im Anschluss wird mit Hilfe einer eigenen Methode der Ertrag an einem Standort mit hoher Globalstrahlung abgeschätzt. Unter Verwendung praktischer Versuche konnte ein funktionsfähiges Energiesystem entworfen werden, das aus einer Kombination von Sonnenkollektor und handelsüblichem Peltier-Element besteht. Dabei sorgt die Sonnenenergie für die Erhöhung der Temperatur auf der Warmseite des Elements, ein Fließgewässer dient zur Kühlung der Kaltseite sowie zur Durchmischung der Solarflüssigkeit. Die Arbeit enthält neben der Theorie auch die Beschreibung der Versuche zum Verständnis von Peltier-Elementen und Solarthermie sowie eines daraus kombinierten neuen Kollektors. Die Untersuchungen ergaben, dass die regenerative Energiequelle funktionsfähig, derzeit in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Ertrag den herkömmlichen Photovoltaiksystemen aber deutlich unterlegen ist.

Leif Seliger

Title of the paper

Peltier element as self-sufficient and renewable solar thermal energy source for areas with high global radiation

Keywords

Peltier element, Solar collector, Solar thermal energy, Thermoelectricity

Abstract

Inside this report the construction of a novel renewable electrical energy source, which bases on thermoelectrics, is described. Subsequently, the energy output at a location with high global radiation will be estimated by a self-developed method. Under the usage of experiments a functional power system has been created, which consists of a combination of a solar collector and a commercially available Peltier element. The sun energy generates heat for the element's hot side, running water is for cooling the cold side and mixing the solar fluid. The report contains in addition to theory also test records about Peltier elements and solar thermal energy as well as the combination of both. As a result the energy source is operative but under the aspects of cost effectiveness and energy output in an inferior position compared to conventional photovoltaics.

Inhalt

1 Einleitung	5
2 Theorie zu Peltier-Elementen	7
2.1 Seebeck-Effekt.....	7
2.2 Funktionsprinzip von Thermogeneratoren	8
2.3 Aufbau heutiger Peltier-Elemente	12
3 Theorie zum Peltier-Solar-Kollektor	14
3.1 Vorstellung der Energiequelle	14
3.2 Temperaturdifferenz beim Peltier-Solar-Kollektor	15
3.3 Solarthermische Effizienz des Peltier-Solar-Kollektors	22
4 Praktische Durchführungen	23
4.1 Messaufbau zur Ermittlung der Eigenschaften von Peltier-Elementen.....	23
4.1.1 Warmes Wasser (20 ml) mit Propellerstrahl.....	25
4.1.2 Warmes Wasser (50 ml) mit Propellerstrahl.....	26
4.1.3 Auswertung	27
4.2 Versuche mit konstanter Temperatur auf der Warmseite	28
4.2.1 Messaufbau mit überlaufendem Warmwasser	28
4.2.2 Umgebungsluft als Wärmequelle.....	30
4.2.3 Auswertung	30
4.3 Einsatz Peltier-Solar-Kollektor.....	31
4.3.1 Versuchsdurchführung.....	31
4.3.2 Auswertung	34
5 Umsetzung in die Praxis	38
5.1 Aufbau einer Anlage.....	38
5.2 Auslegung der Kollektorparameter.....	39
5.2.1 Wirkungsgrad Peltier-Element	39

5.2.2 Temperaturdifferenz für Standard - Flachkollektor	40
5.2.3 Kollektorfläche und Anzahl der Peltier-Elemente	41
5.2.4 Solarflüssigkeit	41
5.2.5 Stagnationstemperatur Peltier-Solar-Kollektor	42
5.3 Modell zur Ermittlung des Energieertrags	43
5.3.1 Wetterdaten zum Standort Perth	43
5.3.2 Energiebetrachtung über einen Tag.....	45
5.3.3 Abkühlung des Kollektorwassers	49
5.3.4 Energieausbeute bei unterschiedlicher Anzahl von Peltier-Elementen.....	50
5.3.5 Ergebnis.....	52
5.4 Vergleich mit Solarmodulen.....	53
6 Konklusion.....	55
Literaturverzeichnis	56

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
n	Anzahl der Thermopaare	
ρ	Spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{m}$
A_n	Querschnittsfläche eines Thermopaarteils n-dotiert	m^2
l	Länge eines Thermopaarteils	m
R_L	Widerstand einer einzelnen Verbindung zwischen den einzelnen Thermopaaren	Ω
d	Spezifische Dichte	kg/m^3
a_1	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
a_2	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$
k_b, k_f, k_e	Wärmedurchgangskoeffizienten Kollektor (Front, Boden, Seite)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
σ	Elektrische Leitfähigkeit	$1/(\Omega \cdot \text{m})$
λ	Thermische Leitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
P_{Global}	Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
m	Masse des Wärmeträgermediums	kg
c	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums	$\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$
k_t	Thermische Leitfähigkeit eines Peltier-Elements	W/K
<i>Betriebszeit</i>	Zeit, in der der Kollektor der Sonne ausgesetzt ist	s
U_{th}	Thermospannung	V
α	Seebeck-Koeffizient	V/K
κ_n	Wärmeleitkoeffizient	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
k_{A-Gl}	Wärmedurchgangskoeffizient Absorber – Scheibe	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
δ_{Gl}	Stärke der Scheibe	m
λ_{Gl}	Wärmeleitfähigkeit der Scheibe	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
k_{Gl-U}	Wärmedurchgangskoeffizient Scheibe-Umgebung	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
δ_{A-Gl}	Luftspaltbreite	m

$\alpha_{konv,A-Gl}$	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion Absorber-Scheibe	$W/(m^2 \cdot K)$
λ_L	Wärmeleitfähigkeit Luft	$W/(m \cdot K)$
$k_{str,A-Gl}$	Wärmeübergangskoeffizient bei Strahlung Absorber-Scheibe	$W/(m^2 \cdot K)$
σ	Boltzmann-Konstante	$W/(K^4 \cdot m^2)$
ε_A	Emissionsgrad Absorber	
ε_{Gl}	Emissionsgrad Scheibe	
T_A	absolute Temperatur Absorber	K
T_{Gl}	absolute Temperatur Scheibe	K
Nu	Nußelt-Zahl	

1 Einleitung

Derzeit werden global knapp 22 % der elektrischen Energie aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen [1]. Dieser Anteil wird in den nächsten Jahrzehnten noch deutlich steigen müssen, wenn der Ausstieg aus fossilen Energieträgern gelingen soll. Da jede regenerative Energiequelle Vor- und Nachteile hat und ihr Nutzen meistens vom Standort abhängt, ist es erstrebenswert, möglichst viele verschiedene Techniken zur Energieerzeugung verfügbar zu haben, damit jeweils die am besten passende ausgewählt werden kann. Außerdem ist es vor allem für Gebiete ohne Stromanschluss sinnvoll, wenn die erneuerbare Energiequelle autark und in verschiedenen Leistungsstufen betreibbar ist. Peltier-Elemente besitzen die Eigenschaft, elektrische Energie in thermische Energie umwandeln zu können, aber auch umgekehrt, thermische Energie in elektrische. Diese Thermoelektrizität ist bisher in Bezug auf die Gewinnung von elektrischer Energie auf Spezialanwendungen beschränkt. Bei diesen Anwendungen geht es meist nicht darum, den Strom kostengünstig und ressourcenschonend zu gewinnen, sondern um eine langlebige und wartungsfreie Energiequelle. Dabei gehört die Raumfahrt zu den frühesten Nutzern der Technologie. Die dort verwendeten Radioisotopengeneratoren (RTG) enthalten Peltier-Elemente und werden seit 1961 eingesetzt. Sie gelten als sehr zuverlässig und benötigen keine Wartung. Seit 1961 ist kein einziges RTG-System ausgefallen [2], obwohl die RTG bei fast allen Missionen im Einsatz waren. Die Zuverlässigkeit ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass es keine beweglichen Teile gibt. Auch in Kraftwerken oder in Autos, in denen viel Wärmetransport stattfindet, wird bereits an der Energieerzeugung mit Peltier-Elementen geforscht. Sie könnten die Gesamtwirkungsgrade erhöhen [3].

Diese genannten Anwendungen haben jedoch die Gemeinsamkeit, dass sie keine wirklichen regenerativen Energiequellen darstellen. Sie basieren auf dem Verbrauch von fossilen Energieträgern wie Benzin, Kohle, Öl oder Gas bzw. Uran. Werden diese Energieträger nicht mehr verwendet, sind die damit verbundenen thermoelektrischen Generatoren in der Regel überflüssig.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist deshalb die Entwicklung einer eigenständigen thermoelektrischen Energiequelle, die Strom ausschließlich über Solarthermie erzeugt. Des Weiteren soll untersucht werden, wie viel elektrische Energie damit an einem Standort mit hoher Globalstrahlung erzeugt werden könnte.

In Kapitel 2 werden die für die Untersuchungen erforderlichen theoretischen Grundlagen zur Thermoelektrizität und der Funktionsweise von Peltier-Elementen behandelt. In Kapitel 3 folgt die Theorie zu Sonnenkollektoren und die Verbindung dieser mit Peltier-Elementen zu einem Peltier-Solar-Kollektor. Kapitel 4 enthält Beschreibung und Auswertung der praktischen Versuche, die durchgeführt wurden, um die Theorie zu überprüfen. Es werden zum einen die Eigenschaften von Peltier-

Elementen mit Hilfe eines selbstgebauten Messstandes untersucht, zum anderen wird ein Sonnenkollektor mit integriertem Peltier-Element getestet. In Kapitel 5 wird der Ertrag für eine Anlage am Standort Perth in Australien berechnet. Dazu wird ein eigenes Verfahren entwickelt. Es folgt ein Vergleich mit Solarzellen und eine abschließende Zusammenfassung.

“Ich würde mein Geld auf die Sonne und die Solarenergie setzen. Was für eine Energiequelle! Ich hoffe, wir müssen nicht erst die Erschöpfung von Erdöl und Kohle abwarten, bevor wir das angehen.”

Thomas Edison 1931

2 Theorie zu Peltier-Elementen

Dieses Kapitel enthält zum einen die physikalischen Grundlagen zur Thermoelektrizität, zum anderen wird der Aufbau von Peltier-Elementen beschrieben.

2.1 Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt, auch thermoelektrischer Effekt genannt, erklärt die Wechselwirkung von Temperatur und Elektrizität. 1821 entdeckte Thomas Johann Seebeck, dass in einem Leiter, der aus zwei unterschiedlich elektrisch leitfähigen Materialien besteht und zudem verschiedenen Temperaturen an deren Verbindungsstelle ausgesetzt ist, eine elektrische Spannung entsteht. Diese Spannung wird Thermospannung genannt, das Materialpaar Thermopaar oder Thermoelement [4]. In Abbildung 1 ist zur Verdeutlichung ein Aufbau zu sehen. Die unterschiedlichen Temperaturen werden mit T_1 (Heiß) und T_2 (Kalt) bezeichnet. Die Ursache für die Thermospannung sind Thermodiffusionsströme innerhalb eines Leiters, der keine konstante Temperatur über seine gesamte Länge aufweist. Der Thermodiffusionsstrom ist proportional zur Temperaturdifferenz [5].

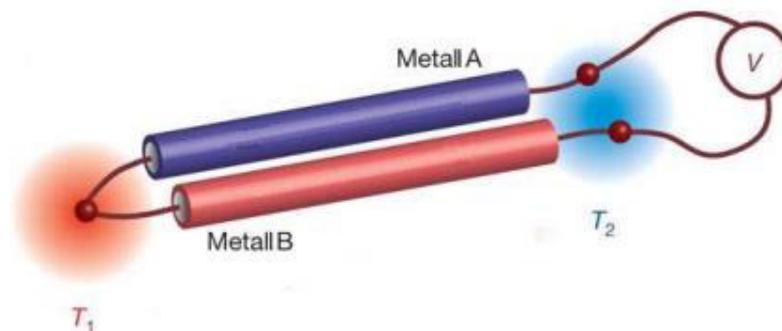


Abbildung 1: Aufbau zum Messen einer Thermospannung [6]

Die Thermospannung wird wie folgt berechnet [7]:

$$U_{th} = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_A - \alpha_B) dT \quad (1-1)$$

Mit α_A und α_B werden thermoelektrische Materialkonstanten, die Seebeck-Koeffizienten, benannt. Durch Integrieren vereinfacht sich die Formel zu:

$$U_{th} = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_1 - T_2) \quad (1-2)$$

Mit Hilfe der Formel (1-2) ist zu erkennen, dass die gewonnene Thermospannung umso größer ist, je mehr sich die Seebeck-Koeffizienten beider Leiter voneinander unterscheiden. In Tabelle 1 sind die Koeffizienten einiger Legierungen aufgeführt, welche für die technische Realisierung der im folgenden Abschnitt dargestellten Peltier-Elemente verwendet werden.

Tabelle 1: Seebeck-Koeffizienten bedeutender Legierungen [8]

Materialtyp Thermosäule	Spezifischer Widerstand $\mu\Omega \cdot m$	Seebeck $\frac{\mu V}{K}$
Quantentopf- Si/SiGe (NP)	0,1 bis 10,0	1200
Bi_2Te_3 (N)	12,6	-248
Sb_2Te_3 (P)	12,6	188
Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 (N)	15	-200
Bi_2Te_3 - Sb_3Te_3 (P)	12	240
$Si_{0,7}Ge_{0,3}$ -Polysilicium (NP)	10 bis 1000	100 bis 500
Polysilicium (NP)	10 bis 1000	100 bis 500

In dieser Bachelorarbeit werden ausschließlich Bismutellurid-Elemente (Bi_2Te_3) verwendet. Bi_2Te_3 wird durch unterschiedliche Dotierungen zu einem p- oder n-Leiter, wobei diese anstatt Metall A und Metall B eingesetzt werden [9]. Die Seebeck-Koeffizienten sind für n - Bi_2Te_3 negativ und für p - Bi_2Te_3 positiv, sodass der Faktor $(\alpha_A - \alpha_B)$ groß wird. In der Praxis wird ein zusammengesetzter Seebeck-Koeffizient α verwendet, der aus der Thermospannung bei einer bestimmten Temperaturdifferenz berechnet wird [10].

$$\alpha = \frac{U_{th}}{T_{heiß} - T_{kalt}} \quad (1-3)$$

2.2 Funktionsprinzip von Thermogeneratoren

Thermoelemente erzeugen kleine Spannungen, die abhängig von der Temperaturdifferenz entlang des Leiters sind. Thermogeneratoren, um die es in dieser Thesis gehen soll, arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Bei ihnen werden aber mehrere Thermopaare in Reihe geschaltet, damit eine größere Spannung entsteht. Des Weiteren werden, im Unterschied zu Thermoelementen zur Temperatur-

messung, Halbleiter für die beiden Metalle verwendet, da damit erheblich größere Thermospannungen hervorgerufen werden können. Abbildung 2 und Abbildung 3 verdeutlichen diese Beschreibung. Peltier-Elemente unterscheiden sich technisch gesehen nicht von Thermogeneratoren.

Die Elektronen, die durch ein Thermopaar fließen, Leitungselektronen, besitzen unterschiedliche Energieniveaus. Ein Leitungselektron im n-Leiter besitzt ein niedrigeres Energieniveau als eines im p-Leiter. Da beide Leiter in Reihe geschaltet sind, muss ein Elektron beim Übergang von einem n-Leiter zu einem p-Leiter Energie zugeführt bekommen. Die bekommt es, indem es der heißen Seite Wärme entzieht. Diese überschüssige Energie gibt es beim nächsten Übergang, auf der kalten Seite, wieder ab. Das Elektron transportiert somit von der heißen Seite entzogene Wärmeenergie zur kalten Seite [11]. Daraus folgt, dass ein Temperatúrausgleich stattfindet, wenn der kalten bzw. warmen Seite nicht ständig Kälte- bzw. Wärmeenergie zugeführt wird. Wenn die beiden Enden der Thermopaarkette miteinander verbunden werden, fließt Strom. Der Thermogenerator verhält sich wie eine ideale Spannungsquelle, der innere Widerstand besteht aus dem ohmschen Widerstand der Kette [12]. Dieser ist temperaturabhängig.

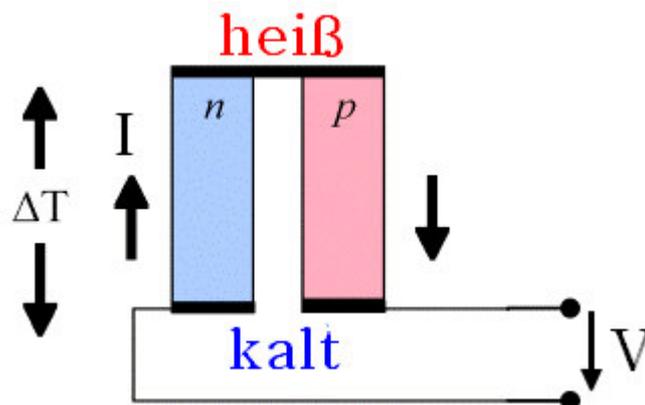


Abbildung 2: Thermopaar aus zwei Halbleitern nach [13]

Zur Berechnung der Thermospannung eines Generators kann die Formel aus [14] auch hier angewendet werden:

$$U_{th} = n \cdot \int_{T_{kalt}}^{T_{heiß}} (\alpha_p - \alpha_n) dT \quad (1-4)$$

Dabei stehen α_p, α_n für die Seebeck-Koeffizienten der beiden Halbleiter.

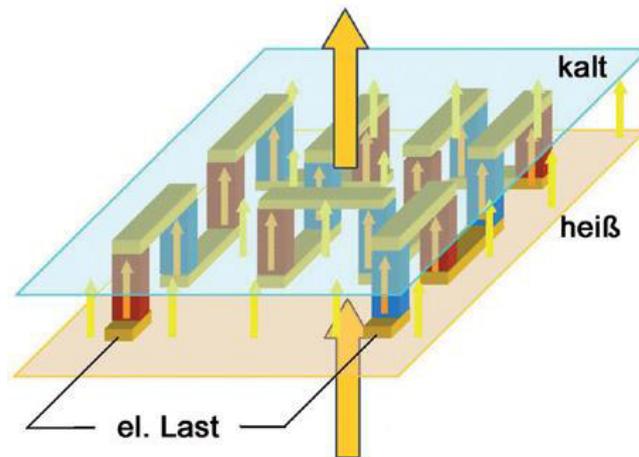


Abbildung 3: Aufbau Thermoelektrischer Generator [15]

Mit n wird die Anzahl der Thermopaare bezeichnet. Der Innenwiderstand des gesamten Generators wird berechnet nach [16].

$$R_i = n \cdot \left(\frac{\rho_n \cdot l}{A_n} + \frac{\rho_p \cdot l}{A_p} + R_L \right) \quad (1-5)$$

Mit R_L wird der Widerstand der Kupferbrücken, die die Thermopaare miteinander verbinden, beschrieben. ρ_n und ρ_p stehen für die spezifischen Widerstände der Halbleiter, A_n, A_p für deren Querschnittsfläche. Die vom Generator auf der heißen Seite aufgenommene Wärmeleistung wird vereinfacht wie folgt berechnet [17]:

$$P_{\text{heiß}} = \alpha \cdot I \cdot T_{\text{heiß}} - \frac{R_i}{2} \cdot I^2 + K \cdot (T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}}) \quad (1-6)$$

$$K = n \cdot \left(\frac{\kappa_n \cdot A_n}{l} + \frac{\kappa_p \cdot A_p}{l} + K_l \right) \quad (1-7)$$

K_l gibt alle anderen thermischen Verluste an, die nicht durch die Verluste der Halbleiter abgedeckt werden (Kupfer). l gibt die Länge des n- bzw. p-Leiters an. κ_n und κ_p stehen für die Wärmeleitkoeffizienten der Halbleiter, I steht für den elektrischen Strom. Die Vereinfachung liegt darin, dass der Widerstand R und die thermale Leitfähigkeit K als temperaturunabhängig angesehen werden. Außerdem wird der thermische Widerstand der Ober- und Unterseite des Elements, meist Keramik, vernachlässigt.

