

V204

Wärmeleitfähigkeit

Tahir Kamcili
tahir.kamcili@udo.edu

Marina Andreß
marina.andress@udo.edu

Durchführung: 10.11.2020

Abgabe: 24.11.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theoretische Grundlage	3
3	Vorbereitung	4
4	Versuchsaufbau	5
5	Versuchsdurchführung	6
5.1	Statische Methode	6
5.2	Dynamische Methode	7
6	Auswertung	8
6.1	Statische Methode	8
6.1.1	Temperaturverläufe der fernen Thermoelemente	8
6.1.2	Wärmestrom	9
6.2	Diagramme der Temperaturdifferenzen	10
6.3	Dynamische Methode mit einer 80s Periode	11
6.3.1	Messing	11
6.3.2	Aluminium	13
6.3.3	Wellenlänge und Frequenz bei Messing und Aluminium	14
6.4	Dynamische Methode mit einer 200s Periode	14
6.5	Wellenlänge und Frequenz beim Edelstahl	17
7	Diskussion	17
7.1	Allgemein	17
7.2	Messwerte	18
	Literatur	19

1 Zielsetzung

Im Versuch 'Wärmeleitung von Metallen' wird die Wärmeleitung von Aluminium, Messing und Edelstahl untersucht, um daraus die Wärmeleitfähigkeit dieser Metalle zu bestimmen.

2 Theoretische Grundlage

Bei einem System Temperaturunterschied im System kommt es zu einem Wärmetransport entlang des Temperaturgefälles. Hier wird unterschieden zwischen Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung, wobei sich hier auf die Wärmeleitung beschränkt wird.

Wenn die Enden eines Stabes der Länge L , der Querschnittsfläche A , der aus einem Material mit der spezifischen Wärme c und der Dichte ρ besteht, unterschiedlicher Temperatur sind, fließt in der Zeit dt durch A die Wärmemenge

$$dQ = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x} dt. \quad (1)$$

Dabei ist κ die vom Material abhängige Wärmeleitfähigkeit. Das Minuszeichen ergibt sich daraus, dass der Wärmestrom entlang des Temperaturgefälles fließt. Für die Wärmestromdichte j_w ergibt sich

$$j_w = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}$$

Hieraus kann die Wärmeleitungsgleichung aus der Kontinuitätsgleichung abgeleitet werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Diese gibt die räumliche- und zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung an. Dabei ist $\sigma_T = \frac{\kappa}{\rho c}$ die Temperaturleitfähigkeit, die ein Maß für die Geschwindigkeit des Temperatúrausgleichs ist.

Wenn ein Stab periodisch abwechselnd erhitzt und abgekühlt wird, breitet sich eine räumliche und zeitliche Temperaturwelle im Stab aus. Diese kann wie folgt beschrieben werden:

$$T(x, t) = T_{\max} e^{\sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\kappa}} x} \cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\kappa}} x)$$

Die Phasengeschwindigkeit mit der sich die Welle fortbewegt ergibt sich zu:

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\kappa}}} = \sqrt{\frac{2\kappa \omega}{\rho c}} \quad (2)$$

Aus dem Amplitudenverhältnis von A_{nah} und A_{fern} an zwei Messstellen x_{nah} und x_{fern} an der Welle wird die Dämpfung ermittelt. Wird nun berücksichtigt, dass $\omega = \frac{2\pi}{T'}$ (mit Periodendauer T') und für die Phase $\Phi = \frac{2\pi\Delta t}{T'}$ ergibt sich für die Wärmeleitfähigkeit

$$\kappa = \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2\Delta t \ln\left(\frac{A_{\text{nah}}}{A_{\text{fern}}}\right)} \quad (3)$$

mit dem Abstand der beiden Messstellen Δx und der Phasendifferenz Δt der Temperaturwelle zwischen den beiden Messstellen.

