

RWTH Aachen

III. Physikalisches Institut B

Einstein Teleskop Gruppe

**Studium Generale
-Praktikumsbericht-**

**Untersuchung der
Effizienzsteigerung einer
Leuchtdiode mithilfe der Kühlung
durch eine Peltier-Element**

Jil Dreßen

März 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Kriterien für eine Effizienzsteigerung	3
	2.1 Simulation des Wärmetransports an der LED	4
	2.2 Effizienz des Peltier-Elements	5
	2.3 Untersuchung verschiedener Peltier-Elemente	7
3	Verbesserte Kühlung der LED	8
4	Schlussfolgerungen	8
5	Literaturverzeichnis	8

1 Einleitung

Seit ihrer Markteinführung in 1962 haben Leuchtdioden die moderne Lichterzeugung revolutioniert. Sei es in Autoscheinwerfern, Werbedisplays, Fernsehbildschirmen oder in der Haus- und Industriebeleuchtung - Sie sind in all ihren Formen, Farben und Anwendungsgebieten nicht mehr aus dem heutigen Alltag wegzudenken. Essenziell für ihre Durchsetzung gegenüber der zuvor vorherrschenden Glühbirne sind ihre Robustheit, Kompaktheit und lange Lebensdauer, aber am aller wichtigsten ihre deutliche Effizienzsteigerung gegenüber ihres Vorgängers. Die dadurch gewonnene Energieeinsparung kann als der größte Vorteil der Leuchtdiode bezeichnet werden.

Eine weitere Effizienzsteigerung von LEDs konnte von Timo Wittler in der von ihm verfassten Bachelorarbeit 'Analysis of Diodes at Cryogenic Temperatures in an Ultra-High Vacuum' festgestellt werden. Dieser Effekt wird durch das Kühlen der Leuchtdioden hervorgerufen und kann für die verwendeten LEDs fast eine Verdoppelung der Effizienz aufzeigen. Die für diese Messwerte verantwortlichen physikalischen Effekte werden nicht Bestandteil des folgenden Berichts sein, sondern vielmehr dessen Implikationen auf eine womögliche Effizienzsteigerung unserer heutigen Leuchtdioden.

Ziel dieses Berichtes ist somit die Fragestellung, ob die Effizienz moderne Leuchtdioden noch weiter gesteigert werden kann, indem diese durch Peltier-Elementen runter gekühlt werden. Die Verwendung von Peltier-Elemente zur Kühlung wird hierbei spezifiziert aufgrund ihrer geringen Größe, geringen Kosten und ihres geringen Gewichts, sowie der Möglichkeit der Inbetriebnahme auch schon bei geringen Leistungen. All diese Parameter sind ideal für die Verwendung in Kombination mit LEDs.

Für die Untersuchung des beschriebenen Sachverhalts wird der Wärmetransfer der LED und des Peltier-Elements in der, an der Westböhmisches Universität in Pilsen entwickelten, Anwendung [Agros2D](#) simuliert.

2 Kriterien für eine Effizienzsteigerung

Des weiteren wird speziell der Leuchtdiodentyp OP232 untersucht. Bei dieser handelt es sich um eine von Timo Wittler verwendete infrarote Leuchtdiode mit einer Wellenlänge von $\lambda = 890 \text{ nm}$. Der Effekt der Effizienzsteigerung tritt bei dieser auf und dessen normalisierte Effizienz kann der Abbildung [1](#) entnommen werden.