Der Wirkungsgrad eines Peltier-Elements berechnet sich mit [18] zu:

$$\eta = \eta_{carnot} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{kalt}}{T_{heiß}}} \quad \text{wobei} \quad \eta_{carnot} = \frac{T_{heiß} - T_{kalt}}{T_{heiß}} \quad (1-8)$$

$$ZT = \frac{(\alpha/n)^2 \cdot T_{avg} \cdot \sigma}{\lambda} \quad (1-9)$$

Der Wirkungsgrad zur Umwandlung von thermischer Energie in mechanische- bzw. elektrische Energie wird durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. Für die Berechnung der thermoelektrischen Leistungszahl ZT (engl. figure of merit) wird die elektrische- und thermische Leitfähigkeit σ , λ der Thermopaare, die mittlere Temperatur $T_{avg} = \frac{T_{heiß} + T_{kalt}}{2}$ und der Seebeck-Koeffizient α benötigt.

ZT ist temperaturabhängig und kann für die wichtigsten thermoelektrischen Materialien aus Abbildung 4 abgelesen werden. Auf der x-Achse ist T_{avg} aufgetragen.

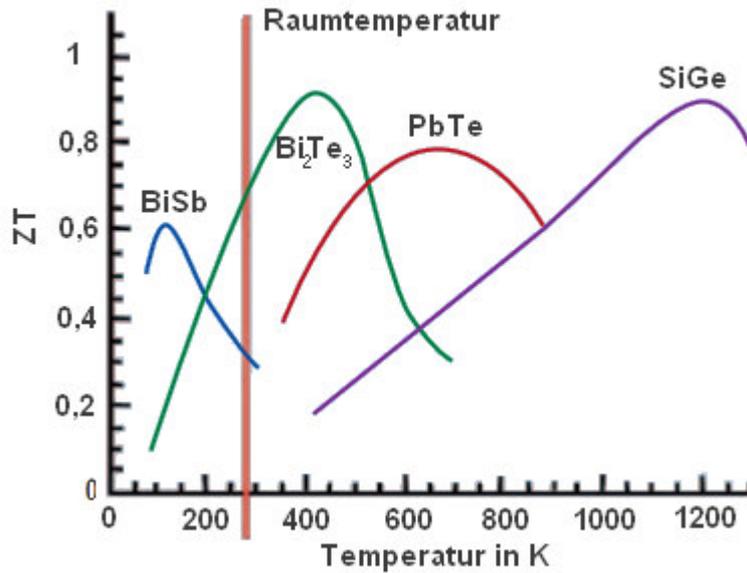


Abbildung 4: Effizienzwerte ZT der wichtigsten thermoelektrischen Materialien als Funktion der Temperatur nach [19]

Umso größer ZT , desto effizienter ist die Energieerzeugung. Die maximale Leistung wird von einem Thermogenerator abgegeben, wenn der Innenwiderstand dem Lastwiderstand entspricht [20].

$$P_{max} = U_{last} \cdot I_{last} = \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta T}{4 \cdot R_i} = \frac{(\alpha \cdot \Delta T)^2}{4 \cdot R_i} \quad (1-10)$$

2.3 Aufbau heutiger Peltier-Elemente

In Abbildung 5 ist der Aufbau eines handelsüblichen Peltier-Elements dargestellt. Die äußerste Schicht des Elements besteht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3)-Keramik, sie dient zur gleichmäßigen Aufnahme bzw. Abgabe der Wärme. Diese Keramik ist bei gleichzeitig guter thermischer Leitfähigkeit ein schlechter elektrischer Leiter. Auf die Kupferbrücken werden die Thermopaarteile (dices) angelötet und mit der Keramikplatte verbunden. Die Anzahl der Thermopaare kann je nach Leistungsanforderung groß oder klein sein, sodass gerade für Mikroanwendungen eine sehr kleine Energiequelle möglich ist.

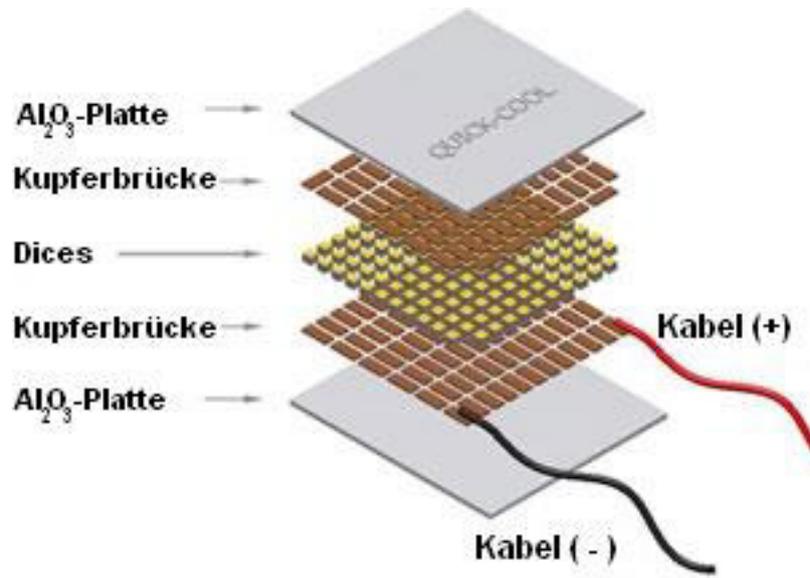


Abbildung 5: Aufbau eines Peltier-Elements [21]

3 Theorie zum Peltier-Solar-Kollektor

In diesem Kapitel wird die zu entwickelnde Energiequelle vorgestellt und theoretisch berechnet, wobei gleichzeitig die dazu benötigten Grundlagen aus der Solarthermie behandelt werden.

3.1 Vorstellung der Energiequelle

Aus Kapitel 2 folgt, dass ein Peltier-Element eine Spannung erzeugt, wenn an beiden Seiten unterschiedliche Temperaturen anliegen. Ein Ansatz für eine erneuerbare Energiequelle mit Peltier-Elementen wäre es, unterschiedliche Lufttemperaturen zur Energiegewinnung nutzbar zu machen. Beispielsweise können die Temperaturen in einer Wüstenregion auf bis zu 50°C ansteigen, während das Innere von klimatisierten Gebäuden meist nur ca. 20°C warm ist. Es würde somit eine Temperaturdifferenz von 30 K entstehen, die zur Stromerzeugung zur Verfügung steht. Wenigstens zwei Nachteile gibt es dabei: Zum einen wären nur wenige Standorte geeignet, zum anderen fungieren die Elemente als Wärmebrücke und würden der Klimaanlage entgegenarbeiten.

Vor allem der zweite Punkt ist ausschlaggebend dafür, dass nach einer Lösung gesucht wird, bei der die Kühlung der kalten Seite durch natürliche Mittel erreicht werden kann. In der Regel hat dies den Nachteil, dass beispielsweise ein Fluss umso weniger kühlt, je höher die Lufttemperatur ist, da er sich selbst erwärmt. Temperaturdifferenz und Thermospannung werden dadurch kleiner. Eine große Temperaturdifferenz am gleichen Ort ist in der Natur deswegen selten zu finden.

Das Aufstellen eines Solarkollektors über der Warmseite des Peltier-Elements könnte jedoch erheblich größere Temperaturdifferenzen ermöglichen. Peltier-Elemente werden bereits zusammen mit Sonnenkollektoren eingesetzt. Sie dienen allerdings nicht als eigenständige Energiequelle, sondern werden nur bei Überhitzung des Wärmeträgers eingeschaltet, um diesen unter Stromgewinn abzukühlen [22].

Diese Arbeit möchte hingegen kein Kombi-System untersuchen, welches Warmwasser und bisweilen Strom erzeugt, sondern eine rein elektrische Energiequelle, die keine Wasserzuleitungen und Regeleinrichtungen benötigt. Im Folgenden wird die Kombination von Sonnenkollektor und Peltier-Element als Peltier-Solar-Kollektor bezeichnet.

Für den Sonnenkollektor könnte dafür nicht nur ein Wasserkollektor, der Wasser oder Öl als Trägermedium enthält, sondern auch ein vor allem in den USA und Kanada verbreiteter Luftkollektor geeignet sein. Dieser wird nicht zur Wassererwärmung, sondern zur Wohnraumheizung eingesetzt. Er ist in der Regel kostengünstiger und wartungsärmer als ein Wasserkollektor, denn er braucht

weder rostfreie Rohre noch Sicherungsmechanismen, die beim Sieden eines flüssigen Trägermediums greifen müssen. Da Wasser bei hoher Sonneneinstrahlung innerhalb von wenigen Stunden zum Kochen gebracht werden kann, erscheint der Luftkollektor anfänglich vorteilhaft, da die in ihm enthaltene Luft deutlich schneller und ohne das energetisch verlustreiche Sieden erhitzt wird. Deswegen werden in den Untersuchungen beide Kollektorarten betrachtet.

3.2 Temperaturdifferenz beim Peltier-Solar-Kollektor

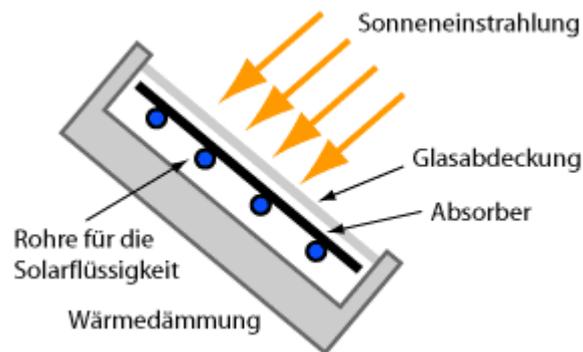


Abbildung 6: Aufbau eines Flachkollektors [23]

In Abbildung 6 ist der prinzipielle Aufbau eines handelsüblichen Flachkollektors mit Flüssigkeit als Wärmeträger aufgezeigt. Ein Luftkollektor ist ähnlich aufgebaut, sodass die Unterschiede zwischen beiden Kollektorarten bei Bedeutung im Text erläutert werden.

Die durch die Glasabdeckung einfallende Sonnenstrahlung wird vom Absorber, meist ein dunkel beschichtetes, gut thermisch leitendes Metall, in Wärme umgewandelt und an die durch die Rohre fließende Solarflüssigkeit abgegeben. Langwellige Strahlung, die infolge der Erwärmung vom Absorber wieder zurückgeht, wird größtenteils durch das Glas zurückgehalten und bleibt somit im Inneren des Kollektors. Die Solarflüssigkeit in den Rohren kann aus Wasser bestehen und direkt als Warmwasser genutzt werden, meist besteht sie aber aus einem Gemisch von Wasser mit Propylenglykol, welches dafür sorgt, dass die Solarflüssigkeit im Winter nicht einfriert und im Sommer nicht zum Sieden gebracht wird. Damit die Wärmeverluste durch die Wände verringert werden, sind sie gut gedämmt, meist mit Mineral- oder Glaswolle.

Ebenfalls erhältlich sind unter anderem Vakuum-Röhrenkollektoren, bei denen die Dämmung aus einem Vakuum besteht, das kleinere thermische Verluste verursacht.

Der in dieser Arbeit zu entwickelnde Peltier-Solar-Kollektor, dargestellt in Abbildung 7, ist eine Abwandlung davon. Die Abbildung stellt nur eine von vielen möglichen Lösungen dar. Da die erwärmte Flüssigkeit nicht abtransportiert werden muss, werden keine Rohre benötigt, das Absorberblech

kann direkt über dem Fluid angebracht werden. Bei einem Luftkollektor, der nur Luft und keine Solarflüssigkeit enthält, kommt der Absorber auf den Boden (Abbildung 8) [24]. Zusätzlich ist ein Peltier-Element vorhanden, dessen Warmseite im Kollektorinneren liegt. Die über den Absorber erwärmte Solarflüssigkeit erhöht die Temperatur auf der Warmseite des Elements, während die Kaltseite an der kühleren Umgebungsluft oder einem anderen kälteren Medium liegt.

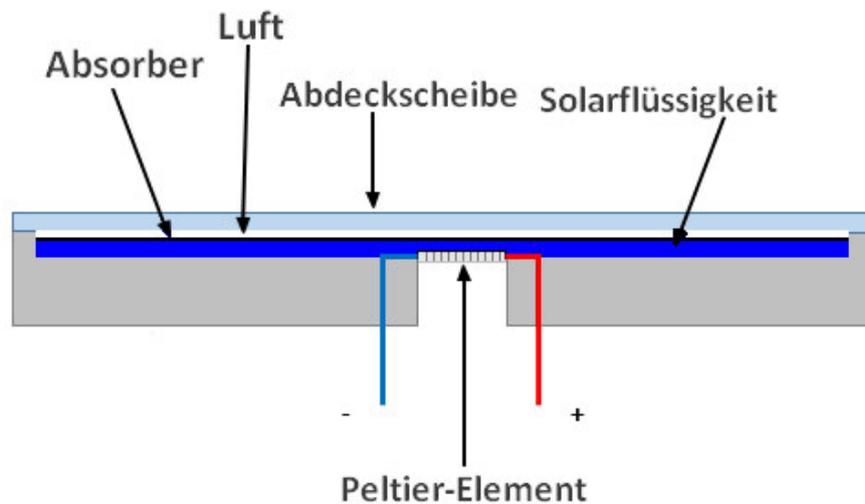


Abbildung 7: Aufbau eines Peltier-Solar-Kollektors mit Solarflüssigkeit als Wärmeträger

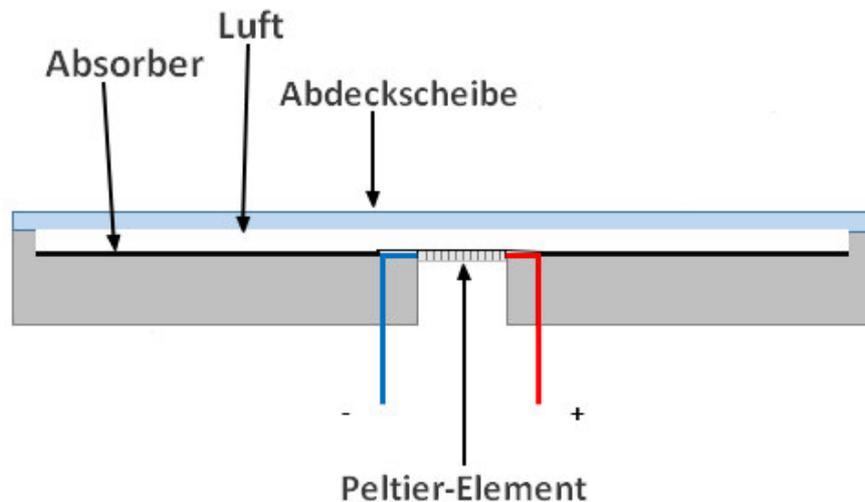


Abbildung 8: Aufbau eines Peltier-Solar-Kollektors mit Luft als Wärmeträger

Um die elektrische Leistung eines Peltier-Solar-Kollektors zu berechnen, wird die Temperaturdifferenz zwischen Solarflüssigkeit/Luft und Umgebung benötigt. Sie wird aus der Grundgleichung der Wärmelehre berechnet:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (3-1)$$

Mit Q wird die Sonnenenergie bezeichnet, die dem System zugeführt wird. Sie wird aus der Globalstrahlung bestimmt. Das ΔT gibt die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und dem Wärmeträger im Inneren des Kollektors an. c beschreibt die spezifische Wärmekapazität des Mediums, das durch die Sonne erhitzt wird. Bei einem Luftkollektor ist das Luft, bei einem Wasserkollektor die Solarflüssigkeit. Die Masse des Mediums berechnet sich mit:

$$m = d \cdot V \quad (3-2)$$

Für die Dichte d werden Normwerte bei 20°C verwendet. Das Volumen kann mit $V = A \cdot h$ berechnet werden, wobei A die Kollektorinnenfläche, h den Pegelstand des Mediums darstellt.

Für Q kann nicht die gesamte am Boden ankommende Globalstrahlung verwendet werden, da beim Durchtritt durch die Scheibe des Kollektors Reflexions- und Absorptionsverluste auftreten, die zunehmen, wenn die Sonnenstrahlen nicht senkrecht zur Scheibe auftreffen (Abbildung 9) [25].

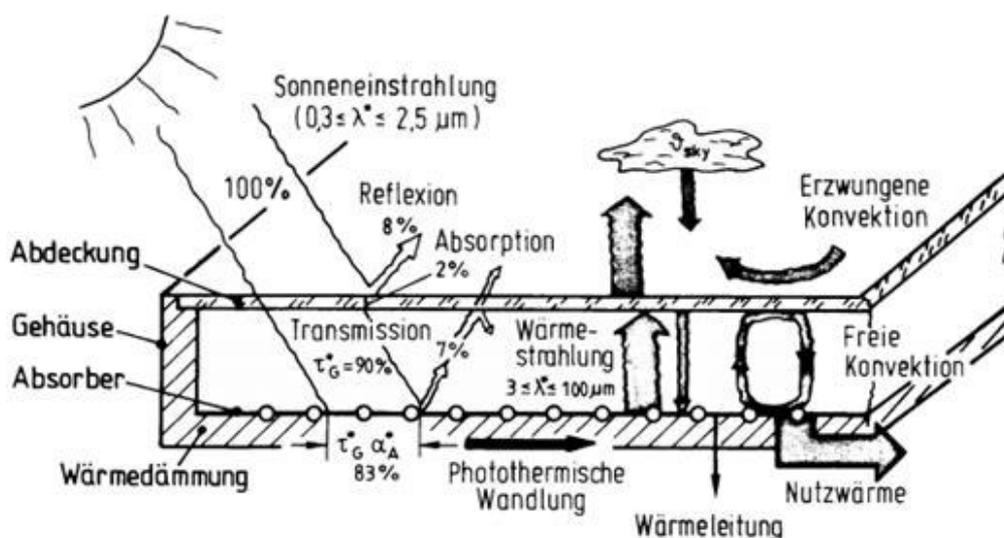


Abbildung 9: Solarkollektor Schema [26]

Die Prozentwerte in der Abbildung stellen nur Beispielwerte dar, im Folgenden werden die Formeln zur genauen Berechnung aufgeführt. Der Gesamttransmissionsgrad τ beim Durchtritt durch die Scheibe wird mit [27] berechnet zu:

$$\tau = a \cdot (1 - R) \quad (3-3)$$

R entspricht dem Reflexionsgrad und a dem Absorptionsgrad [28]. Die Winkel können Abbildung 10 entnommen werden.

$$R = 1 - \left(0,5 \cdot \left(\frac{(1 - R_s)}{(1 + R_s)} + \frac{(1 - R_p)}{(1 + R_p)} \right) \right) \quad (3-4)$$

mit:

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad R_p = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3-5)$$

für Luft als Umgebungsmedium gilt:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_1)}{n_{sol}}\right) \quad (3-6)$$

Dabei bezeichnet n_{sol} den Brechungsindex des Scheibenmaterials. R_s ist der Reflexionsgrad für senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Strahlung. R_p ist der Reflexionsgrad für parallel zur Einfallsebene polarisierte Strahlung.

Die Absorptionsverluste werden mit dem Absorptionsgrad [29] definiert zu:

$$a = \exp\left(\frac{-K \cdot s}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (3-7)$$

K kennzeichnet den Extinktionskoeffizienten und s die Scheibenstärke. Im Anhang C können deren Werte für übliche Abdeckscheiben eingesehen werden.

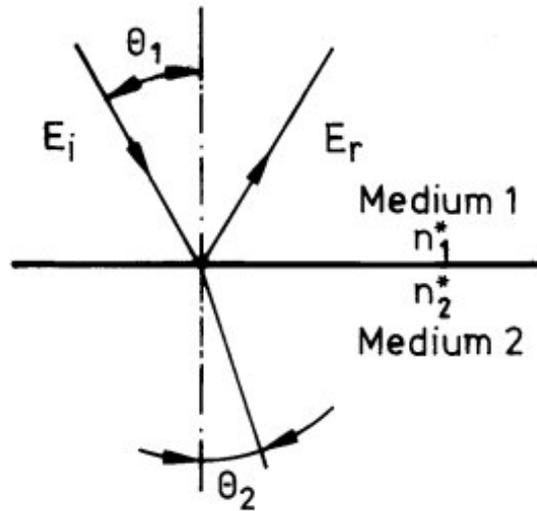


Abbildung 10: Reflexion an einem Medium [30]

Die Berechnungen nach obigen Formeln können von der Realität abweichen, denn die Materialien sind nie komplett homogen und die Extinktionskoeffizienten weichen von Material zu Material ab bzw. sind nicht bekannt.