3 Vorbereitung

Vor der Durchführung ist sich anhand der Literatur über die Dichte ρ , die spezifische Wärme c und die Wärmeleitfähigkeit κ für Aluminium, Messing und Edelstahl zu informieren. Diese Werte wurden in Tabelle (1) zusammengetragen:

Material	$\rho / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c / \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$\kappa / \frac{\text{W}}{\text{m K}}$
Aluminium	2700	896	221
Messing	8730	384	142
Edelstahl	8000	500	21

Tabelle 1: Literaturwerte

4 Versuchsaufbau

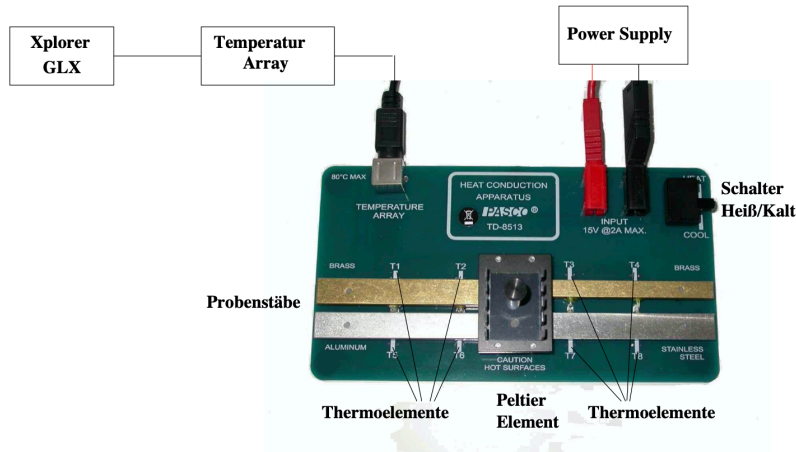


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau.

In der Abbildung (1) ist das Experiment zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit zu sehen. Auf der Grundplatte befinden sich vier rechteckige Probenstäbe unterschiedlicher Art. Darunter einer aus Aluminium, einer aus Edelstahl und zwei unterschiedlicher Breite aus Messing. Die Probenstäbe können mithilfe des Peltierelements durch betätigen des Schalters abwechselnd gekühlt oder erhitzt werden. An das Peltierelement wird für die statische Methode eine Spannung von $U_P = 5V$ und für die dynamische Methode eine Spannung von $U_P = 8V$ angelegt. Pro Stab gibt es zwei Thermoelemente mit denen die Temperatur an der jeweiligen Stelle gemessen werden kann. Die Temperaturen und Temperaturverläufe werden über ein 'Temperatur Array' an einen Datenlogger (Xplorer GLX) weitergegeben und können dort eingesehen, bearbeitet und graphisch dargestellt werden. Außerdem wurde separat eine Stoppuhr zur Verfügung gestellt. Diese Daten (2) für die Probenstäbe wurden bereitgestellt:

Material	Abmessungen /cm	$\rho / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c / \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Messing (breit)	9 x 1.2 x 0.4	8520	385
Messing (schmal)	9 x 0.7 x 0.4	8520	385
Aluminium (breit)	9 x 1.2 x 0.4	2800	830
Edelstahl (breit)	9 x 1.2 x 0.4	8000	400

Tabelle 2: Daten der Probenstäbe

5 Versuchsdurchführung

Vorerst wird die Verkabelung überprüft. Der Abstand Δx der Messstellen zwischen den Thermoelementen wird mithilfe eines Lineals mit der Messunsicherheit $\Delta s = \pm 0.05\text{cm}$ gemessen.

Diese Abstände wurden gemessen (4)

$$\Delta x_{T1T2} = 2.9\text{cm}$$

$$\Delta x_{T3T4} = 3.0\text{cm}$$

$$\Delta x_{T5T6} = 3.1\text{cm}$$

$$\Delta x_{T7T8} = 3.1\text{cm}$$

Es werden Messungen verschiedener Methoden durchgeführt.

5.1 Statische Methode

Bei der statischen Methode wird die Temperatur als Funktion der Zeit an den zwei Messstellen pro Stab gemessen, um über den zeitlichen Temperaturverlauf die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen.