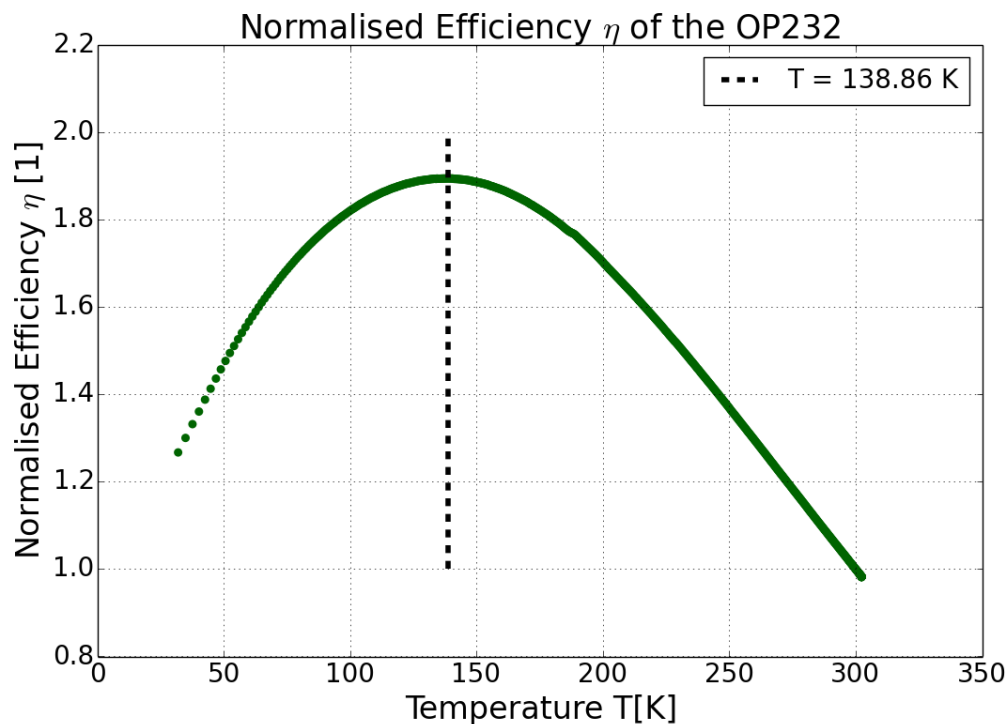


Abbildung 1: Normalisierte Effizienz der OP232 für unterschiedliche Temperaturen

2.1 Simulation des Wärmetransports an der LED

Zur Beginn wird die LED simuliert um die Wärmebeiträge der einzelnen Wärmetransportprozess abschätzen zu können. Es wird zunächst die Form und Abmaße der OP232 in Agros2D übertragen. Die Abmaße wurden hierbei dem [Datenblatt der OP232](#) entnommen und mit einer Diskretisierung der Schrittgröße 0.05 mm übertragen. Es handelt sich hierbei um ein vereinfachtes Model der LED welche sich in einem wärmeleitenden Aluminiumgestell befindet, welches wiederum auf der gekühlten Seite des Peltier-Elements befestigt ist.

Bei der Simulation des Wärmetransports an der LED müssen alle möglichen Prozesse der Wärmezufuhr berücksichtigt werden. Zu diesen gehören die Wärmekonvektion der umgebenden Luft, die Wärmeleitung der, von der LED, erzeugten Abwärme, sowie die Wärmestrahlung. Letztere wird bis auf weiteres vernachlässigt werden. Dem Datenblatt der OP232 kann entnommen werden, dass der LED eine Leistung von ca. 170 mW zugeführt wird. Diese Leistung unterteilt sich in die abgestrahlte Lichtleistung (ca. 8 mW) und die von der LED erzeugte Abwärme. Um die Wärmekonvektion zu simulieren kann eine Umgebungstemperatur der Luft von 300 K und ein Wärmeübergangskoeffizient dieser von $\alpha = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen werden.

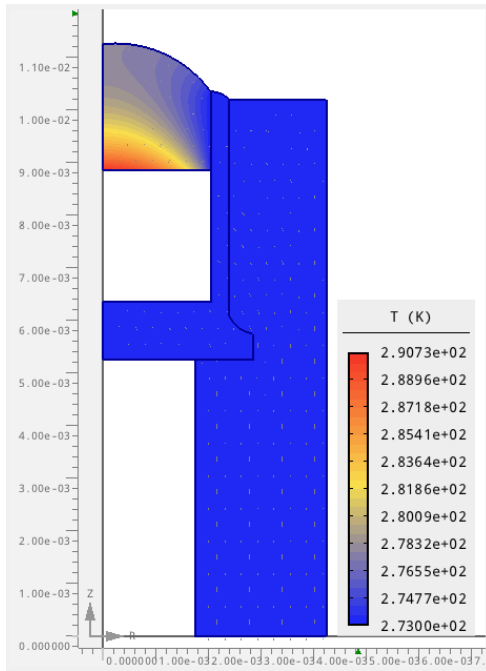


Abbildung 2: Simulation der OP232 Leuchtdiode in Agros2D:

Rotationssymmetrische Koordinatensystem, Simulation der Wärmekonvektion, der Abwärme mit einem Wärmefluss von 170 mW und des Peltier-Elements

Bauteile:

- Linse (PMMA, $\lambda = 0.19 \text{ W/mK}$)
- Gehäuse (Eisen, $\lambda = 80 \text{ W/mK}$)
- Gestell (Alluminium, $\lambda = 230 \text{ W/mK}$)

Boundary conditions:

- Peltier (untere Fläche, 273K)
- Abwärme (Innenwände LED, Heatflux = 2900.52 W/m^2 , bzw. 170 mW)
- Konvektion (Außenwände, Heatflux: 300K, $\alpha = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Der simulierten Geometrie, zu sehen in Abbildung 2, können wir entnehmen, dass die Abwärme der LED besonders ausschlaggebend ist. Es werden dem System durch Abwärme 170 mW an Leistung zugeführt, während die Konvektion lediglich 28 mW an Wärmeleistung ausmacht. Zudem wäre es nicht unrealistisch einen isolierten Aufbau der LED umzusetzen welche die Effekte der Konvektion noch weiter verkleinern würde. Somit können wir rechtfertigen die Wärmezufuhr durch Konvektion zunächst ebenfalls zu vernachlässigen. Folglich muss nur die Abwärme vollständig von dem verwendeten Peltier-Element kompensiert werden.

2.2 Effizienz des Peltier-Elements

Da wir nun annehmen können wie viel Wärmeleistung durch das Peltierelement transportiert werden muss, können wir mithilfe der Messdaten der OP232 abschätzen wie groß die Leistungszahl (COP) eines Peltier-Elements sein muss damit wir eine Effizienzsteigerung erreichen können.

Die Leistungszahl des Peltierelements ist definiert durch:

$$COP_{Peltier}(T) = \frac{P_{el,LED}(T) - P_{LED}}{P_{el,Peltier}(T, P_{el,LED})}$$

Zunächst nehmen wir an dass unsere normalisierte Effizienz sich nicht für unterschiedliche Betriebsleistungen der LED ändert. Hierbei legen wir eine konstante Lichtleistung P_{LED} der verwendeten LED fest und ein mit T variierende Betriebsleistung $P_{el,LED}(T)$ dieser. Aus den Messdaten erhalten wir die normalisierte Effizienz η der LED welche der Abbildung 1 entnommen werden kann.

$$\eta(T) = \frac{\epsilon_{LED}(T)}{\epsilon_{LED}(300K)} = \frac{P_{LED} \cdot P_{el,LED}(300K)}{P_{el,LED}(T) \cdot P_{LED}} = \frac{P_{el,LED}(300K)}{P_{el,LED}(T)}$$

Bei $\epsilon_{LED}(T)$ handelt es sich um die Effizienz der LED selbst.

Nun können wir eine total Leistung festlegen, welche sich aus dem Leistungsverbrauch der LED sowie dem Leistungsverbrauch des Peltier-Elements zusammensetzt. Um eine Effizienzsteigerung zu erlangen muss die bei Umgebungstemperatur verbrauchte Leistung größer sein als die bei abgekühlten Temperaturen.

$$P_{tot}(300K) \geq P_{tot}(T)$$

$$\Rightarrow P_{el,LED}(300K) - P_{LED} \geq P_{el,LED}(T) - P_{LED} + P_{el,Peltier}(T, P_{el,LED})$$

Durch Umstellen der Ungleichung erhalten wir folgenden Zusammenhang, welcher der Grafik 3 entnommen werden kann.

$$\Rightarrow COP_{Peltier}(T) \geq \frac{1}{\frac{1-\epsilon_{LED}(300K)}{1/\eta(T)-\epsilon_{LED}(300K)} - 1} = COP_{min}$$

Somit steht fest, dass die mindestens zu erreichende Leistungszahl der von uns betrachteten LED für alle Temperaturen über 1 liegen muss, da unsere normalisierte Effizienz zwischen 1 und 1.9 fällt. Dies bedeutet, dass das Peltier-Element mehr Wärme transportieren muss als Leistung aufgewandt wird.