Da die Reflexionsverluste am Absorber gering sind, werden sie hier vernachlässigt.

Sobald sich die Solarflüssigkeit über die Umgebungstemperatur erwärmt, entstehen thermische Verluste durch Wände und den Übergang Luftspalt/Frontscheibe, bei Luft als Medium nur durch Wände und Frontscheibe. Es wird hierfür die Formel (3-8) benutzt [31].

$$Q_{\text{verlust}} = (k_f \cdot A_{\text{Oberseite}} + k_e \cdot A_{\text{Seite}} + k_b \cdot A_{\text{Unten}}) \cdot \Delta T \quad (3-8)$$

Die Formel wird verdeutlicht durch Abbildung 11. Je größer die Wärmedurchgangskoeffizienten k , desto schlechter ist die Wärmedämmung. ΔT gibt hierbei die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung an. Bei Voraussetzung einer idealen Wärmeübertragung zwischen Absorber und Solarflüssigkeit/Luft kann die mittlere Absorbentemperatur mit der Fluidtemperatur gleichgesetzt werden [32].

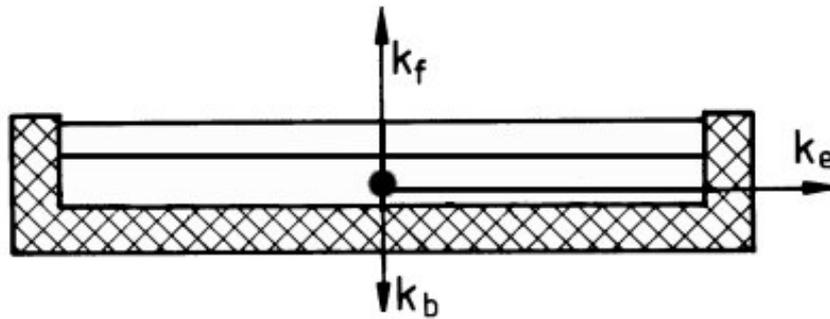


Abbildung 11: Wärmedurchgangskoeffizienten am Flachkollektor mit Solarflüssigkeit nach [33]

Aus den genannten Formeln wird die Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermedium und Umgebung berechnet:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} \rightarrow T_{\text{innen}} = \frac{Q}{m \cdot c} + T_{\text{Umgebung}}$$

$$Q_{\text{verlust}} = (k_f \cdot A_{\text{Oberseite}} + k_e \cdot A_{\text{Seite}} + k_b \cdot A_{\text{Unten}}) \cdot \Delta T \cdot \text{Betriebszeit} \rightarrow$$

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{Global}} \cdot \tau - Q_{\text{verlust}}}{m \cdot c} =$$

$$\frac{P_{\text{Global}} \cdot \tau \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit} - (k_f \cdot A_{\text{Oberseite}} + k_e \cdot A_{\text{Seite}} + k_b \cdot A_{\text{Unten}}) \cdot \Delta T \cdot \text{Betriebszeit}}{m \cdot c}$$

Auflösen nach ΔT ergibt:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Global}} \cdot \tau \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit}}{m \cdot c + E_{\text{verluste}}} \quad (3-9)$$

wobei:

$$E_{\text{verluste}} = (k_f \cdot A_{\text{Oberseite}} + k_e \cdot A_{\text{Seite}} + k_b \cdot A_{\text{Unten}}) \cdot \text{Betriebszeit} \quad (3-10)$$

Mit P_{Global} wird die Globalstrahlung pro m^2 bezeichnet, die Betriebszeit wird in Sekunden angegeben. Die Formel zeigt, dass die Temperaturdifferenz umso größer ist, desto kleiner die Masse bei

gleicher Fläche ist. Die Tiefe des Kollektors sollte also möglichst klein gewählt werden, wenn hohe Temperaturdifferenzen erreicht werden sollen. Da aber auch die thermischen Verluste mit ansteigender Temperaturdifferenz zunehmen, nähert sich diese asymptotisch einem Grenzwert an.

In Formel (3-9) wird der Wärmeverlust durch das Peltier-Element nicht berücksichtigt. Umso größer die Temperaturdifferenz, desto größer der Wärmestrom durchs Element, welcher in Datenblättern mit der thermischen Leitfähigkeit k_t in W/K beschrieben wird. Die durch das Element austretende Wärmeenergie wird genauso wie die Verluste an den Kollektorwänden behandelt:

$$\Delta T = \frac{Q_{Global} \cdot \tau - Q_{Verlust} - Q_{Element}}{m \cdot c} =$$

$$\frac{P_{Global} \cdot \tau \cdot A_{Kollektor} \cdot Betriebszeit - E_{verluste} \cdot \Delta T - k_t \cdot \Delta T \cdot Betriebszeit}{m \cdot c}$$

Auflösen nach ΔT ergibt:

$$\Delta T = \frac{P_{Global} \cdot \tau \cdot A_{Kollektor} \cdot Betriebszeit}{m \cdot c + E_{verluste} + Betriebszeit \cdot k_t} \quad (3-11)$$

In obigen Formeln wird während der Betriebszeit konstante Globalstrahlung und gleichbleibende Umgebungstemperatur vorausgesetzt.

3.3 Solarthermische Effizienz des Peltier-Solar-Kollektors

Die solarthermische Effizienz des Peltier-Solar-Kollektors kann aus 3.2 wie folgt berechnet werden:

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{verlust}}}{P_{\text{Global}}} \quad (3-12)$$

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{Global}} \cdot (1 - \tau) + P_{\text{verluste,th}}}{P_{\text{Global}}} \quad (3-13)$$

wobei:

$$P_{\text{verluste,th}} = (k_f \cdot A_{\text{Oberseite}} + k_e \cdot A_{\text{Seite}} + k_b \cdot A_{\text{Unten}}) \cdot \Delta T + k_t \cdot \Delta T \quad (3-14)$$

Dabei bezeichnet $P_{\text{verluste,th}}$ die thermischen Verluste am Kollektor.

Dieser „Wirkungsgrad“ beschreibt nicht den Gesamtwirkungsgrad, da die Umwandlungsverluste von thermischer Energie in elektrische Energie durch das Peltier-Element nicht berücksichtigt sind.

Er dient nur zur Auslegung der Parameter des Peltier-Solar-Kollektors.

4 Praktische Durchführungen

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3 behandelte Theorie überprüft. In Versuchen soll zum einen der Zusammenhang zwischen Thermospannung und Temperaturdifferenz untersucht werden, zum anderen, in wie weit die Energieausbeute von der Menge der zur Verfügung stehenden Wärme abhängt. Letzteres ist für die Auslegung der Kollektorgröße relevant. Am Schluss wird ein Peltier-Solar-Kollektor aufgebaut und getestet. Für die Untersuchungen wird das Peltier-Element TEG1-40-40-19/200 der Firma Eureka Messtechnik GmbH aus Köln verwendet.

4.1 Messaufbau zur Ermittlung der Eigenschaften von Peltier-Elementen

Anfangs wurden beide Seiten des Elements über zwei Metallbleche an warmes bzw. kaltes Wasser „angeschlossen“, um den Zusammenhang zwischen Spannung und Temperaturdifferenz zu erforschen. Dieser Aufbau wurde jedoch nach Messungen für mangelhaft befunden, da das verwendete Metall Aluminium, obwohl ein guter Wärmeleiter, trotzdem noch relativ träge auf Temperaturänderungen reagierte. Obendrein war die am Element ankommende Wärme stark von der Eintauchtiefe der Bleche im Wasser abhängig. Es wurde deshalb der in Abbildung 12 und Abbildung 13 zu sehende Aufbau entwickelt, der bessere Ergebnisse ermöglicht. Das warme bzw. kalte Wasser liegt direkt an den Keramikflächen des Elements an, sodass die vorher genannten Nachteile nicht entstehen können. Der linke „Turm“ hebt den Wasserspiegel, damit das kalte Wasser gegen die Unterseite des Elements gedrückt wird. Der Propeller wird benutzt, um das Kühlen zu unterstützen, falls die Konvektion der Wasserschicht an der Kaltseite des Elements mit dem umgebenden Wasser nicht ausreicht. Die Rampe dient dazu, den Propellerstrahl in Richtung des Elements zu lenken, da vorangegangene Versuche gezeigt haben, dass es keinen messbaren Unterschied zum unbewegten Wasser gibt, wenn der Propeller ohne Rampe eingesetzt wird. Eine direkte Anströmung ist erforderlich.

Das kalte Wasser hatte bei den Versuchen eine Temperatur von 19°C, was der Zimmertemperatur entsprach. Dadurch musste nicht nachgekühlt werden. In den folgenden Diagrammen ist daher nur die Wassertemperatur auf der warmen Seite aufgeführt. Ausgenommen ist der letzte Versuch, in welchem die kalte Temperatur angegeben ist. In allen Versuchen wurde die Thermospannung des Peltier-Elements über die optische Schnittstelle des Multimeters am PC mitgeloggt.



Abbildung 12: Messaufbau zur Ermittlung der Eigenschaften von Peltier-Elementen

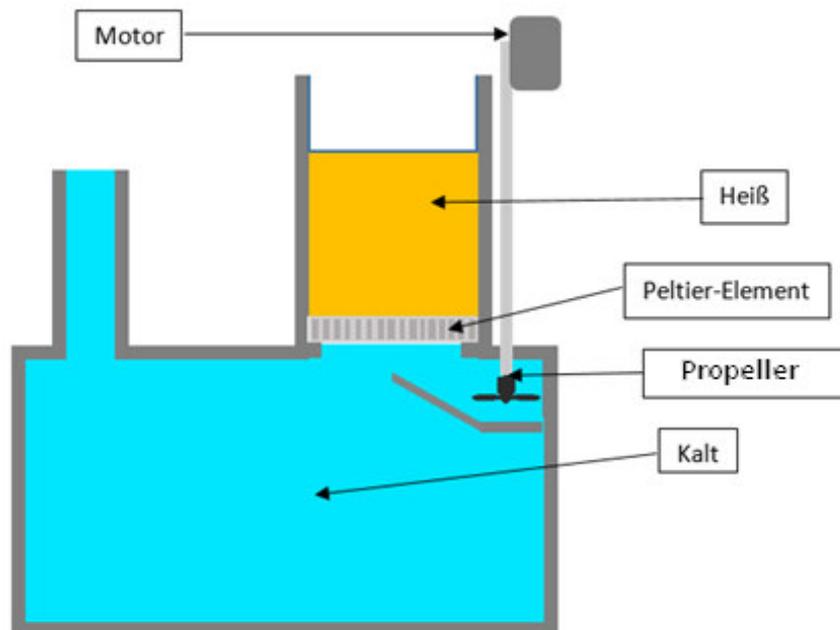


Abbildung 13: Skizze Messaufbau

4.1.1 Warmes Wasser (20 ml) mit Propellerstrahl

Beim ersten Versuch wurde 37°C warmes Wasser (20 ml) in den rechten Turm gefüllt. Sobald das Wasser die Oberseite des Elements benetzte, stieg die Spannung innerhalb von Millisekunden sprunghaft auf bis zu 590 mV an, sank aber kurz danach auf ca. 300 mV ab (Abbildung 14). Von da an fiel die Spannung leicht exponentiell bis zum Ende der Messung. Nach 24 Minuten, bei Erreichen eines Werts von 50 mV, wurde der Versuch beendet, da nur noch kleine Spannungen zu erwarten waren. Die Temperatur des Warmwassers sank am Anfang zügig von 37°C auf 32°C. Danach fiel die Temperatur proportional zur Spannung, bis nach 24 Minuten ein Wert von 21°C erreicht wurde.

Der Propeller war bei diesem Versuch eingeschaltet, das Warmwasser wurde während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich umgerührt. Bei Versuchen ohne Umrühren entstanden Temperaturunterschiede von mehreren Kelvin zwischen dem Wasser direkt über dem Peltier-Element und den Schichten darüber. Da das Peltier-Element eine Wärmebrücke darstellt, neigen die Wasserschichten an den Elementaußenseiten zum Temperatenausgleich. Die Spannung bricht dann erheblich schneller ein. Das gleiche galt für Versuche, in denen der Propeller nicht aktiv war. Der Propeller trug die Wärme von der Kaltseite des Elements ab, ohne dass das Kaltwasser aufgrund des größeren Volumens (1 L) sich messbar erwärmte. Messungen, welche diese Aussagen belegen, sind im Anhang B zu finden.

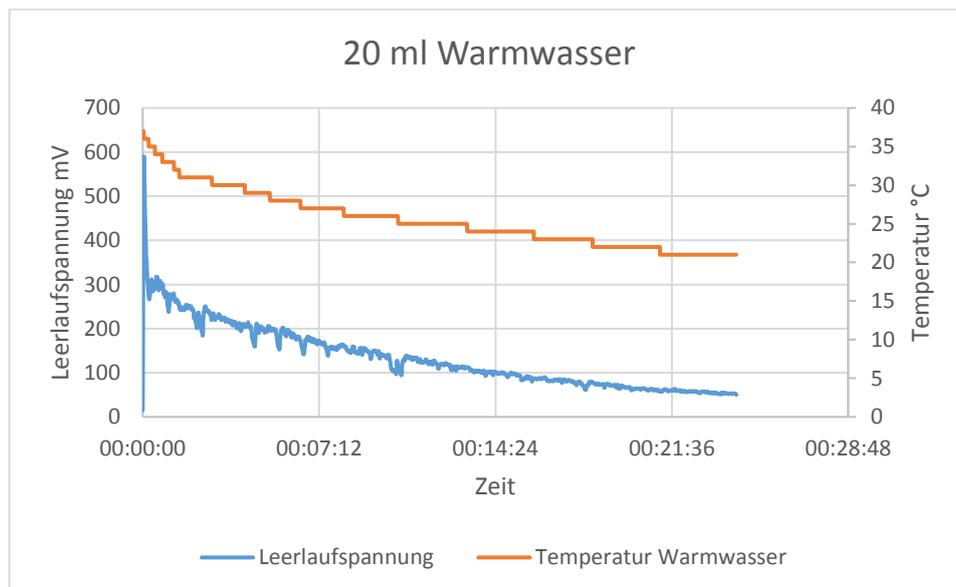


Abbildung 14: 20 ml warmes Wasser mit Propellerstrahl und Umrühren des Warmwassers

4.1.2 Warmes Wasser (50 ml) mit Propellerstrahl

Zu vermuten ist, dass die thermischen Verluste durch ein Peltier-Element umso weniger zur Temperatursenkung des Wärmeträgers beitragen, desto mehr davon vorhanden ist. Die Verluste durch die Wärmebrücke des Peltier-Elements könnten dann besser kompensiert werden. Diese Annahme soll überprüft werden, indem eine größere Warmwassermenge als zuvor verwendet wird. Da die Temperaturdifferenz gleichbleibt, wird keine größere Spannung erwartet, sondern ein langsames Absinken der Warmwassertemperatur und der Thermospannung.

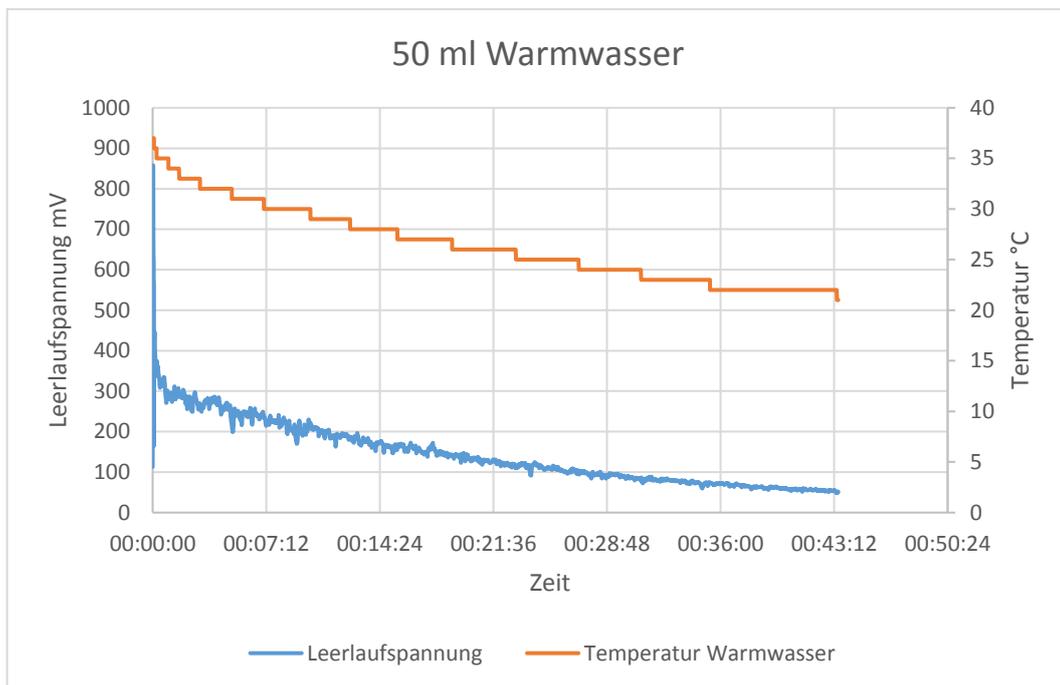


Abbildung 15: 50 ml warmes Wasser mit Propellerstrahl und Umrühren des Warmwassers

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis für den Versuch mit 50 ml Warmwasser. Abgesehen von der Warmwassermenge war der Versuch mit dem vorherigen identisch. Die Spannung stieg anfangs auf bis zu 858 mV und sank dann ebenfalls zügig auf ca. 350 mV ab. Genau wie beim 20 ml-Versuch fiel sie dann gleichmäßig auf einen Endwert von 50 mV. Dieser wurde jedoch erst nach 43 Minuten 30 Sekunden erreicht. Die Temperatur des Warmwassers verhielt sich genauso wie beim 20 ml-Versuch, mit dem Unterschied, dass sie, wie die Spannung auch, ungefähr doppelt so lang zum Absinken brauchte.

4.1.3 Auswertung

Mittels Aufsummieren der Spannungswerte im Versuchszeitraum ergibt sich für den 20 ml-Versuch, dass 48 % weniger Spannung vorhanden war als beim 50 ml-Versuch. Da mehr als doppelt so viel Warmwasser verwendet wurde, ist eigentlich ein Wert größer 50 % zu erwarten. Der etwas kleinere Wert ist mit den größeren Verlusten an die Umgebung zu erklären, die aufgrund der längeren Versuchsdauer entstanden. Da Peltier-Elemente wie eine ideale Spannungsquelle arbeiten, bedeutet eine höhere Spannungssumme auch mehr Energie.

Die maximale Thermospannung lag beim 20 ml-Versuch deutlich unterhalb der theoretischen Spannung von 0,972 V, die mit (1-3) berechnet wird. Auch im weiteren Verlauf änderte sich das nicht. So wäre beispielsweise bei 28 Minuten 21 Sekunden bei einer Temperaturdifferenz von 5 K eine Spannung von 270 mV zu erwarten, tatsächlich waren es nur 100,7 mV. Der Anfangspeak beim 50 ml-Versuch lag deutlich näher am theoretischen Wert, danach verhielt sich die Spannung dagegen wie im 20 ml-Versuch. Vermutet wird, dass die Oberseite des Elements bei 50 ml Wasser mehr Zeit hat sich vollständig aufzuwärmen, da die Temperatur des Warmwassers langsamer fällt. Außerdem scheint die Höhe der Spannung mit der Einfüllmethode des Wassers zu tun. Wenn das Wasser nahezu gleichzeitig die ganze Fläche bedeckt und zudem aufgewirbelt ist, wird der Wärmeübergang zum Peltier-Element am besten unterstützt. Verantwortlich dafür ist der Wärmeübergangskoeffizient, der mit der Strömungsgeschwindigkeit an den Grenzflächen zunimmt [34].

Eine weitere Ursache könnte eine andere Mitteltemperatur T_{avg} bei der Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten im Herstellerlabor sein (Kapitel 2.2). Eine höhere Temperatur führt aufgrund des besseren Wirkungsgrads zu einem größeren Seebeck-Koeffizienten. Die Firma Eureka verwies auf den russischen Hersteller, da die genauen Messanordnungen unbekannt seien.