Hierzu wird zunächst die Abtastrate Δt_{GLX} am Datenlogger auf 5s gesetzt. Unter Menüpunkt Digital werden die Temperaturen aller acht Sensoren eingesehen. Die Isolierung wird auf die Stäbe gelegt. Nun wird bei maximalem Strom eine Spannung von 5V angelegt und der Schalter wird von 'COOL' auf 'HEAT' umgelegt, während die Messung auf dem Xplorer GLX gestartet wird. Die Messung wird beendet, wenn die Temperatur des Thermoelements T7 45 Grad anzeigt. Die Messergebnisse werden mit einem zur Verfügung gestellten Stick zur Weiterverarbeitung der Daten gesichert. Die Isolierung wird abgenommen und der Schalter wird auf 'COOL' umgelegt. Die Probenstäbe werden so lange gekühlt, bis jedes Thermoelement eine Temperatur von 30 Grad oder kälter hat. Um längeren Wartezeiten vorzubeugen wurde die Platine mit einer nicht benutzten Platine ausgetauscht.

5.2 Dynamische Methode

Bei der Angström Methode wird die Wärmeleitfähigkeit aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturwelle berechnet, die sich ergibt, wenn ein Probenstab periodisch geheizt wird.

Dazu wird die Abtastrate Δt_{GLX} am Datenlogger auf 2s gesetzt. Im Unterverzeichnis Digital wird überprüft, ob die Probenstäbe an jeder Messstelle hinreichend abgekühlt sind (30 Grad oder kälter). Die Isolierung wird auf die Stäbe gelegt und die Messung wird gestartet, sobald eine Spannung von 8V angelegt wird. Die Probenstäbe werden daraufhin mit einer Periode von 80s geheizt. Der Schiebeschalter wird zu Beginn der Messung 40s auf 'HEAT' gestellt und danach 40s auf 'COOL' gestellt. Als Hilfsmittel wird hier die Stoppuhr verwendet. Die Messung wird nach 11 Perioden beendet und die Daten per Stick gesichert. Die Isolierung wird abgenommen und der Schalter bleibt auf 'COOL'.

Nachdem die Platine wieder aufgrund der langen Abkühlzeit der Probenstäbe ausgetauscht wurde, wird eine neue Messung gestartet. Dabei wird der eben beschriebene Vorgang wiederholt, allerdings mit einer Periode von 200s. Dafür werden die Stäbe 100s erhitzt und anschließend 100s gekühlt. Hierfür wird wieder eine Stoppuhr verwendet. Die Messung wird beendet, wenn eins der Thermoelemente eine Temperatur von über 80 Grad erreicht, was nach 4 Perioden der Fall war. Die Daten werden gesichert und alle Gerätschaften abgeschaltet, sobald die Stäbe abgekühlt sind. Alle Messvorgänge sind nun beendet.

6 Auswertung

6.1 Statische Methode

Bei der statischen Methode wird jeweils an zwei Stellen eines jeden Metallstabes die Temperatur als Funktion der Zeit gemessen und über den zeitlichen Temperaturverlauf wird an den beiden Messstellen die Wärmeleitfähigkeit der vier Metallstäbe bestimmt.

6.1.1 Temperaturverläufe der fernen Thermoelemente

Im folgenden befindet sich eine Grafik für alle fernen Thermoelemente. Dabei misst das Thermoelement $T1$ an dem dicken Messingstück und $T4$ am dünnen. $T5$ und $T8$ sind jeweils am Aluminium und Edelstahl befestigt.