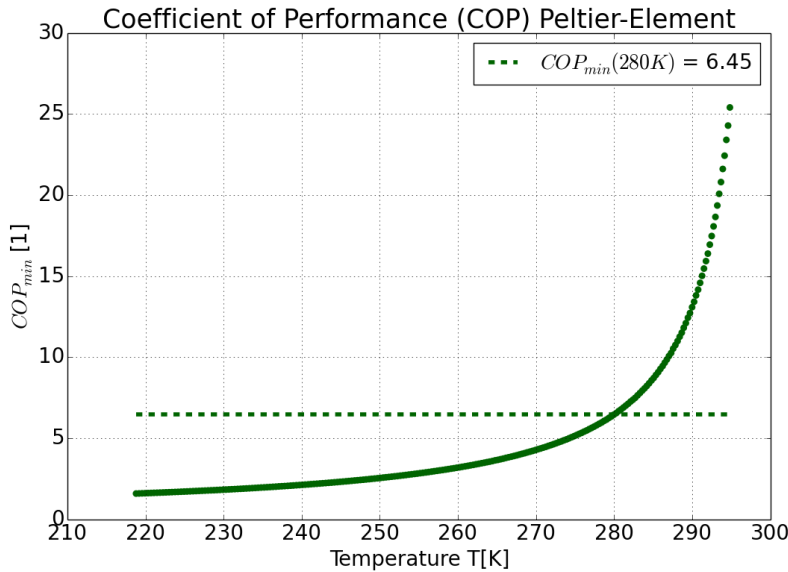


Abbildung 3: Darstellung der mindestens zu erreichenden Leistungszahl des verwendeten Peltier-Elements um eine Leistungssteigerung der LED-Peltier-Kombination zu erreichen.

2.3 Untersuchung verschiedener Peltier-Elemente

Für unsere Konstruktion werden Peltier-Elemente benötigt, welche einen Wärmetransport von ca. 170 mW haben. Diese Leistungen sind für reguläre Peltier-Elemente recht gering, weshalb im folgenden speziell die Leistungszahlen der Peltier-Elemente der Firma [TEC Microsystems](#) genauer betrachtet werden. Diese Firma hat sich auf kompakte leistungsschwächere Peltier-Elemente spezialisiert und fällt somit genau in den Rahmen unserer Konstruktion.

Dem [Datenblatt des betrachteten Peltier-Elements](#) können der Betriebsstrom und die Betriebsspannung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für verschiedene Wärmebelastungen entnommen werden. Da die Daten lediglich als Grafiken vorliegen wurden diese mithilfe der webbasierten Anwendung [WebPlotDigitizer](#) für weiter Auswertung extrahiert.

Für alle Peltier-Elemente wurden die Messdaten bei 27 °C Umgebungstemperatur im Vakuum verwendet. Die Leistungszahlkurve des effizientesten der untersuchten Peltier-Elemente kann der [Abbildung 4](#) entnommen werden. Hierbei entspricht die X-Achse der Temperatur der kalten Seite des Peltier-Elements während die warme Seite konsant auf der Raumtemperatur von 300 K gehalten wird.