Unter Einbeziehung der Versuche aus Anhang B konnte gezeigt werden, dass Kalt- und Warmwasser durchmischt werden müssen, da die Spannung ansonsten deutlich schneller auf kleine Spannungswerte zusammenfällt. Das Warmwasser, welches direkt über dem Element liegt, wird abgekühlt und muss deswegen durch frisches Warmwasser erneuert werden, damit die Temperaturdifferenz so groß wie möglich bleibt. Auch das Kühlwasser muss bewegt werden. Ohne Durchmischung von Warm- bzw. Kaltwasser ist die Summe der Spannungsintervalle um ein Vielfaches kleiner als mit Durchmischung.

4.2 Versuche mit konstanter Temperatur auf der Warmseite

In diesem Kapitel wird untersucht, ob bei konstanter Temperatur auf der Warmseite eine dauerhaft gleichbleibende Thermospannung erzeugt werden kann. Dies ist Voraussetzung für eine wirtschaftliche Energiequelle.

4.2.1 Messaufbau mit überlaufendem Warmwasser

Ein 1 Meter über dem Versuchsaufbau stehender 6 Liter fassender Warmwasserbehälter wurde mit dem rechten Turm verbunden. Durch das stetig nachfließende Wasser überflutete der Turm schon nach kurzer Zeit und ermöglichte damit einen stetigen Wasseraustausch (Abbildung 16). Das Umrühren konnte deswegen entfallen. Tatsächlich stellte sich über 5 Minuten eine relativ gleichmäßig große Spannung ein. Danach war der Behälter leer und die Spannung brach ein (Abbildung 17). Dies galt allerdings nur dann, wenn der Propeller zur Wasserzirkulation in Betrieb war. Ohne angeschalteten Propeller war eine konstante Spannung trotz Warmwasserzufuhr nicht möglich, da die durchtretende Wärmeenergie auf der Kaltseite des Elements nicht ausreichend abtransportiert wurde (Abbildung 18). Bei einer Temperaturdifferenz von 18 K wurden die theoretischen Werte von 972 mV bei beiden Versuchen deutlich unterschritten (max. 575 mV).

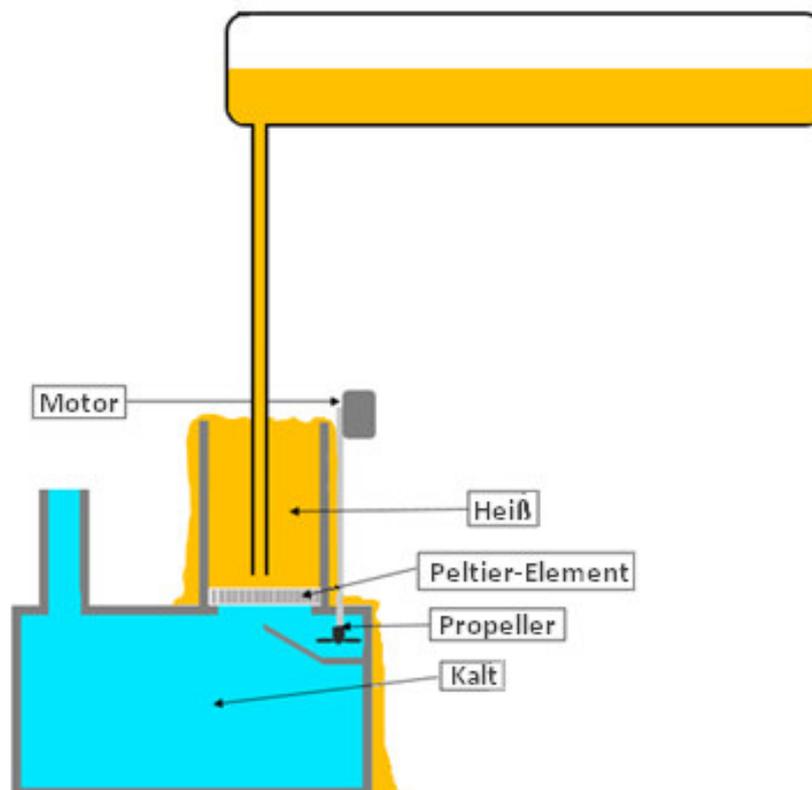


Abbildung 16: Messaufbau für dauerhafte Warmwasserzufuhr

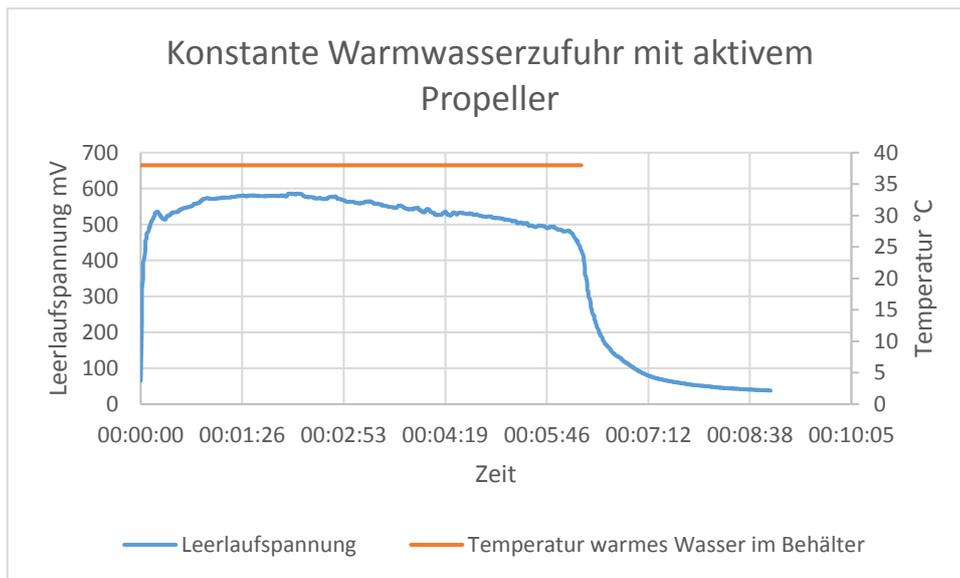


Abbildung 17: Dauerhafte Warmwasserzufuhr mit aktivem Propeller

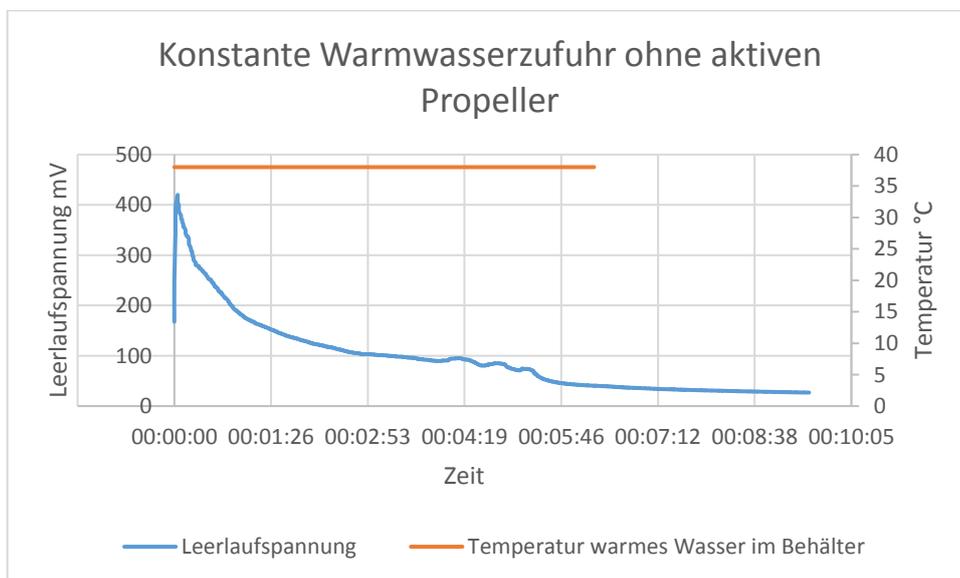


Abbildung 18: Dauerhafte Warmwasserzufuhr ohne aktiven Propeller

Zu erklären ist das trotz gleichbleibender Temperatur damit, dass die Durchmischung durch den Schlauch deutlich weniger Verwirbelungen des Warmwassers verursachte als beim Einfüllen im 50 ml-Versuch.

4.2.2 Umgebungsluft als Wärmequelle

Im letzten Versuch wurde die Eignung eines Luftkollektors untersucht. Anstatt von Warmwasser wurde die Umgebungsluft als Wärmemedium verwendet. Das Kühlwasser hatte nur noch eine Temperatur von 4°C, der Propellerstrahl wurde eingeschaltet.

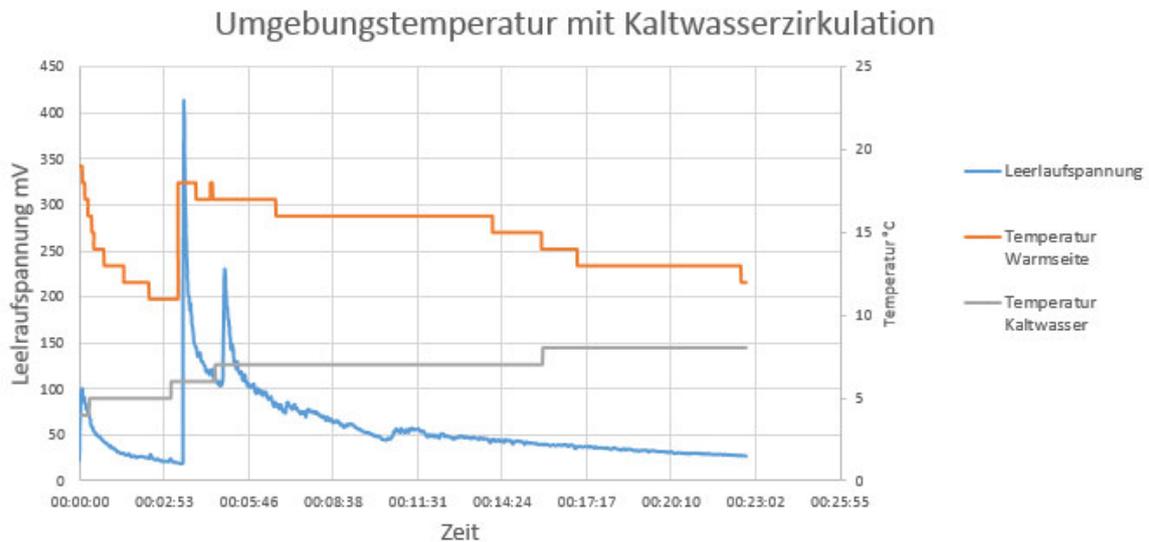


Abbildung 19: Kaltes Wasser und Raumtemperatur auf der Warmseite

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis des Versuchs. Zügig leitete das Peltier-Element die Kälte des Wassers zur Warmseite durch, sodass die Oberfläche dort abkühlte. Zum Zeitpunkt null lag eine Temperaturdifferenz von 15 K vor. Trotzdem entstand nur eine Spannung von 101 mV. Auch ein Ventilator brachte keine größere Spannung (im Diagramm nicht dargestellt), er konnte lediglich das Absinken der Spannung vermindern. Da die theoretische Temperatur mit 810 mV um das 8-fache größer ist, wurde vermutet, dass nicht nur die Temperaturdifferenz, sondern auch die Art der Wärmequelle dafür verantwortlich ist. Nach 3 Minuten 34 Sekunden wurde deswegen Wasser mit der Umgebungstemperatur von 19°C auf die Warmseite gegeben. Eine Spannung von 412 mV entstand bei einer mittlerweile sogar kleineren Temperaturdifferenz von 12 K. Da die Temperatur danach wieder abfiel, wurde das Warmwasser nach 4 Minuten 27 Sekunden umgerührt und es ergab sich ein weiterer Peak mit 228 mV.

4.2.3 Auswertung

In den Versuchen wurde gezeigt, dass es möglich ist, bei konstanter Warmwasserzufuhr eine relativ konstante Ausgangsspannung zu erhalten. Wenn anstatt warmem Wasser warme Luft verwendet

wird, sind generell kleinere Thermospannungen als bei Wasser mit derselben Temperatur zu erwarten. Durch den deutlich größeren Wärmeübergangskoeffizienten von Wasser zur Elementseite im Vergleich zu Luft kann die Energie besser abgeführt werden. Dadurch sollte auch die Kühlung mit Luft weniger effektiv sein als mit Wasser.

4.3 Einsatz Peltier-Solar-Kollektor

Die vorangegangenen Versuche haben die Grundlagen für den Aufbau eines Peltier-Solar-Kollektors gelegt. Im Folgenden wird der Test eines Prototyps beschrieben, dessen Ergebnisse mit den theoretisch zu erwartenden verglichen werden. Es wird ein flüssiges Wärme- bzw. Kälteüberträgermedium verwendet, da in 4.2.2 gezeigt wurde, dass Luft weniger gut geeignet ist.

4.3.1 Versuchsdurchführung

Der Peltier-Solar-Kollektor hat die Maße: 33 x 74 x 5,4 cm bei einem Pegelstand der Solarflüssigkeit von einem Zentimeter (Abbildung 20). Als Solarflüssigkeit wird gewöhnliches Wasser verwendet, da weder besonders hohe oder niedrige Temperaturen erwartet werden. Für die Abdeckscheibe wird 3 mm dickes Plexiglas verwendet. Der Absorber besteht aus 1 mm starkem Aluminiumblech und ist mit schwarzem Lack bedeckt. Das Einfüllrohr auf der linken Seite dient auch zur Verhinderung eines Luftspalts zwischen Absorber und Wasser. Die ganze Konstruktion ist mit Sikaflex® abgedichtet. In der Mitte des Kollektors ist ein einzelnes Peltier-Element platziert, dessen Zuleitungen an das Multimeter angeschlossen sind. Um die Größenverhältnisse zu demonstrieren, ist in Abbildung 21 der Kollektor beim Aufbau ohne Absorberblech zu sehen.

Am 27.9.2016 wurde der Kollektor in der Mittagszeit für knapp zwei Stunden in die Sonne gestellt, Zur Kühlung wurde Meerwasser verwendet, das in Kanistern oberhalb des Kollektors lagerte und über einen Wasserschlauch die Kaltseite des Peltier-Elements versorgte. Dieser ist in Abbildung 22 nicht dargestellt, da das Bild ganz am Anfang entstanden ist.

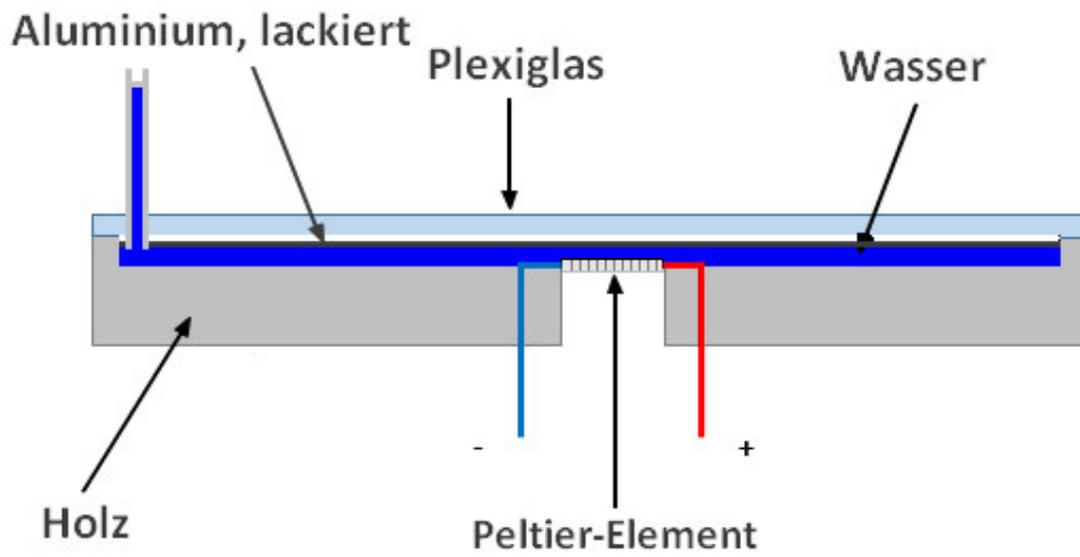


Abbildung 20: Rückansicht Solarkollektor

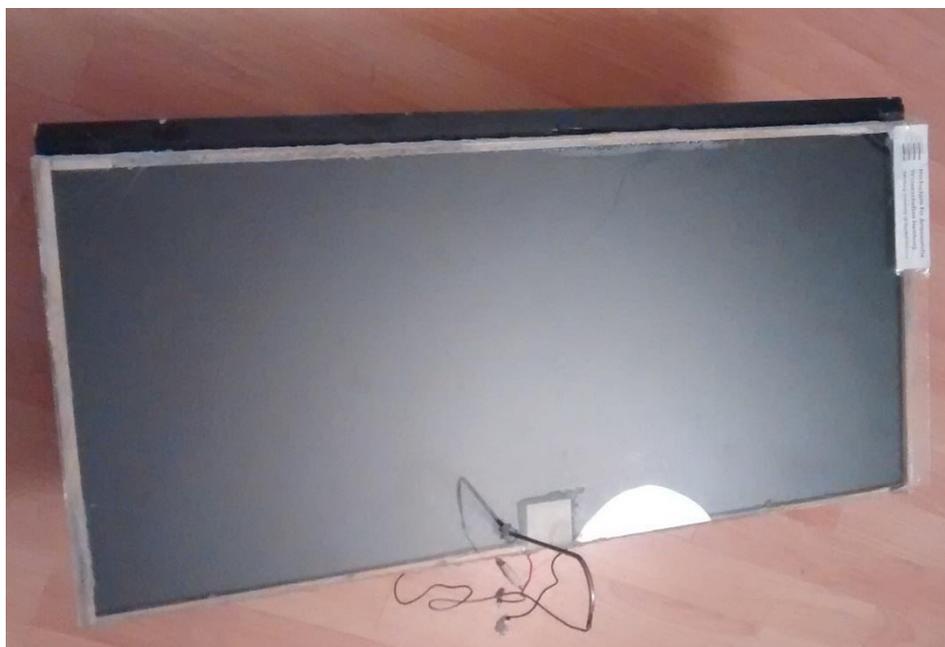


Abbildung 21: Peltier-Solar-Kollektor beim Aufbau

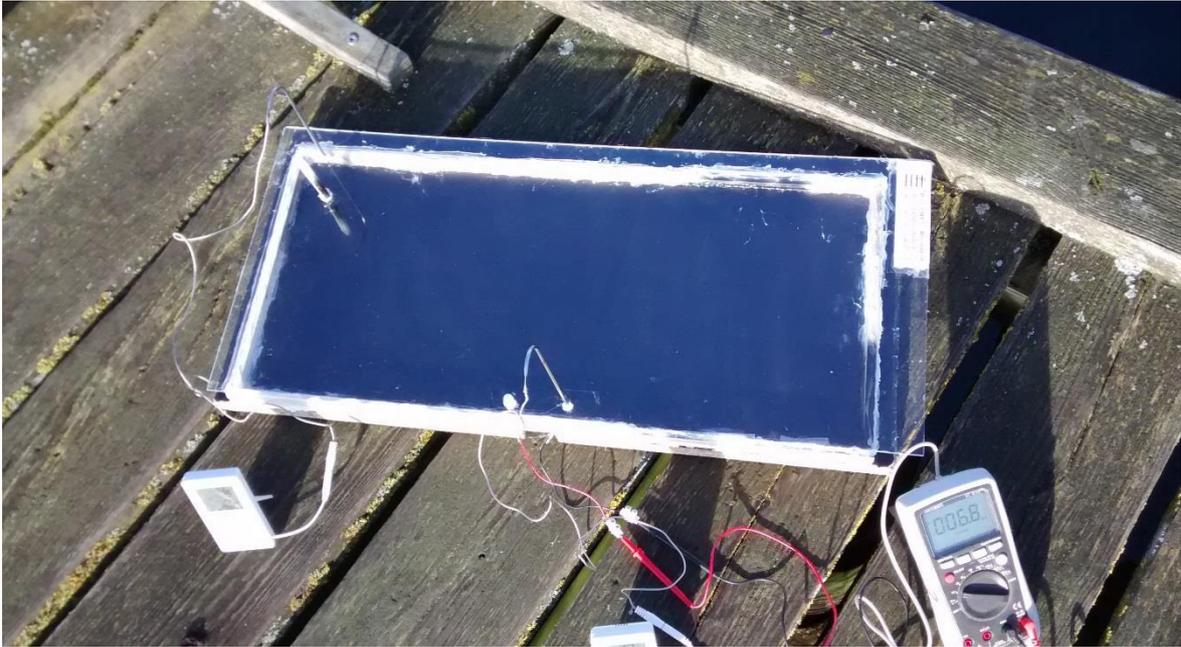


Abbildung 22: Peltier-Solar-Kollektor am Versuchstag

Das Warmwasser über dem Peltier-Element wurde durch leichtes Wippen des Kollektors durchmischt. Das Wippen ermöglichte zudem einen besseren Wärmeübergang zwischen Absorber und Wasser. Zwei Thermometer, neben dem Element und an der am weitesten davon entfernten Stelle in der Ecke, bestätigten wie auch in den Messtandversuchen, dass ohne die Durchmischung eine Temperaturdifferenz von mehreren Kelvin entsteht. Anhand der aufgenommenen Messwerte ergibt sich der in Abbildung 23 zu sehende Verlauf für Leerlaufspannung und Temperaturen.