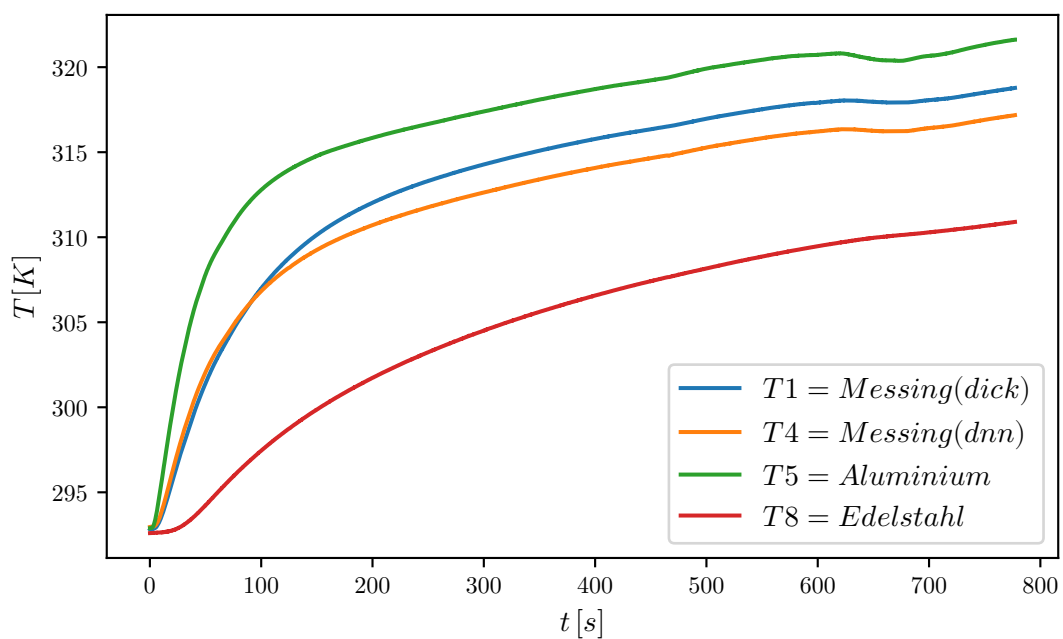


Abbildung 2: Temperaturverläufe der fernen Thermoelemente $T1$, $T4$, $T5$, $T8$

Es fällt auf, dass $T1$ und $T4$ ungefähr von $t = 0$ s bis $t = 100$ s gleichstark steigen, jedoch steigt die Temperatur von $T5$ deutlich steiler und von $T8$ deutlich flacher als die gemessene Temperatur der anderen Thermoelemente. Zudem ist bei allen Thermoelementen, außer bei $T8$, ab $t = 600$ s ein starker Knick zu beobachten. Außerdem steigt $T8$ nicht sofort, sowie die anderen Kurven direkt, sondern verzögert. Es ist außerdem auffällig das alle Kurven nach dem Abflachen nahezu parallel verlaufen.

An den Graphen lässt sich jeweils die Temperaturen bei 700s ablesen.

$$T1(700s) = 318.06 \text{ K} = 44.91 \text{ °C}$$

$$T4(700s) = 316.42 \text{ K} = 43.27 \text{ °C}$$

$$T5(700s) = 320.66 \text{ K} = 47.51 \text{ °C}$$

$$T8(700s) = 318.06 \text{ K} = 44.91 \text{ °C}$$

Aus der Grafik lässt sich erkennen, dass die Temperatur von T5 bei 700s am größten ist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium im Vergleich zu Edelstahl und Messing am besten ist.

6.1.2 Wärmestrom

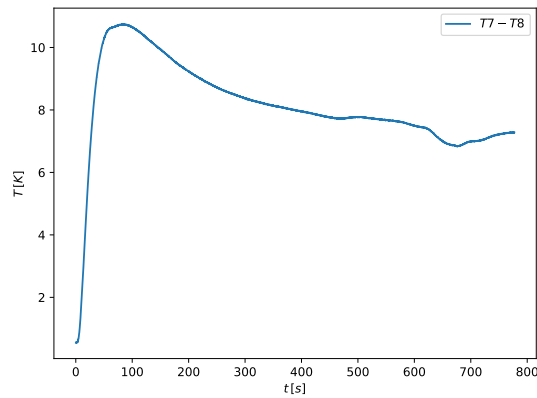
Mit der Gleichung (1) lässt sich nach einer Umstellung zu $\frac{dQ}{dt}$ der Wärmestrom als differenz $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = s$ berechnen. Diese werden in der folgenden Tabelle bei den unterschiedlichen Materialien jeweils bei $t = 0s, 100s, 200s, 300s, 400s, 500s$ bestimmt:

t / s	$s_{\text{Messing(Dick)}} / \frac{\text{kg m}^2}{s}$	$s_{\text{Messing(Dünn)}} / \frac{\text{kg m}^2}{s}$	$s_{\text{Aluminium}} / \frac{\text{kg m}^2}{s}$	$s_{\text{Edelstahl}} / \frac{\text{kg m}^2}{s}$
0	0,038	−0,052	0,011	−0,018
100	0,917	−0,569	0,700	−0,346
200	0,634	−0,420	0,474	−0,300
300	0,566	−0,387	0,435	−0,272
400	0,552	−0,377	0,431	−0,259

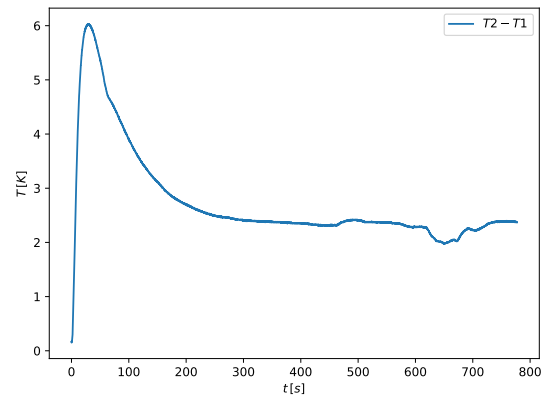
Tabelle 3: Messdaten

6.2 Diagramme der Temperaturdifferenzen

Im folgenden sind 2 Diagramme dargestellt. Bei beiden wird die Temperaturdifferenzen der Termoelemente eines Werkstückes gegen die Zeit aufgetragen. Bei dem linken Diagramm handelt es sich um das Edelstahl und beim rechten um die Temperaturdifferenz beim dicken Messingstück. Es fällt auf das beide Graphen mit einer ungefähr gleichen Steigung



(a) Temperaturverlauf von $T7 - T8$



(b) Temperaturverlauf von $T2 - T1$

steigen. Zudem flachen beide Graphen bei großem t relativ stark ab und haben beide eine „Kuhle“ ab ungefähr $t=630$ s. Außerdem haben beide einen Hochpunkt bei ungefähr $t=50$ s. Jedoch fällt der Graph von $T2 - T1$ deutlich stärker als $T7 - T8$. Das globale Maximum von $T7 - T8$ liegt ebenfalls höher, als $T2 - T1$. Bei genaueren hinschauen wird bei den beiden Globalen Maxima, erkannt, dass das Messing vor dem Edelstahl sein Maximum annimmt. Der geringe Abfall von $T7 - T8$ und der hohe Graph, sowie das höhere Maxima deutet darauf hin, dass die Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl signifikant schlechter ist als von Messing. Dies lässt sich auch in den errechneten Wärmeleitfähigkeiten sehen.

6.3 Dynamische Methode mit einer 80s Periode

Im folgenden sind die beiden Temperaturverläufe für den breiten Messingstab (T1 und T2), bei einem Umschalten von 'HEAT' auf 'COOL' alle 40s, graphisch dargestellt.