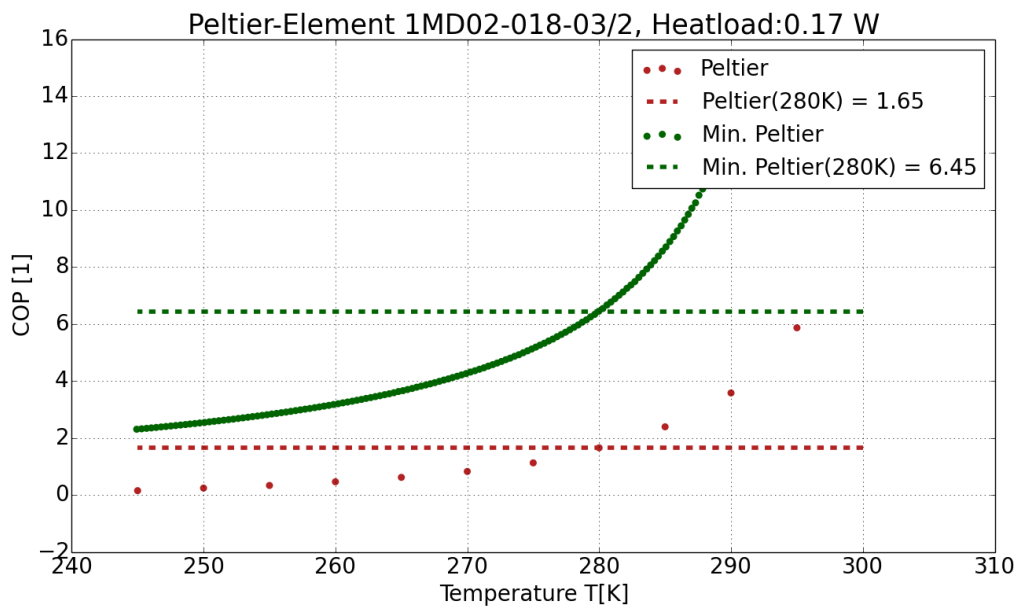


Abbildung 4: Vergleich der mindestens zu erreichenden Leistungszahl für das Peltier-Element und der realen Leistungszahlen des effizientesten betrachteten Peltier- Elements

Es ist deutlich zu erkennen, dass sogar die Leistungszahl des effizientesten Peltier-Elements deutlich unter der benötigten Leistungszahlgrenze liegt. Daher stellt sich die Frage wie die Konstruktion verbessert werden kann, sodass die benötigte Leistungszahl kleiner wird.

3 Verbesserte Kühlung der LED

Anstelle der Kühlung über das Gehäuse wäre es möglich eine direkte Kühlung des Halbleiterchips umzusetzen indem wir eine direkte thermische Anbindung an das Peltier- Element umsetzen. Um Rückzuschließen wie groß die normalisierte Effizienz der LED für die Temperatur des Chips, anstelle des Gehäuses, ist können wir den Messversuch in Agros2D simulieren. Die Simulation ist ähnlich zur vorherigen und kann Abbildung 5 entnommen werden.

Es kann eine Temperaturdifferenz von 7.6 K zwischen Gehäuse und Halbleiter festgestellt werden. Somit kommt es zu einer systematischen Verschiebung unserer Daten, welche in Abbildung 6 dargestellt ist. Das neu Leistungszahlminimum ist gesunken aber immer noch zu hoch für das betrachtete Peltier-Element..

4 Schlussfolgerungen

Wir können aus den betrachteten Daten und untersuchten Peltier-Elementen schließen, dass wir durch kühlen der LED mithilfe eines Peltier-Elements keine Effizienzsteigerung erwarten können.

Der Grund hierfür kann aus zwei Perspektiven betrachtet werde. Zum einen sind die betrachteten Peltier-Elemente nicht Effizient genug um eine Kühlung mit diesen zu rechtfertigen. Unabhängig von den, in diesem Bericht, betrachteten Peltier-Elementen, scheint das Erreichen einer Leistungszahl von 5, für eine Temperaturdifferenz von 20 K, nicht realistisch. Vergleichsweise liegt der COP einer Carnot-Kältemaschine bei 14 für die beschriebene Temperaturdifferenz, womit die Umsetzung rein physikalisch möglich wäre, jedoch sind Peltier-Elemente nicht die effizientesten Kühlmethoden.

Zum anderen liegt somit die zu erreichende Leistungszahl für die zu verwendene Kältemaschine recht hoch, weshalb man bemängeln kann, dass die durch die Kühlung eingesparte Leistung der LED äußerst gering ist. Wie in der Einleitung erwähnt konnte bei den Messungen fast eine Verdopplung der Effizienz festgestellt werden. Für die OP232 können wir einen Ausgangswirkungsgrad von ca. 4% ermitteln, weshalb klar zu erkennen ist, dass die effektiv eingesparte Leistung nicht besonders groß ausfallen wird. Dies könnten der Grund sein weshalb die verwendete Kältemaschine besonders Effizient sein muss um eine Anwendung dieser überhaupt zu rechtfertigen.