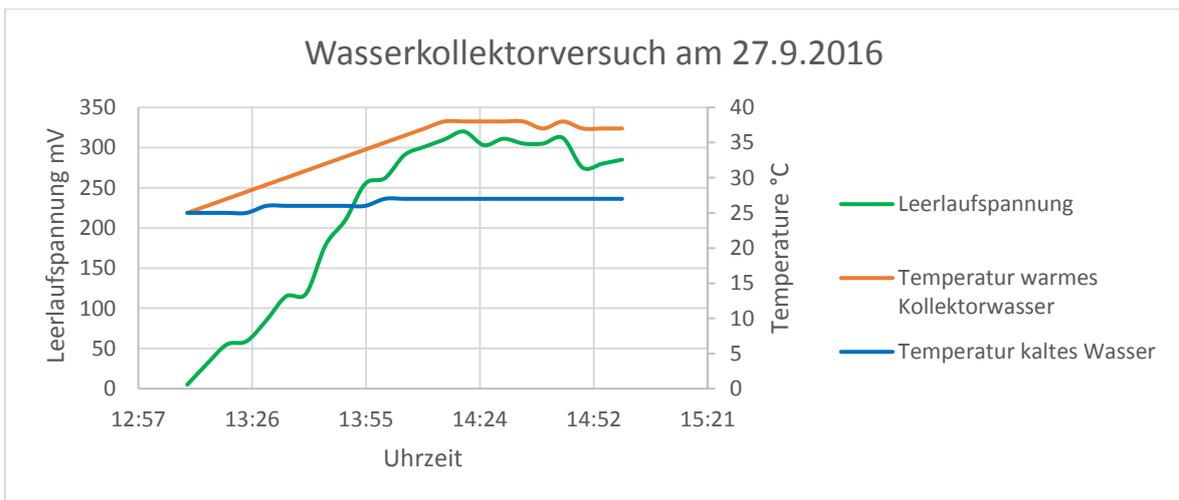


Abbildung 23: Ergebnisse am Versuchstag

Die Abbildung zeigt, dass die Spannung relativ linear anstieg und nach ca. einer Stunde den Wert von 300 mV erreichte. Dieses Niveau wurde mit Schwankungen bis zum Ende des Versuchs gehalten.

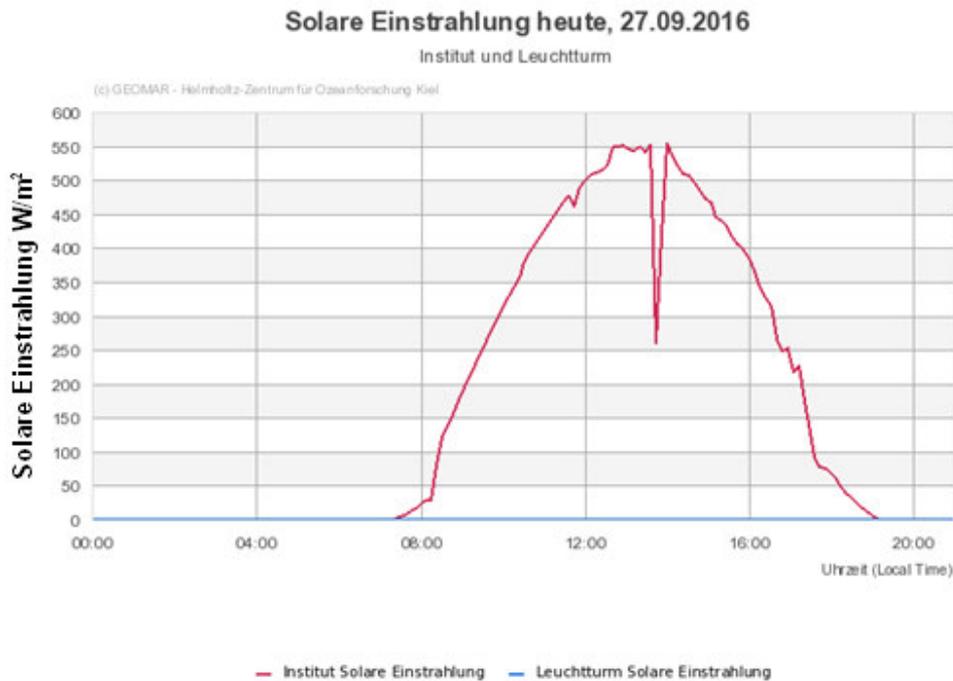


Abbildung 24: Globalstrahlung am Versuchstag in Kiel [35]

4.3.2 Auswertung

Mit Hilfe der hergeleiteten Formel (3-11) wird die theoretische Temperaturdifferenz Kollektorwasser-Außenluft mit der gemessenen Temperaturdifferenz verglichen.

Für die theoretische Berechnung ist die Globalstrahlung erforderlich, sie kann dem in Abbildung 24 dargestellten Diagramm entnommen werden. Der Einbruch in der Messung gegen 14 Uhr ist nicht nachvollziehbar, da die ganze Zeit die Sonne schien. Es soll hier zur Vereinfachung mit einer mittleren Globalstrahlung von 500 W/m^2 für den Zeitraum zwischen 13 und 15 Uhr gerechnet werden, da die Formel eine konstante Globalstrahlung voraussetzt. Für die spezifische Wärmekapazität von Wasser wird vereinfacht der Wert bei 20°C mit $4182 \frac{\text{J}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$ angenommen. Die Masse ergibt sich aus dem Volumen und der Kollektorhöhe mit $m = d \cdot V = \frac{1000\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,224 \text{ m}^2 \cdot 0,01 \text{ m} = 2,24 \text{ kg}$.

Bei einem Brechungsindex für Luft = 1 und Plexiglas = 1,49 ergibt sich mittels (3-4) ein Reflexionsgrad von ca. 0,13. Ungefähr 13 % der Sonnenenergie wird an der Abdeckscheibe reflektiert. Der Wert ist größer als bei rechtwinkliger Einstrahlung, doch konnte der Kollektor am Versuchstag aus

aufbautechnischen Gründen nur flach auf dem Boden liegend betrieben werden. Über den Extinktionskoeffizienten von $K=1$ können die Absorptionsverluste berechnet werden, sodass sich bei einem Sonnenhöhenwinkel von etwa 33° [36] ein Gesamttransmissionsgrad von 0,867 ergibt. Das heißt, 86,7 % der Sonnenstrahlung treten in den Kollektor ein, wobei die Verluste durch Absorption bei 0,3 % liegen.

Für die Berechnung der thermischen Verluste werden die Wärmedurchgangskoeffizienten des Kollektorkörpers benötigt, welche sich mit (4-1) berechnen lassen [37].

$$k = \frac{1}{R_{SE} + \frac{1}{\lambda_w} \cdot s + R_{Si}} \quad (4-1)$$

wobei:

R_{SE}	Wärmeübergangswiderstand extern/Außenseite	$(m^2 \cdot K)/W$
s	Wanddicke	m
λ_w	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
R_{Si}	Wärmeübergangswiderstand intern/Innenseite	$(m^2 \cdot K)/W$

Für die Holz-Seitenwände mit 1 cm Stärke ergibt sich nach [38] [39]: $5,8 \frac{W}{m^2 \cdot K} = k_e$

Für den Holzboden mit 3 cm Stärke ergibt sich: $3,17 \frac{W}{m^2 \cdot K} = k_b$

Der Wärmeübergang Luftspalt/Abdeckscheibe ist aufwendiger zu bestimmen. Der Kehrwert von k_f wird berechnet nach [40] als:

$$\frac{1}{k_f} = \frac{1}{K_{A-Gl}} + \frac{\delta_{Gl}}{\lambda_{Gl}} + \frac{1}{k_{Gl-U}} \quad (4-2)$$

mit:

$$k_{A-Gl} = \left(\frac{\lambda_L}{\delta_{A-Gl}} \right) + \alpha_{konv,A-Gl} + k_{str,A-Gl} \quad (4-3)$$

$$\alpha_{konv,A-Gl} = Nu \cdot \frac{\lambda_L}{\delta_{A-Gl}} \quad (Nu = 1, \text{horizontal liegender Kollektor}) \quad (4-4)$$

$$k_{str,A-Gl} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_A} + \frac{1}{\varepsilon_{Gl}} - 1} \cdot (T_A^2 + T_{Gl}^2)(T_A + T_{Gl}) \quad (4-5)$$

wobei:

k_{A-Gl}	Wärmedurchgangskoeffizient Absorber – Scheibe	
δ_{Gl}	Stärke der Scheibe	0,003 m
λ_{Gl}	Wärmeleitfähigkeit der Scheibe	0,19 [W/ (m · K)]
k_{Gl-U}	Wärmedurchgangskoeffizient Scheibe-Umgebung	5,6 [W/ (m ² · K)]
δ_{A-Gl}	Luftspaltbreite	0,01 m
$\alpha_{konv,A-Gl}$	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion Absorber-Scheibe	
λ_L	Wärmeleitfähigkeit Luft	0,0263 [W/ (m · K)]
$k_{str,A-Gl}$	Wärmeübergangskoeffizient bei Strahlung Absorber-Scheibe	
σ	Boltzmann-Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/ (K ⁴ · m ²)]
ε_A	Emissionsgrad Absorber	0,9
ε_{Gl}	Emissionsgrad Scheibe	0,97
T_A	absolute Temperatur Absorber (Mittelwert von Warmwasser angenommen)	303 K
T_{Gl}	Absolute Temperatur Scheibe (Umgebungstemperatur angenommen)	295 K
Nu	Nußelt-Zahl	

Daraus folgt ein k_f von $5,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Dabei ist zu bemerken, dass die Wärmeübergangskoeffizienten variieren können, da diese keine Konstanten sind und von der Strömungsgeschwindigkeit der umgebenden Luft abhängen.

Die thermische Leitfähigkeit des Peltier-Elementes ist bei Eureca (Anhang C) mit $0,7 \frac{W}{K}$ angegeben.

Nach zwei Stunden in der Sonne ergibt sich damit rechnerisch eine Temperaturdifferenz von Außenlufttemperatur zu Kollektorwasser von 24,48 K (nach einer Stunde ca. 18,43 K).

Am Versuchstag wurde eine Temperaturdifferenz von 15 K gemessen (Umgebung: 22°C, Kollektorwasser: 37°C). Dieser Wert, die sogenannte Stillstandstemperatur oder auch Stagnationstemperatur, wurde schon nach etwas über einer Stunde erreicht, ohne danach weiter zu steigen. Die Stagnationstemperatur bezeichnet die Temperatur, bei der die aufgenommene Strahlungsleistung ebenso groß ist wie die Verluste. Dass die Verluste größer waren als angenommen, hatte mehrere Gründe: Zum einen war der Kollektor nicht komplett wasserdicht, sodass in Wirklichkeit schlechtere Wärmedurchgangskoeffizienten k_f, k_e vorhanden waren, zum anderen ist durch das Leckwasser kontinuierlich Wärmeenergie verloren gegangen und kaltes Wasser musste nachgefüllt werden. Die thermischen Verluste waren größer als in der Theorie. Zudem verdunstete leckendes Wasser am Einfüllrohr und sorgte auch für ein Beschlagen der Scheibe, sodass weniger Sonnenenergie in den Kollektor gelangen konnte.

Jetzt wird die gemessene Thermospannung von 250-300 mV mit der theoretischen verglichen. Da die Wassertemperatur aus dem Schlauch im Schnitt bei 27°C lag, betrug die Temperaturdifferenz somit maximal 10 K, was bei einem Seebeck-Koeffizienten von 0,054 V/K eine Thermospannung von 540 mV ergibt.

Wie auch im Versuch zur konstanten Wärmezufuhr wird die theoretische Spannung deutlich unterschritten. Die Kaltwassertemperatur von 27°C lag über der Umgebungslufttemperatur, da das Wasser nicht aus der Leitung, sondern aus Kanistern kam, die sich ebenfalls erwärmt hatten.

5 Umsetzung in die Praxis

In diesem Kapitel wird, ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen der vorherigen Kapitel, eine von vielen technischen Realisierungen vorgestellt, wie Peltier-Elemente in der Praxis als regenerative Energiequelle verwendet werden könnten. Nach der technischen Beschreibung wird der jährliche Ertrag an einem Standort mit hoher Globalstrahlung berechnet.

5.1 Aufbau einer Anlage

Vom Aufbau her wird für die hier betrachtete Anlage der Peltier-Solar-Kollektor aus Kapitel 4.3 verwendet. Die Versuche in Kapitel 4 haben unter anderem ergeben, dass zum einen ein kühlender Wasserstrahl vorhanden sein muss, zum anderen eine Durchmischung des Warmwassers erforderlich ist. Maschinelle Einrichtungen wie Düsen oder ähnliches sind für die hier betrachteten, relativ kleinen Systeme von vornherein ausgeschlossen, da eine negative Energiebilanz die Folge wäre. Das bedeutet nicht, dass dies für sehr große Anlagen ebenfalls gilt.

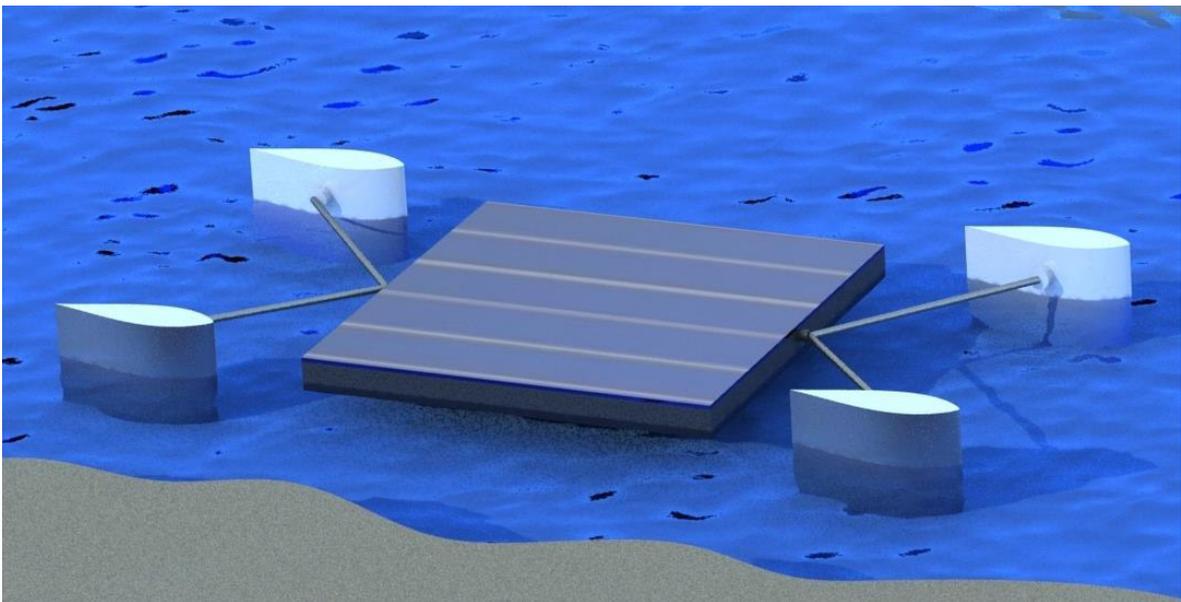


Abbildung 25: Peltier-Solar-Kollektor schwimmend auf einem Fließgewässer

Für kleine Systeme wird deswegen nach einer ursprünglichen Umgebung gesucht, die die erforderlichen Bedingungen erfüllt. Anbieten würde es sich, die Anlage an einem Fließgewässer zu installieren (Abbildung 25). In der Abbildung ist kein Peltier-Element zu sehen, da es sich auf der Unterseite des Kollektors befindet. Die Abbildung stellt zudem eine einfache Konstruktion dar, welche nicht die effizienteste sein muss, sodass die Berechnungen zu dieser Anlage so allgemein wie möglich gehalten sind. Die leichte Schaukelbewegung, die von den Wellen verursacht wird, sorgt für eine gute Durchmischung des Warmwassers im Kollektor. Die Kühlung der Kaltseite wird ebenfalls durch

den umgebenden Fluss oder Bach gewährleistet. Solche Standorte sind oft auch für die Wasserkraft interessant, wobei diese bei kleinen Bächen mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten weniger effektiv ist. In Frage kommen ebenfalls Tidengewässer. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dort zwar weniger konstant, doch kann in Zeiten der Tidenumkehr die Sonnenenergie zum Teil im Kollektorwasser zwischengespeichert werden.

5.2 Auslegung der Kollektorparameter

Um eine Abschätzung zu erhalten, wie viel Energie an einem Standort erzeugt werden könnte, ist es erforderlich, dass bei der Auslegung der Parameter des Solar-Peltier-Kollektors die einzelnen Teilsysteme gut aufeinander abgestimmt werden. Als Teilsystem wird zum einen die Umwandlung von Sonnenenergie in thermische Energie (Kollektor) bezeichnet, zum anderen die von thermischer Energie in elektrische Energie (Peltier-Element). Die Effektivität beider Systeme ist von der Temperaturdifferenz zwischen Kollektorinnerem und Umgebung abhängig.

5.2.1 Wirkungsgrad Peltier-Element

Der Wirkungsgrad des Peltier Elements berechnet sich nach Formel (1-8) und nimmt mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Warmseite und Kaltseite zu. Abbildung 26 zeigt den Wirkungsgrad eines Peltier-Elements in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz. Dabei wurde davon ausgegangen, dass Bi_2Te_3 als Halbleitermaterial mit einem ZT von 0.7 benutzt wird. Außerdem wurde eine Raumtemperatur von 300 K als mittlere Temperatur eingesetzt. Auch ZT ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, nicht konstant. Die Unterschiede sind jedoch für die verhältnismäßig kleinen zu erwartenden Temperaturdifferenzen zu vernachlässigen.

Der Wirkungsgrad ist, zumindest bei kleinen Temperaturdifferenzen, im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen relativ gering. Laufende Forschungen zu Peltier-Elementen könnten in Zukunft dazu führen, dass diese effektiver werden [41].

Für den Peltier-Solar-Kollektor folgt, dass eine große Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und Kollektorwasser günstig ist.