6.3.1 Messing

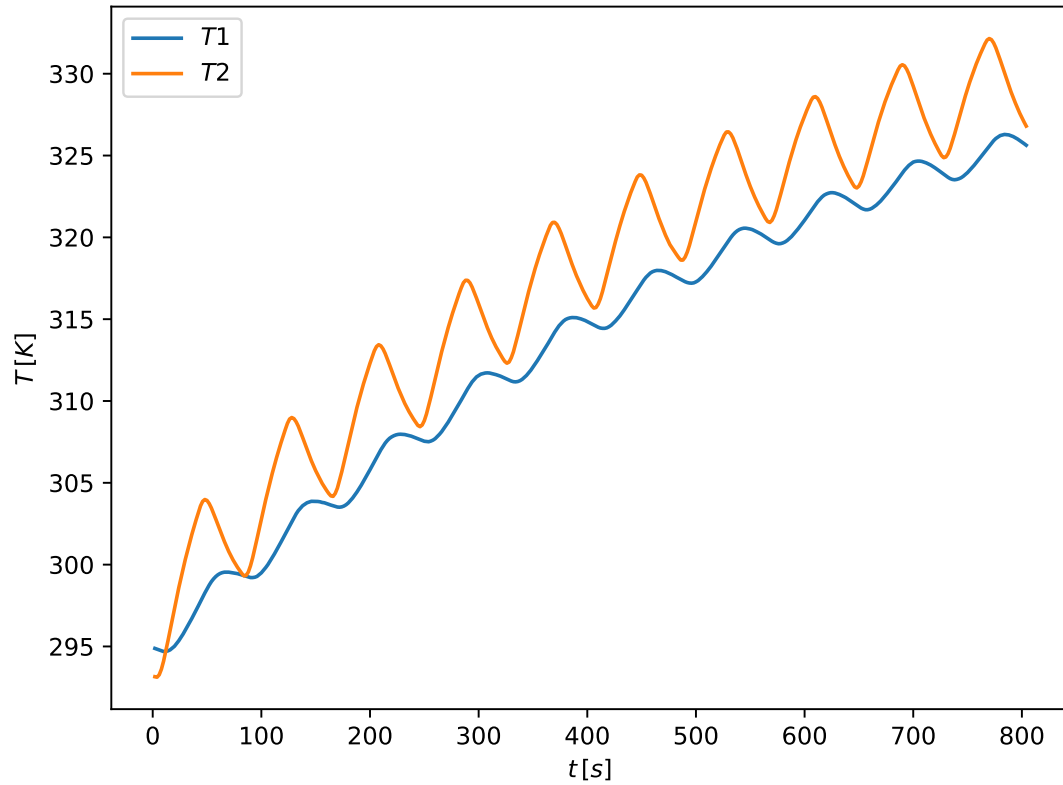


Abbildung 4: Temperaturverlauf von $T1$ und $T2$

Aus der Grafik lassen sich die doppelten Amplituden $A1$ und $A2$ sowie die Phasendifferenz Δt bestimmen. Daraus lässt sich die dazugehörige Wärmeleitfähigkeit berechnen:

$A1 / \text{K}$	$A2 / \text{K}$	$\Delta t / \text{s}$	$\kappa / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
4,85	10,86	13,0	127,07
4,66	9,68	13,0	140,12
4,46	9,27	13,0	140,01
4,21	8,95	14,0	126,12
3,93	8,61	12,0	141,50
3,54	8,14	12,0	133,27
3,36	7,84	12,0	130,97
3,12	7,69	11,0	134,20
2,97	7,53	11,0	130,12
2,77	7,28	12,0	114,84

Tabelle 4: Errechnete Daten fürs Messing aus dem Graphen

Es fällt auf das diese stark schwankt, jedoch ist nach einer Mittelung von der Wärmeleitfähigkeit zu $\bar{\kappa}_{\text{Messing}} = 131,8212 \pm 1.8130 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, der Fehler zum Literaturwert aus (1) nicht mehr so groß.