5 Literaturverzeichnis

[Revolution der Lichterzeugung - Deutsche Physikalische Gesellschaft](#)
Datenblatt OP232, OPTEK Technology, Inc., Issue B 07/2016
Datenblatt 1MD02-018-03/2, TEC Microsystems GmbH, Issue 2020
Datenblatt Thermokleber, Epoxy Technology, H20E, Februar 2021

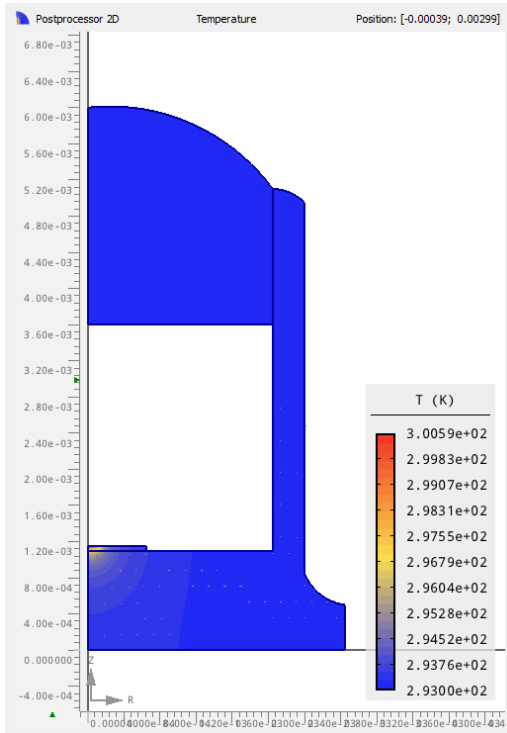


Abbildung 5: Simulation der Messdurchführung der OP232 Leuchtdiode in Agros2D:

Rotationssymmetrisches Koordinatensystem, Simulation der Abwärme des Halbleiters mit einem Wärmefluss von 170 mW und der äußeren Kühlung

Bauteile:

- Linse (PMMA, $\lambda = 0.19 \text{ W/mK}$)
- Gehäuse (Eisen, $\lambda = 80 \text{ W/mK}$)
- Thermokleber ($\lambda = 29 \text{ W/mK}$)

Boundary conditions:

- Kühlung (seitliche Fläche, 293K)
- Abwärme (Unterseite Halbleiter, Heatflux = 2404866.32 W/m^2)

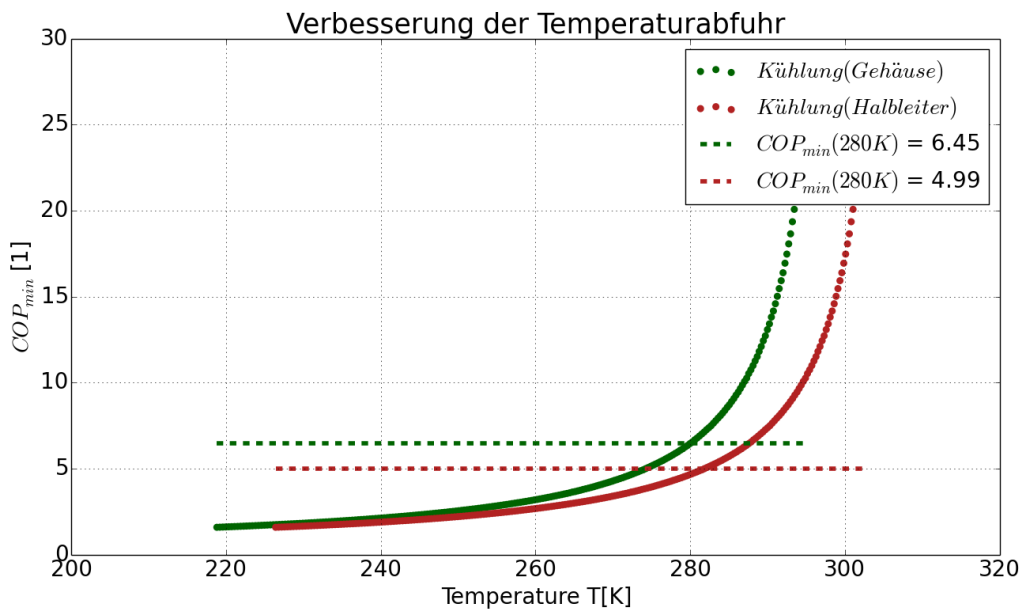


Abbildung 6: Darstellung der mindestens zu erreichenden Leistungszahl des verwendeten Peltier-Elements um eine Leistungssteigerung der LED-Peltier-Kombination zu erreichen.