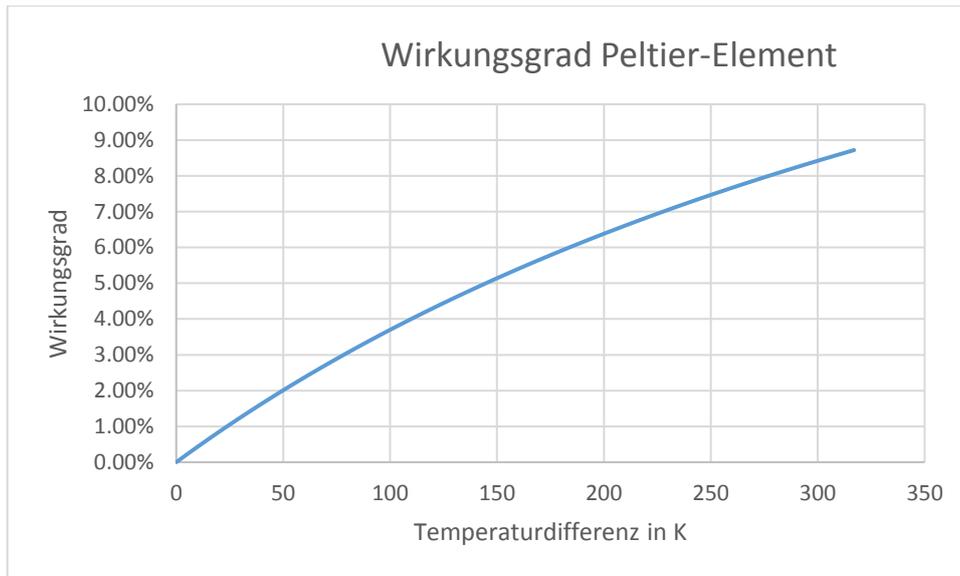


Abbildung 26: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur. $ZT = 0,7$

5.2.2 Temperaturdifferenz für Standard - Flachkollektor

Für die hier betrachtete Anlage sollen die Parameter eines professionellen Flachkollektors verwendet werden, da diese erheblich günstigere Werte als der Eigenbau haben. Die thermischen Verluste werden im Kollektorbau üblicherweise nicht mit den Wärmeleitwerten der Wände berechnet, sondern durch folgende Gleichung [42]:

$$P_{\text{verlust,thermisch}} = a_1 \cdot \Delta T + a_2 \cdot \Delta T^2 \quad (5-1)$$

Dabei werden a_1 , a_2 ebenfalls Wärmedurchgangskoeffizienten genannt. Die Werte für einen professionellen Flachkollektor mit Einfachverglasung und selektivem Absorber sind im Folgenden angegeben [43]:

$$\tau = 0,81; a_1 = 3,8 \frac{W}{m^2 \cdot K}; a_2 = 0,009 \frac{W}{m^2 \cdot K^2}.$$

Daraus ergibt sich die Temperaturdifferenz unter Berücksichtigung der thermischen Verluste durch Peltier-Elemente:

$$\Delta T =$$

$$\frac{P_{\text{Global}} \cdot \tau \cdot A_{\text{kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit} - (P_{\text{verluste,th}}) \cdot \text{Betriebszeit}}{m \cdot c}$$

wobei:

$$P_{\text{verluste,th}} = a_1 \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \Delta T + a_2 \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \Delta T^2 + k_t \cdot \Delta T \cdot n \quad (5-2)$$

→

$$\Delta T = -\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + \frac{P_{\text{Global}} \cdot \tau}{a_2}} \quad (5-3)$$

wobei:

$$p = \frac{(a_1 \cdot A_{\text{Kollektor}} + k_t \cdot n) \cdot \text{Betriebszeit} + m \cdot c}{a_2 \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit}} \quad (5-4)$$

In den Formeln wird n für die Anzahl der Peltier-Elemente verwendet.

5.2.3 Kollektorfläche und Anzahl der Peltier-Elemente

Die Kollektorfläche ist Energiebedarf und Platzangebot anzupassen. Umso größer Aperturfläche und Volumen des Kollektors, desto mehr Peltier-Elemente können genutzt werden, was einen höheren Energieertrag verspricht. Das liegt daran, dass die Wärmeverluste jedes einzelnen Elements umso weniger zur Temperatursenkung der Kollektorinnentemperatur beitragen, je größer das Warmwasservolumen des Kollektors ist. Die theoretischen Grundlagen dazu wurden in Kapitel 3 behandelt. Für die Anlage in diesem Kapitel wird eine Kollektorgöße von 5 m² verwendet, da sich eine Anlage dieser Größe an den meisten Gewässern installieren lassen dürfte.

5.2.4 Solarflüssigkeit

Der Wirkungsgrad des Peltier-Elements nimmt mit steigender Temperaturdifferenz zu, sodass anstatt von Wasser eine geeignete Solarflüssigkeit mit einem höheren Siedepunkt verwendet werden sollte. Wenn im Folgenden von Kollektorwasser die Rede ist, ist ebendiese Solarflüssigkeit, ein Wasser-Propylenglykol-Gemisch, gemeint. Konkret werden die Daten vom TYFCOR LS Mediterráneo (Anhang A) verwendet, da diese Solarflüssigkeit speziell für warme Regionen geeignet ist. Die Temperatur von 170°C darf nicht dauerhaft überschritten werden. Bei 200°C zersetzt sich das Gemisch

langsam. Dichte und spezifische Wärmekapazität sind leicht temperaturabhängig und Wasser ähnlich. Ausgegangen wird von einer mittleren Dichte von $1000 \frac{Kg}{m^3}$ und einer spezifischen Wärmekapazität von $4000 \frac{J}{Kg \cdot K}$.

5.2.5 Stagnationstemperatur Peltier-Solar-Kollektor

Anders als bei Peltier-Elementen nimmt der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Kollektorinnerem und Umgebung ab. In Abbildung 27 ist die Wirkungsgradkennlinie für einen Peltier-Solar-Kollektor mit den Parametern aus 5.2.2 bei einer Globalstrahlung von 800 W/m^2 zu sehen, wobei dieser zum besseren Vergleich mit herkömmlichen Kollektoren kein Peltier-Element enthält. Verwendet wurde Formel (3-13).

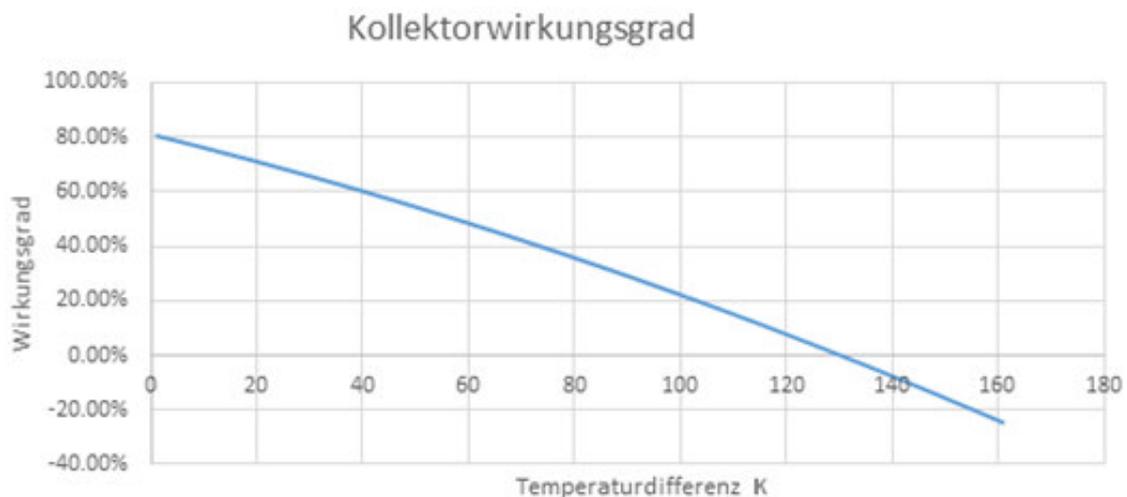


Abbildung 27: Kollektorwirkungsgrad bei einer Globalstrahlung von 800 W/m^2

Da der Transmissionsgrad durch die Scheibe 0,81 beträgt, beginnt die Kennlinie schon bei 81 %. Die 130 K Temperaturdifferenz am Schnittpunkt mit der Abszisse kennzeichnen den Stagnationspunkt. In der Literatur sind ähnliche Darstellungen für herkömmliche Kollektoren zu finden, welche sich in diesem Fall nur durch die Wassermenge geringfügig unterscheiden (Anhang C). Die Kennlinien unterscheiden sich je nach Solarstrahlung und Dämmungsgrad deutlich. Je größer die Solarstrahlung bei gleicher Dämmung, desto höher die Stagnationstemperatur.

Werden dem Kollektor Peltier-Elemente zugefügt, sind zudem die thermischen Verluste des Peltier-Elements zu berücksichtigen. Da diese proportional zur Temperaturdifferenz sind, ändert sich das

Gesamtbild aber charakterlich nicht. Abbildung 28 zeigt die Wirkungsgradkennlinie des Peltier-Solar-Kollektors, wenn er beispielsweise 5 Peltier-Elemente enthält. Die Stagnationstemperatur liegt nur noch bei 116 K.

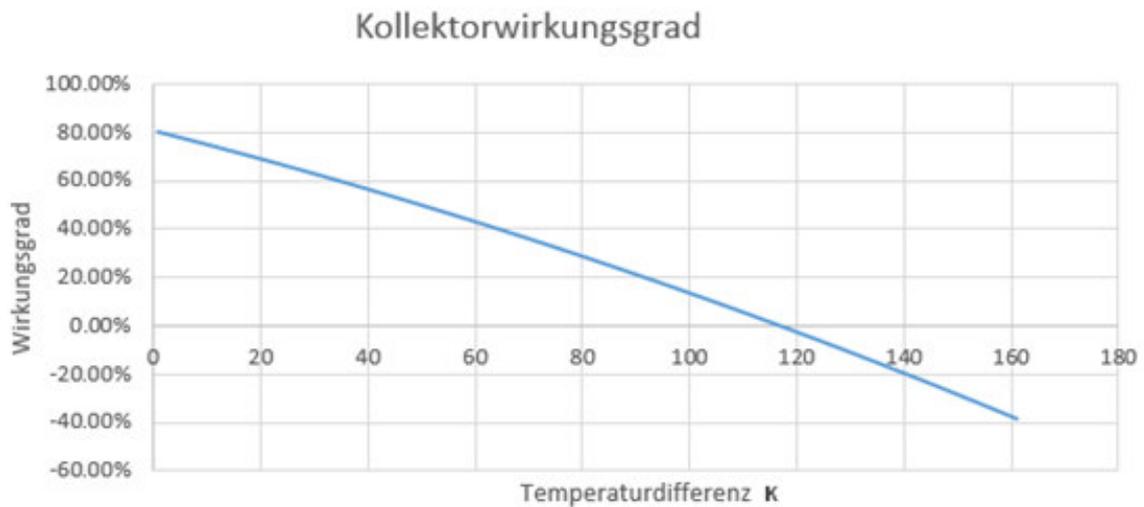


Abbildung 28: Kollektorwirkungsgrad bei einer Globalstrahlung von 800 W/m^2 (5 Elemente)

5.3 Modell zur Ermittlung des Energieertrags

Ein übliches Verfahren zur Ertragsberechnung eines Solarkollektors besteht darin, dass ein Wirkungsgrad für die gesamte Anlage bestimmt und dann mit der jährlichen Globalstrahlungssumme am Standort multipliziert wird [44]. Da der Wirkungsgrad auch von Erfahrungswerten abhängig ist, kann dieses Verfahren nicht auf den Peltier-Solar-Kollektor übertragen werden.

Es wird deswegen ein aufwendigeres, eigenes Verfahren entwickelt, in dem für jeden Monat im Jahr ein Sonnen-Durchschnittstag erstellt wird. Der für diesen Tag berechnete Energieertrag wird dann mit der Anzahl der Sonnen-Durchschnittstage jedes Monats multipliziert.

5.3.1 Wetterdaten zum Standort Perth

Für die Berechnung eines durchschnittlichen Sonnentages werden zunächst langjährige monatliche Mittelwerte der Globalstrahlungssumme für den Standort benötigt. Abbildung 29 zeigt die weltweite Verteilung der Globalstrahlung.

Horizontale Globalstrahlung

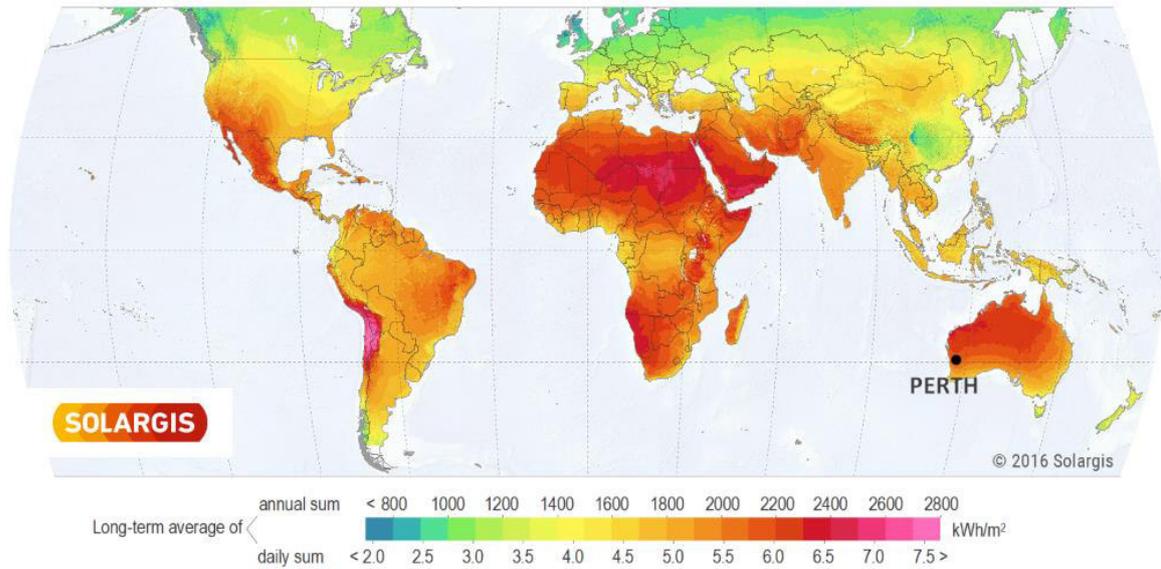


Abbildung 29: Weltweite Globalstrahlungssummen nach [45]

Die australische Großstadt Perth wurde eingezeichnet, da für sie im Folgenden eine Standortuntersuchung stattfindet. Sie wurde ausgewählt, da sie in einem Gebiet mit weltweit relativ hoher Globalstrahlung liegt und der australische Wetterdienst (Bureau of Meteorology) selbst im Vergleich mit anderen Industrieländern sehr gut aufbereitete Daten zur Verfügung stellt. Zudem liegt Perth am Swan River, der zur Kühlung der Kaltseite benötigt wird. In Tabelle 2 sind die Mittelwerte der Globalstrahlung von Perth in monatlicher Auflösung zu sehen.

Tabelle 2: Mittelwerte Globalstrahlung (Wert für einen Tag) Perth Airport (1990-2016) in kWh/m² [46]

Statistic	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Mean	8.1	7.2	5.8	4.2	3.1	2.5	2.7	3.5	4.6	6.1	7.3	8.3	5.3

Tabelle 3 zeigt die Lufttemperatur tagsüber.

Tabelle 3: Durchschnittliche Lufttemperatur °C tagsüber Perth Airport [47]

Statistic	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Mean	31.8	32.0	29.7	25.6	21.7	19.0	17.9	18.6	20.2	22.7	25.9	29.0	24.5

Tabelle 4 zeigt die Lufttemperatur nachts.

Tabelle 4: Durchschnittliche Lufttemperatur °C nachts Perth Airport [48]

Statistic	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Mean	17.1	17.5	15.9	13.0	10.4	9.0	8.0	8.0	8.9	10.3	12.7	14.9	12.2

Abbildung 30 zeigt die Wassertemperaturen des Swan River. Zur Strömungsgeschwindigkeit konnten auch nach aufwendiger Suche keine Angabe gefunden werden. Sollte diese zu gering sein, um die Wärme abzutransportieren, könnte durch künstlich erzeugte Düseneffekte mittels Barrieren Abhilfe geschaffen werden.

Monatliche Wassertemperaturen Perth

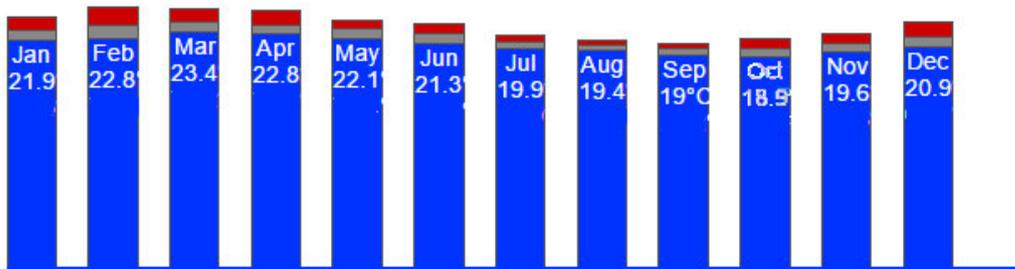


Abbildung 30: Monatliche Wassertemperaturen des Swan River bei Perth in °C nach [49]

5.3.2 Energiebetrachtung über einen Tag

Da im Dezember die durchschnittlich größte Globalstrahlung vorhanden ist, wird dieser zur Auslegung der Anzahl der Peltier-Elemente im Peltier-Solar-Kollektor dienen. Im Dezember gibt es im Durchschnitt jeden Tag 10 Stunden Sonne, also 310 Sonnenstunden im Monat (Abbildung 31). Die Zeit zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang beträgt ca. 14 Stunden. Werden alle Sonnenstunden auf 14-Stunden-Tage aufgeteilt, ergeben sich rechnerisch 22 komplette Sonnentage, wohingegen alle anderen Tage keine Sonne erhalten. In der Realität sind die Sonnentage oft mit Wolken versetzt. Die Aufteilung der Wolken über die Tageszeit ist statistisch aber nicht erfasst und kann deswegen nicht berücksichtigt werden.

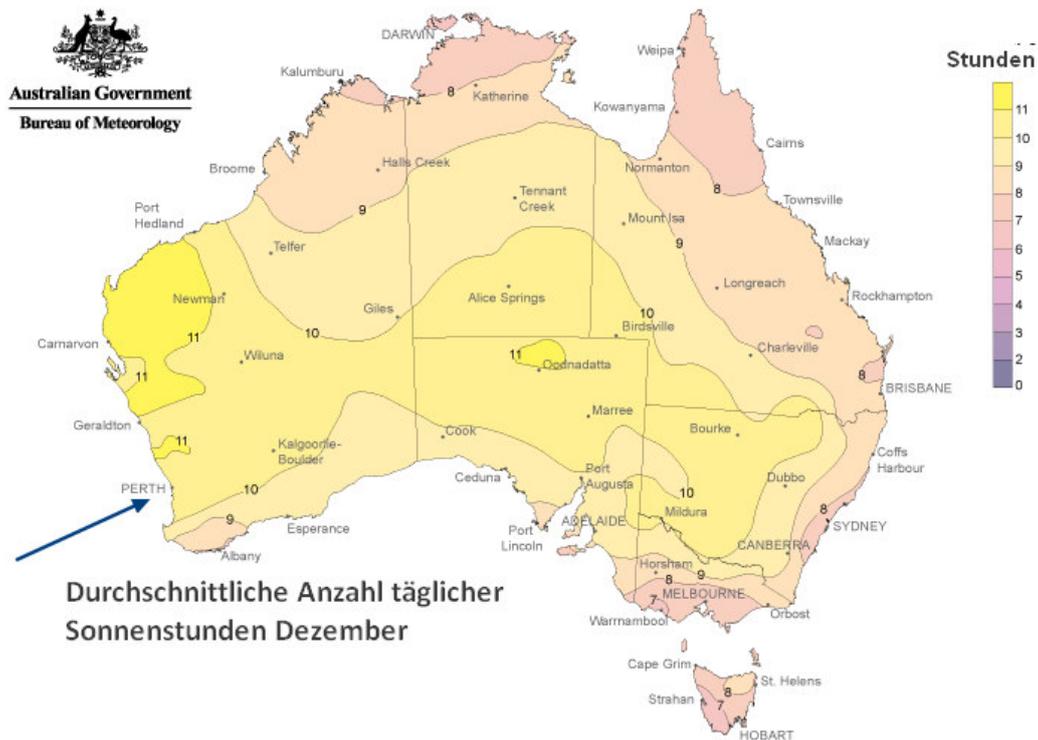


Abbildung 31: Durchschnittliche Anzahl Sonnenstunden im Monat Dezember nach [50]

Die durchschnittliche Globalstrahlung von 8.3 kWh/Tag wird von den 9 sonnenfreien Tagen abgezogen und zu den Sonnentagen addiert. Allerdings werden nur 70 % der Globalstrahlung der Regentage übertragen, da auch an Regentagen eine geringe Strahlung vorhanden ist. Die 70 % sind eine Schätzung, die durch den Vergleich von Strahlungsdaten des Geomar-Instituts in Kiel bei Sonne und Regen entstanden ist. Für die 22 Komplett-Sonnentage ergeben sich damit ca. 10,7 kWh/Tag. Die Aufteilung der Globalstrahlung eines vollkommen wolkenfreien Sommertags ist in Abbildung 32 zu sehen. Die Scheitelpunkthöhe ist dabei variabel.

Im Modell wird zur Vereinfachung die Parabel durch einen dreieckförmigen Verlauf der Globalstrahlung angenähert, sodass die Spitze des Dreiecks genau in der Tagesmitte, also 7 Stunden nach Sonnenaufgang eintritt. Da die Globalstrahlung über den gesamten Tagesverlauf nicht konstant ist, können keine der bisher behandelten Formeln direkt angewendet werden. Deswegen wird der Tag in 20 Zeitintervalle aufgeteilt, in denen aus dem Mittelwert der aufgenommenen Sonnenenergie die Verlustenergie und die innere Energie des Kollektorwassers berechnet werden. Aus der inneren Energie des Kollektorwassers kann dann die Temperaturdifferenz bestimmt werden. Nur eine konstante durchschnittliche Globalstrahlung für einen Dezembertag zu berechnen, würde die Realität schlechter simulieren. Für die oben aufgeführten 10,7 kWh/Tag ergäben sich konstante 764 W/m² über 14 Stunden. Da der Stagnationspunkt abhängig von der aktuellen Strahlungsintensität ist, läge

er für den Sonnenkollektor (ohne Peltier-Element) bei ca. 126 K Temperaturdifferenz. Nach Erreichen des Stagnationspunktes könnte die Sonne noch so viel Energie aussenden, es würde sich keine Temperaturerhöhung des Kollektorwassers ergeben. Da sich die Temperatur asymptotisch dem Stagnationspunkt annähert, verschlechtert sich der Wirkungsgrad außerdem schon davor deutlich (Abbildung 33).

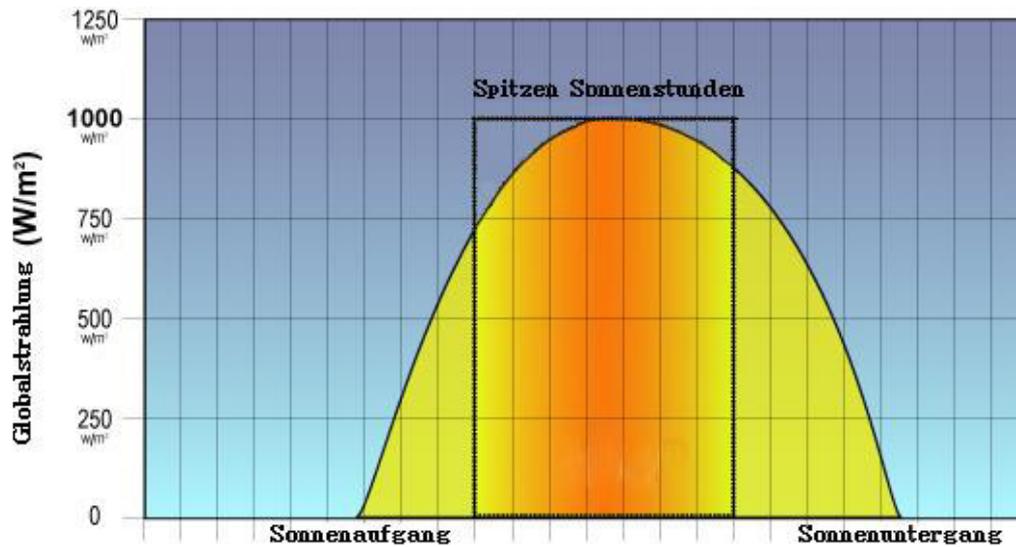


Abbildung 32: Verlauf der Globalstrahlung eines wolkenfreien Sommertages nach [51]

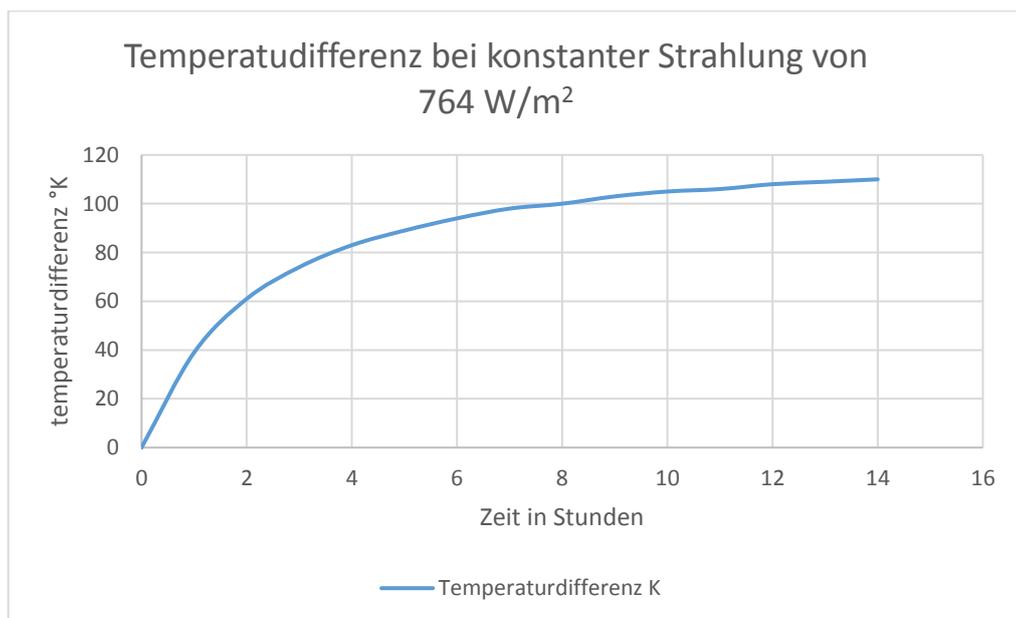


Abbildung 33: Temperaturverlauf bei einer konstanten Einstrahlung von 764 W/m²

Ein realistischer Peak am Mittag von 1000 W/m^2 würde den Stagnationspunkt auf 156 K heben und einen linearer ansteigenden Verlauf verursachen. Zudem ermöglicht nur die Energiebetrachtung einen plausiblen Wert zur Wassertemperatur, die im Kollektor bei Sonnenuntergang herrscht. Die Stromerzeugung geht auch danach so lange weiter, bis das Wasser abgekühlt ist.

Für einen Kollektor mit den oben aufgeführten Parametern, ohne Peltier-Elemente und einer Fläche von 5 m^2 , ergibt sich der in Abbildung 34 zu sehende Verlauf für einen Sonnen-Dezembertag.

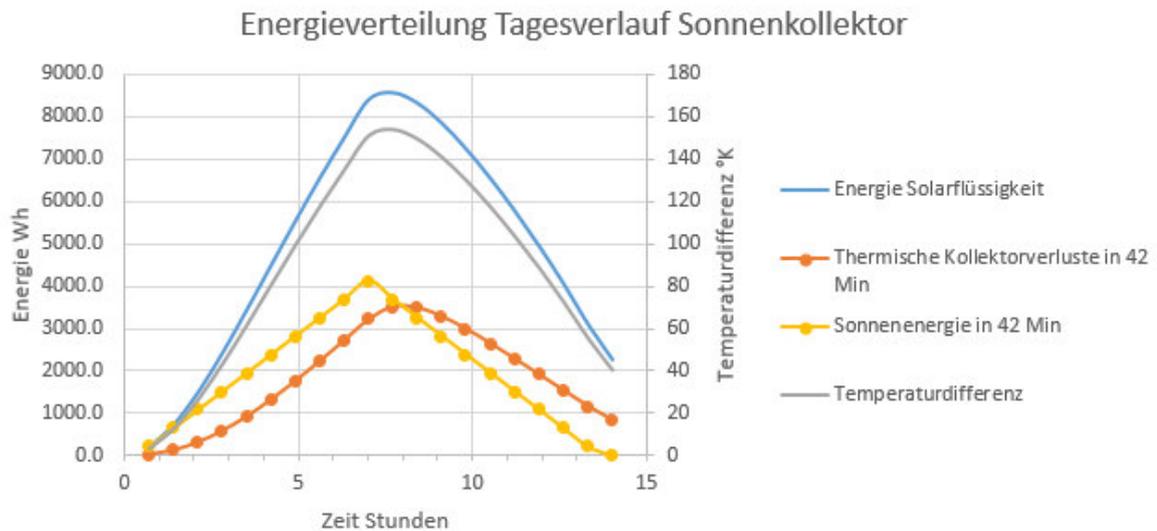


Abbildung 34: Energieverteilung über Tagesverlauf Sonnenkollektor ohne Peltier-Element

In der Abbildung ist die Temperaturdifferenz Solarflüssigkeit-Umgebungsluft, die innere Energie der Solarflüssigkeit sowie die Verlust- und Sonnenenergie zu erkennen. Sonnen- und Verlustenergie sind gemittelt in 42-minütiger Auflösung dargestellt. Diese ungerade Zahl kommt dadurch zustande, dass aufgrund der Variabilität der Tagesstunden der verschiedenen Monate eine konstante Tabellenkalkulation mit 20 Zeitintervallen verwendet wird.

Zu erkennen ist, dass der Stagnationspunkt selbst bei maximaler Einstrahlung nach 7 Stunden noch nicht erreicht wird, die Temperatur der Solarflüssigkeit nimmt stetig zu. Die aufgenommene Sonnenenergie liegt bis dahin über den thermischen Verlusten. Die maximale Sonneneinstrahlung liegt nach 7 Stunden bei 1529 W/m^2 , ein im Vergleich zur Realität sehr hoher Wert. Das ist mit der Dreiecksform zu begründen, da die Parabel stärker ansteigt und mehr Energie bei kleinerer Scheitelhöhe unterbringen kann. Dieser Umstand wird abgemildert, wenn bedacht wird, dass dafür in den Anfangsstunden des Tages die Globalstrahlungswerte nach Parabelform größer sind und zu einer stärkeren Erwärmung des Kollektorwassers führen. Nach 7 Stunden wird eine Maximaltemperaturdifferenz von 154 K erreicht. Mit der durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 29°C ergibt

sich daraus eine Temperatur der Solarflüssigkeit von 183°C, liegt also über dem empfohlenen Grenzwert. Besonders zur Mittagszeit ist obendrein mit noch höheren Temperaturen zu rechnen, da es in Perth an heißen Tagen bis zu 46°C heiß werden kann [52]. Peltier-Elemente senken jedoch die Temperatur im Kollektorinneren. Für die Bestimmung der Anzahl der Peltier-Elemente bedeutet dies, dass eine Temperaturdifferenz von 170°C - 46°C = 124 K nicht überschritten werden sollte.

Interessant ist der Verlauf nach dem Mittagspeak. Das Kollektorwasser verliert seine Energie langsamer als die Sonneneinstrahlung abnimmt, sodass die thermischen Verluste aufgrund der noch hohen Wassertemperatur relativ groß bleiben. Schon eine Stunde nach dem Peak werden die Verluste größer als die aufgenommene Sonnenenergie. Die Wassertemperatur fällt, da dem Wasser thermische Energie entzogen wird. Bei Sonnenuntergang bleibt eine Resttemperaturdifferenz von 40 K in der Solarflüssigkeit.

5.3.3 Abkühlung des Kollektorwassers

Nach 14 Stunden wird die Sonne „ausgeschaltet“, eine Globalstrahlung von 0 W/m² ist die Folge. Das Wasser kühlt allmählich ab. Die sinkende Temperaturdifferenz berechnet sich wie folgt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = \frac{Q_{\text{Wasser}} - Q_{\text{Thermische Verluste}}}{c \cdot m}$$

$$= \frac{c \cdot m \cdot T_{\text{max}} - \text{Betriebszeit} \cdot (a_1 \cdot A \cdot \Delta T + a_2 \cdot A \cdot \Delta T^2 + K_t \cdot \Delta T \cdot n)}{c \cdot m}$$

$$\Delta T = -\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + \frac{c \cdot m \cdot T_{\text{max}}}{a_2 \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit}}} \quad (5-5)$$

$$p = \frac{(a_1 \cdot A_{\text{Kollektor}} + k_t \cdot n) \cdot \text{Betriebszeit} + c \cdot m}{a_2 \cdot A_{\text{Kollektor}} \cdot \text{Betriebszeit}} \quad (5-6)$$

Dabei bezeichnet T_{max} die größte Temperaturdifferenz am Anfang. Es ergibt sich eine exponentiell fallende Kurve für einen Peltier-Solar-Kollektor ohne Element. Abbildung 35 zeigt sie für die oben

erreichte Starttemperaturdifferenz bei Sonnenuntergang von 40 K. Eine ähnliche Kurve ist auch in [53] aufgeführt.

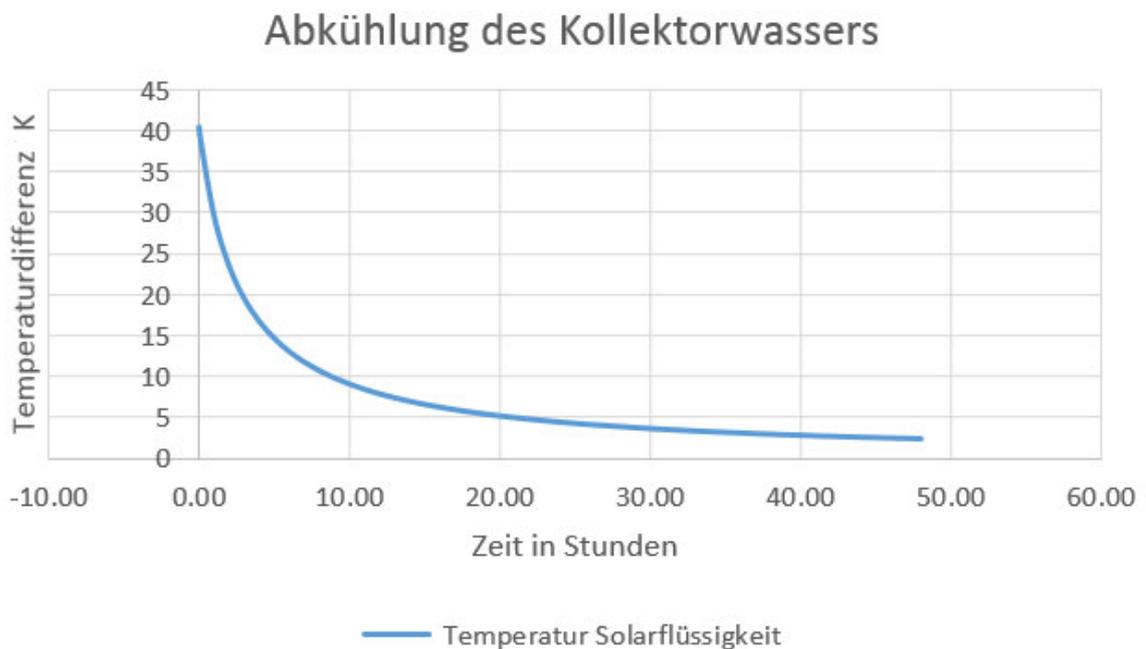


Abbildung 35: Temperaturdifferenz bei Abkühlung eines Kollektors ohne Peltier-Elemente

Die Abbildung zeigt, dass das Wasser am nächsten Morgen, nach 10-stündiger Nacht, immer noch eine positive Temperaturdifferenz von 9 K aufweist.

5.3.4 Energieausbeute bei unterschiedlicher Anzahl von Peltier-Elementen

Im Folgenden werden dem Kollektor Peltier-Elemente zugefügt, damit Strom erzeugt werden kann. Erwartet wird, dass aufgrund der Wärmeverluste die Temperaturen des Kollektorwassers am Tag niedriger sein werden und in der Nacht schneller abfallen. Dies ist zumindest am Tag auch notwendig, da das Überschreiten der maximalen Fluidtemperatur von 170°C verhindert werden soll.

Zunächst ist festzustellen: Wenn der Kollektor ein einzelnes Peltier-Element enthält, wird dieses am effizientesten genutzt. Jedes weitere Element verschlechtert die Bilanz für das einzelne Element, da die Temperaturdifferenz von Kollektor und Umgebungsluft mit jedem Element verkleinert wird. Der Temperaturfall ist für jedes einzelne Element relativ gering, sodass dies hingenommen wird, um mehrere Elemente einzusetzen, die die elektrische Leistung vervielfachen können. Es gibt hier allerdings einen optimalen Einsatzpunkt, denn zu viele Elemente drücken die Kollektortemperatur so sehr, dass in der Summe weniger erzeugt wird als bei weniger Elementen mit höherer Temperatur.

Für jedes Zeitintervall wird die gewonnene elektrische Energie aus der Temperaturdifferenz errechnet und aufsummiert. Der Temperaturverlauf der Umgebungsluft über den Tag wird vernachlässigt. Der Wirkungsgrad steigt zwar mit steigender Mitteltemperatur leicht an, bei den zu erwartenden maximalen Unterschieden zwischen Nachttemperatur und Mittagshitze von ca. 30 K ist dies jedoch zu vernachlässigen.

Als Kaltseitentemperatur wird die Wassertemperatur von Perth mit 22°C angenommen. In den Nachtstunden wird die Lufttemperatur niedriger als die Wassertemperatur sein, was sich negativ auf die Temperaturdifferenz Fluss-Kollektorwasser auswirken wird. Die Leistung wird nach (1-10) berechnet, als Lastwiderstand wird für jedes Element der Innenwiderstand von 1,5 Ω angenommen. Es ergibt sich Abbildung 36.

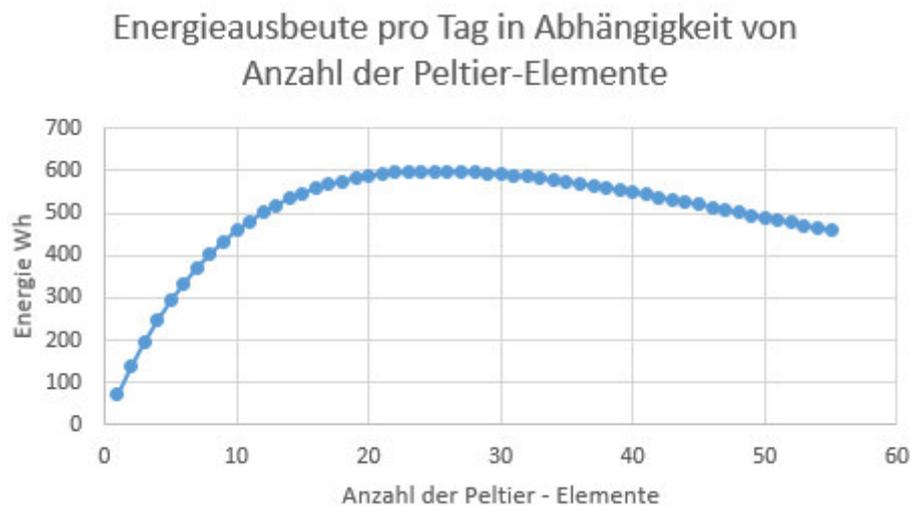


Abbildung 36: Energieausbeute in Abhängigkeit von der Anzahl der Peltier-Elemente

Bei einer Anzahl von 25 Peltier-Elementen wird die maximale Tagesenergie von 599 Wh erzeugt. In Abbildung 37 ist der Tagesverlauf der Energieverteilung zu sehen. Es wird nur noch eine maximale Temperaturdifferenz von ca. 90 K erreicht, somit wird das Sieden zur Mittagszeit verhindert.

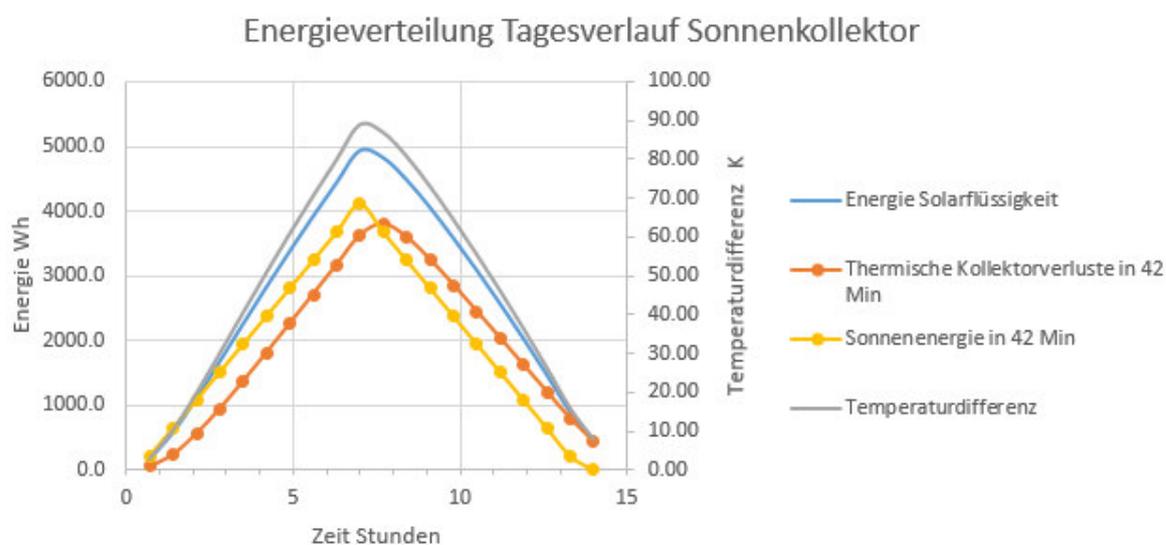


Abbildung 37: Energieverteilung über Tagesverlauf bei Kollektor mit 25 Peltier Elementen

5.3.5 Ergebnis

Es fällt auf, dass bei zunehmender Anzahl der Elemente wenig bis gar keine Energie in der Nacht generiert wird. Die thermischen Verluste sind wegen der zusätzlichen Belastung durch die Peltier-Elemente schon im Verlauf des Nachmittags so groß, dass kaum noch eine Temperaturdifferenz am Abend bestehen bleibt. Bei 25 Elementen ist noch eine Endtemperaturdifferenz von knapp 8 K übrig (und sie fällt danach auch noch exponentiell); und selbst das gilt nur in Bezug auf die Lufttemperatur. In der Nacht fällt diese auf 14,9 °C während die Wassertemperatur bei 21°C liegt. Die wirkliche Temperaturdifferenz liegt also bei lediglich 1,9 K und ist zu vernachlässigen. Die Temperaturen sind nicht die Nacht über statisch, sodass die Zahlen leicht variieren können. Ein weiterer Effekt der auftritt, wenn die Wassertemperatur größer als die Lufttemperatur ist, besteht darin, dass eine negative Temperaturdifferenz und damit verbunden eine Spannungsumkehr die Folge ist. Die Temperaturdifferenzen sind aber so gering, dass die dadurch entstehende Leistung hier vernachlässigt wird.

Bei einer Kantenlänge von 4 cm für jedes Element ergibt sich eine Gesamtfläche von 0,04 m², dies entspricht 0,8 % der Gesamtfläche des Kollektors. Da die 599 Wh für einen durchschnittlichen Komplett-Sonnen-Dezembertag gelten, ist im Dezember mit 22 Komplett-Sonnentagen eine elektrische Gesamtenergie von 13,17 kWh zu erwarten. Dieselbe Prozedur wird auf alle anderen Monate angewendet, wobei die Anzahl von 25 Elementen bestehen bleibt. Dabei wurde auf ganze Sonnentage auf- oder abgerundet. Es ergibt sich Tabelle 5.

Tabelle 5: Elektrische Energieerträge über ein Jahr

Monat	Komplett-Son- nentage	Tageslänge	angepasste Globalstrah- lung kWh/m ²	Elektrische Ener- gie kWh
Januar	22	14:11	10,41	13,11
Februar	21	13:14	8,88	10,37
März	23	12:18	7,21	8,87
April	19	11:18	5,90	4,54
Mai	18	10:29	4,67	2,67
Juni	15	10:05	4,25	1,77
Juli	18	10:16	4,10	2,01
August	20	10:58	4,84	2,94
September	20	11:54	6,21	4,61
Oktober	22	12:51	7,85	7,72
November	22	13:45	9,16	9,98
Dezember	22	14:15	10,7	13,17
SUMME				81,77

Wie auch in Europa, wird in Perth im Sommer erheblich mehr Energie erzeugt als in den Wintermonaten. Im Juni schrumpft der Ertrag auf 13 % des Dezemberertrags.

5.4 Vergleich mit Solarmodulen

Um die Bedeutung des Peltier-Solar-Kollektors innerhalb der konventionellen regenerativen Energiequellen zu bestimmen, wird er in Bezug auf Ertrag und Preis mit handelsüblichen Solarmodulen verglichen.

Zum Vergleich wird das Solarmodul AC-270P/156-60SE von AXITEC mit einer Nennleistung von 270 Wp unter Standardtestbedingungen und einer Fläche von 1,64 m² verwendet (Datenblatt im Anhang A). Auf einer Fläche von 5 m² können ca. drei dieser Elemente untergebracht werden, was einer Gesamtleistung von 810 Wp entspricht. Die Simulation auf Solarserver.de ergibt einen jährlichen Ertrag von 1212 kWh (Abbildung 38).

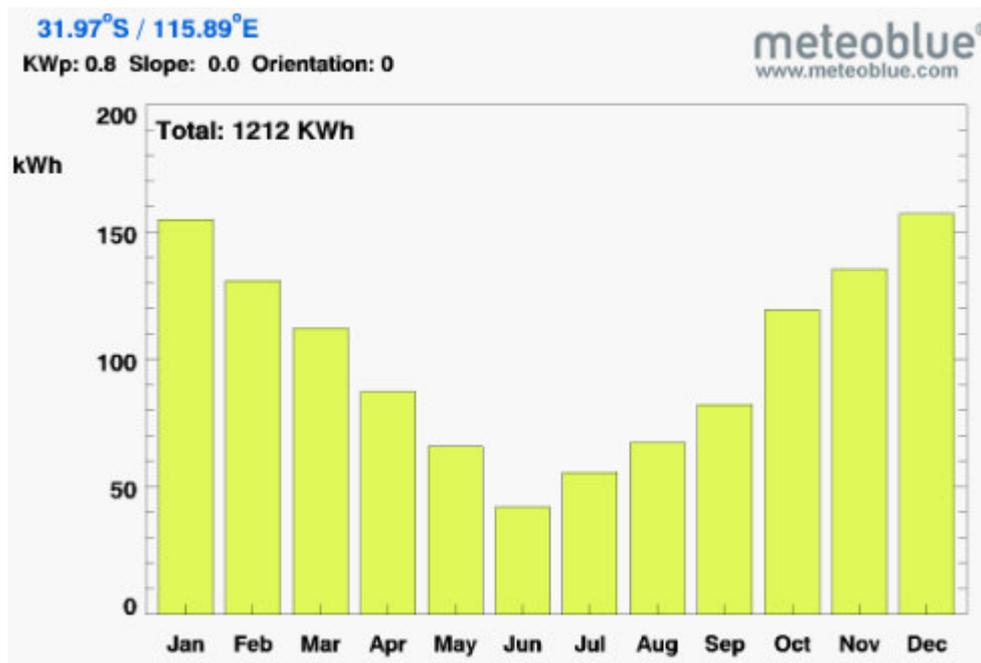


Abbildung 38: Ertragssimulation von 3 Solarzellen in Perth [54]

Der jährliche Ertrag des Peltier-Solar-Kollektors entspricht also nur 6,7 % desjenigen von herkömmlichen Solarzellen.

Der Preis für alle Solarmodule zusammen würde ohne Rabatt derzeit bei 715,44 € liegen [55].

Für die Preiskalkulation des Peltier-Solar-Kollektors wird die Summe aus Solarkollektoren und Peltier-Elementen verwendet. Der STI Stico vertikal Flachkollektor (Datenblatt im Anhang A) besitzt eine Bruttofläche von 2 m² und kostet 269 €. Für 5 m² müssten 2,5 dieser Kollektoren zu einem Preis von 672,5 € gekauft werden [56]. Die 25 Peltier-Elemente kosten im Mittel ca. 650 €, sodass in der Summe mit einem Gesamtpreis von 1322,5 € gerechnet werden kann. Zusätzliche Kosten für die Konstruktion des Peltier-Solar-Kollektors sind nicht berücksichtigt.

Es ist zu beachten, dass in diesem Kapitel mit der theoretischen Thermospannung gerechnet wurde, welche in den Experimenten zum Peltier-Solar-Kollektor nicht erreicht werden konnte. Auch wenn professionelle Lösungen vorteilhaftere Ergebnisse erzielen können, ist von einem noch kleineren Ertrag auszugehen.

6 Konklusion

Diese Arbeit beinhaltet die Entwicklung und Umsetzung, sowie die Ertragsabschätzung einer neuartigen solarthermischen und autarken regenerativen Energiequelle. Während am Anfang der Aufbau nach Art eines Luftkollektors am Zweckmäßigsten erschien, zeigte sich bei den Versuchen, dass dieser dem Kollektor mit einem flüssigen Wärmeträger unterlegen ist. Im Laufe der Arbeit hat sich außerdem gezeigt, dass die regenerative Energiequelle funktioniert, aber standortabhängiger ist als zuvor angenommen. Es wird nicht nur ausreichend Sonnenstrahlung benötigt, sondern auch ein flüssiges Kältemedium, das die kalte Seite des Peltier-Elements kühl hält. Aufgrund von mangelnder Konvektion bildet sich bei einem unbewegten Kältemedium eine warme Schicht über der Kaltseite, welche die Temperaturdifferenz und damit den Energieertrag stark verkleinert. Die kühlende Flüssigkeit muss deswegen eine nicht unerhebliche Strömungsgeschwindigkeit aufweisen; langsame Zirkulation ist wenig geeignet. Auch der flüssige Wärmeträger auf der anderen Seite des Peltier-Elements wird erheblich besser genutzt, wenn er durchmischt wird.

Eine theoretische Simulation am Standort Perth zeigte, dass bei einem 5 m² einfachverglasten Flachkollektor, der auf einem Fluss schwimmt und 25 Peltier-Elemente enthält, ein jährlicher Energieertrag von 81,77 kWh erwartet wird. Dies entspricht knapp 7 % des Ertrags von herkömmlichen Solarzellen. Was Investitionskosten und Ertrag angeht, ist er einer herkömmlichen Photovoltaikanlage deutlich unterlegen. Dazu kommt, dass die theoretischen Spannungswerte in den Experimenten nicht erreicht wurden, sodass ein noch kleinerer Ertrag wahrscheinlich ist. Wenn laufende Forschungen zur Effizienzsteigerung von Peltier-Elementen Erfolg haben, sind bessere Resultate möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] World Bank Group, „World Development Indicators: Electricity production, sources, and access,“ [Online]. Available: <http://wdi.worldbank.org/table/3.7>. [Zugriff am 23 Oktober 2016].
- [2] National Aeronautics and Space Administration, „A legacy of Exploration,“ [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>. [Zugriff am 11 August 2016].
- [3] Heise Verlag, „Mikrowatt statt Megawatt,“ [Online]. Available: <https://www.heise.de/tr/blog/artikel/Mikrowatt-statt-Megawatt-1002650.html>. [Zugriff am 24 Oktober 2016].
- [4] D. M. Rowe, „Seebeck Effect,“ in *Thermoelectrics handbook: macro to nano*, CRC /Taylor & Francis, 2006, p. 9.
- [5] Universität Konstanz, , „Thermokraft und Thermodiffusion,“ [Online]. Available: <http://www.uni-konstanz.de/FuF/Physik/Jaeckle/papers/thermospannung/node5.html>. [Zugriff am 9 August 2016].
- [6] Universität Hannover, „Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern,“ [Online]. Available: https://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/LaborumdruckT3_2.pdf. [Zugriff am 15 November 2016].
- [7] Northwestern University, „Thermoelectric Engineering,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>. [Zugriff am August 24 2016].
- [8] D.Kryskowsky,2013.[Online].Available: <http://patentimages.storage.googleapis.com/DE112011103431T5/00110001.png>. [Zugriff am 5 September 2016].

- [9] Situs Technicals, , „Grundlagen-Peltier,“ [Online]. Available: www.situs-tec.de/app/download/5794666408/Grundlagen-Peltier.pdf. [Zugriff am 24 Oktober 2016].
- [10] J. Sommerlatte, K. Nielsch und H. Böttner, Thermoelektrische Multitalente, P. J. 6, Hrsg., Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007, p. 36.
- [11] Situs Technicals, „Grundlagen-Peltier,“ [Online]. Available: www.situs-tec.de/app/download/5794666408/Grundlagen-Peltier.pdf. [Zugriff am 22 Oktober 2016].
- [12] Northwestern University, „Thermoelectric Power Generation,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>. [Zugriff am 2 12 2016].
- [13] Northwestern University, „Thermoelectric Engineering,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>. [Zugriff am 7 September 2016].
- [14] Northwestern University, „Thermoelectric Engineering,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>. [Zugriff am 12 September 2016].
- [15] R. Vullers, V. Leonov und T. A. Sterken, „Energieam Körper gewinnen,“ elektronik.net, [Online]. Available: http://www.elektroniknet.de/uploads/media_uploads/images/IMPORTED_5421f88f576a29a80248c0acb22044ae.jpg. [Zugriff am 26 Oktober 2016].
- [16] Northwestern University, „Thermoelectric Engineering,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>. [Zugriff am 19 September 2016].
- [17] Eureka Messtechnik GmbH, „Thermoelektrische Generatoren Seebeck Elemente,“ [Online]. Available: <http://www.eureka.de/pdf/cooling/seebeck-elements/TEGenerators.pdf>. [Zugriff am 10 August 2016].
- [18] Northwestern University, „Thermoelectric Engineering,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/engineering.html>. [Zugriff am 21 September 2016].

- [19] J. Sommerlatte, K. Nielsch und H. Böttner, „Thermoelektrische Multitalente,“ *Physik Journal*, Bd. 6.
- [20] Northwestern University, „Thermoelectric Power Generation,“ [Online]. Available: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>. [Zugriff am 7 10 2016].
- [21] Quick - Cool, [Online]. Available: http://www.elektroniknet.de/uploads/media_uploads/images/IMPORTED_5421f88f576a29a80248c0acb22044ae.jpg. [Zugriff am 26 Oktober 2016].
- [22] P. Kloth, „Hybridkollektor - solare Wärme und Strom vom Dach,“ energieheld, [Online]. Available: <http://www.energieheld.de/solarthermie/kollektoren/hybridkollektor>. [Zugriff am 24 Oktober 2016].
- [23] RP - Energie - Lexikon, [Online]. Available: <https://www.energielexikon.info/img/flachkollektor.png>. [Zugriff am 15 September 2016].
- [24] H. Drück, „Solarthermie 1,“ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, [Online]. Available: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/solarthermie1_solvo_teil1.pdf. [Zugriff am 2 11 2016].
- [25] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link und J. Fischer, Regenerative Energietechnik, 2 Hrsg., Springer Vieweg Verlag, 2013, p. 261 ff..
- [26] H. Drück, „Solarthermie 1,“ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, [Online]. Available: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/solarthermie1_solvo_teil1.pdf. [Zugriff am 1 Oktober 2016].
- [27] H. Drück, „Solarthermie 1,“ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, [Online]. Available: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/solarthermie1_solvo_teil1.pdf. [Zugriff am 1 Oktober 2016].
- [28] ebda.
- [29] ebda.
- [30] ebda.

- [31] V. Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme,“ 5 Hrsg., München, 2007, p. 114.
- [32] S. Gigelberger, „Versuch Sonnenkollektor,“ Universität Regensburg, [Online]. Available: <http://www.physik.uni-regensburg.de/studium/praktika/b/download/sk.pdf>. [Zugriff am 11 November 2016].
- [33] H. Drück, „Solarthermie 1, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart,“ [Online]. Available: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/solarthermie1_solvo_teil1.pdf. [Zugriff am 2016 Oktober 1].
- [34] „Formelsammlung und Berechnungsprogramme für Anlagenbau,“ [Online]. Available: http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php. [Zugriff am 12 2016].
- [35] Geomar Kiel, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, [Online]. Available: <http://www.geomar.de/service/wetter/>.
- [36] „Sonnenverlauf,“ [Online]. Available: <http://www.sonnenverlauf.de/#/54.3289,10.185,13/2016.10.01/13:24/1>. [Zugriff am 15 Oktober 2016].
- [37] Universität Duisburg, „Formelsammlung Bauphysik,“ [Online]. Available: https://www.uni-due.de/ibpm/Aufgabensammlung/Waerme-Feuchte_2004_2005.pdf. [Zugriff am 12 2016].
- [38] Universität Stuttgart, „Übungsaufgaben: Grundlagen der Wärmeübertragung,“ [Online]. Available: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/waermeuebertragung/Uebungsaufgaben_09_10_14.pdf. [Zugriff am 12 2016].
- [39] A. Schweizer, „Formelsammlung und Berechnungsprogramme für Anlagenbau,“ [Online]. Available: http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php. [Zugriff am 12 2016].
- [40] R. Stieglitz und V. Heinzl, in *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, Springer, 2013, p. 93 ff..

- [41] Universität Duisburg-Essen, „Arbeitsgruppe Thermoelektrik,“ [Online]. Available: <http://images.google.de/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fwww.uni-due.de%2Fnst%2Fimages%2FSeebeck.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.uni-due.de%2Fnst%2FArbeitsgruppen%2FThermoelektrik.html&h=228&w=300&tbnid=ee0PU967KXKAdM%3A&docid=ptbL7BOVxzm4IM&ei=gdoVWizNKO2UfP>. [Zugriff am 30 Oktober 2016].
- [42] V. Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme,“ 5 Hrsg., München, 2007, p. 115.
- [43] V. Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme,“ München, 2007, p. 107.
- [44] Igor T. Reitmair, „Thermische Solaranlage für Warmwasser,“ [Online]. Available: <http://heizkostenrechner.eu/solaranlage-fuer-warmwasser.html>. [Zugriff am 1 Oktober 2016].
- [45] SOLARGIS, „World solar resource maps,“ [Online]. Available: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>. [Zugriff am 29 Oktober 2016].
- [46] Australian Government Bureau of Meteorology, „Climate Data Online,“ [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/climate/data/>. [Zugriff am 12 Oktober 2016].
- [47] „ebda.,“ [Online].
- [48] „ebda.,“ [Online].
- [49] Seatemperature.org, [Online]. Available: <http://www.seatemperature.org/australia-pacific/australia/perth-october.htm>. [Zugriff am 18 Oktober 2016].
- [50] Australian Government Bureau of Meteorology, „Average annual & monthly sunshine duration,“ [Online]. Available: http://www.bom.gov.au/jsp/ncc/climate_averages/sunshine-hours/index.jsp. [Zugriff am 17 Oktober 2016].
- [51] Solar Choice, „Australia's Solar Energy Brokers,“ [Online]. Available: <http://www.solarchoice.net.au/blog/wp-content/uploads/Peak-Sun-Hours-chart.png>. [Zugriff am 14 September 2016].

- [52] Australien Bureau of Meteorology, „Perth Airport Station,“ [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/climate/extremes/> . [Zugriff am 20 Oktober 2016].
- [53] H. Drück, „Solarthermie 1,“ Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart. [Online]. [Zugriff am 20 Oktober 2016].
- [54] Solar Server, „PV-Anlage online berechnen: Solarstrom-Ertrag pro Monat und Jahr,“ [Online]. Available: <http://www.solarserver.de/service-tools/online-rechner/photovoltaik-anlage-online-berechnen-solarstrom-ertrag-pro-monat-und-jahr.html>. [Zugriff am 25 Oktober 2016].
- [55] AXITEC SOLAR, [Online]. Available: <http://www.photovoltaik4all.de/pv4all-netz/solarmodule/axitec-solar/4144/axitec-axiworldplus-se-ac-270p-mit-solaredge> . [Zugriff am 25 Oktober 2016].
- [56] Solardirekt, [Online]. Available: <http://www.solardirekt24.de/flachkollektoren/sti-stico-flachkollektor.html>.

Der Anhang befindet sich auf CD und ist bei Prof. Dr. Gustav Vaupel einzusehen.

Inhalt der CD

A. Datenblätter

B. Messergebnisse und Bilder zu weiteren Versuchen

C. Tabellen und Diagramme



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Seliger

Vorname: Leif

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Peltier-Element als autarke und regenerative solarthermische Energiequelle für Gebiete mit hoher Globalstrahlung

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.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original