6.3.2 Aluminium

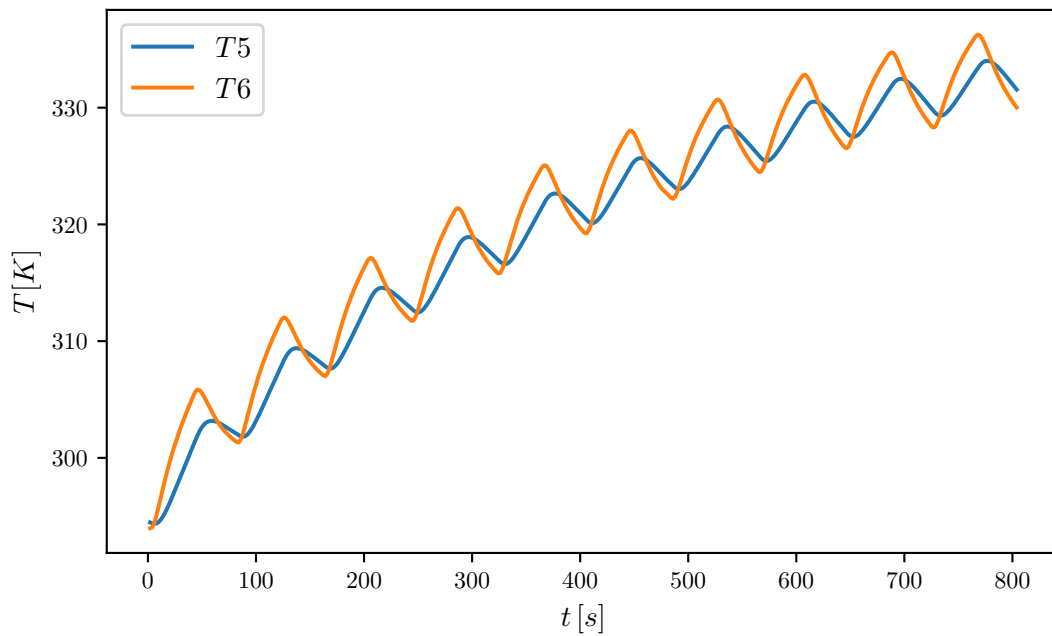


Abbildung 5: Temperaturverlauf von $T5$ und $T6$

Um die Rechnung zu vereinfachen wurden die Werte, welche aus dem Diagramm wie bereits beim Messing bestimmt wurden, direkt als Mittelwerte berechnet. Diese sind in der folgenden Tabelle dargestellt: Auch hier sieht man eine kleine Abweichung zum

$A5 / \text{K}$	$A6 / \text{K}$	$\Delta t / \text{s}$	$\kappa / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
6,477	5,497	32,889	$201,7020 \pm 1.2271$

Tabelle 5: Errechnete Daten fürs Aluminium aus dem Graphen

Literaturwert. Diese Abweichungen sind in der Diskussion diskutiert.

6.3.3 Wellenlänge und Frequenz bei Messing und Aluminium

Zusätzlich kann man die Frequenz, sowie die Wellenlänge aus den Daten berechnen. Die Frequenz der Welle im Messing und Aluminium wird aus der Grafik (4) und (5) bestimmt, indem die Anzahl der Perioden durch das gewählte Intervall geteilt wird. Dies für dann zu den folgenden Werten:

f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_5 / Hz	f_6 / Hz
0.01228	0.01277	0.0125	0.0125

Tabelle 6: Frequenz aus den Graphen ermittelt

Daraus lässt sich Mithilfe der Formel $\lambda f = v$ und der Formel (2), sowie dem Literaturwerten aus (1), die Frequenz berechnen zu:

$\lambda_{\text{Messing}} / \text{m}$	$\lambda_{\text{Aluminium}} / \text{m}$
0.2009	0.2895

Tabelle 7: Wellenlänge errechnet

6.4 Dynamische Methode mit einer 200s Periode

Die selbe Auswertung die bei Aluminium und Messing erfolgte, erfolgt jetzt ebenfalls bei Edelstahl, bei welchem ein Umschalten von 'HEAT' auf 'COOL' alle 100s erfolgt. Jedoch wurde diesmal von vielen Perioden die Amplitude bestimmt und jeweils die Wärmeleitfähigkeit κ ausgerechnet und nicht nur lediglich mit der gemittelten Amplitude.

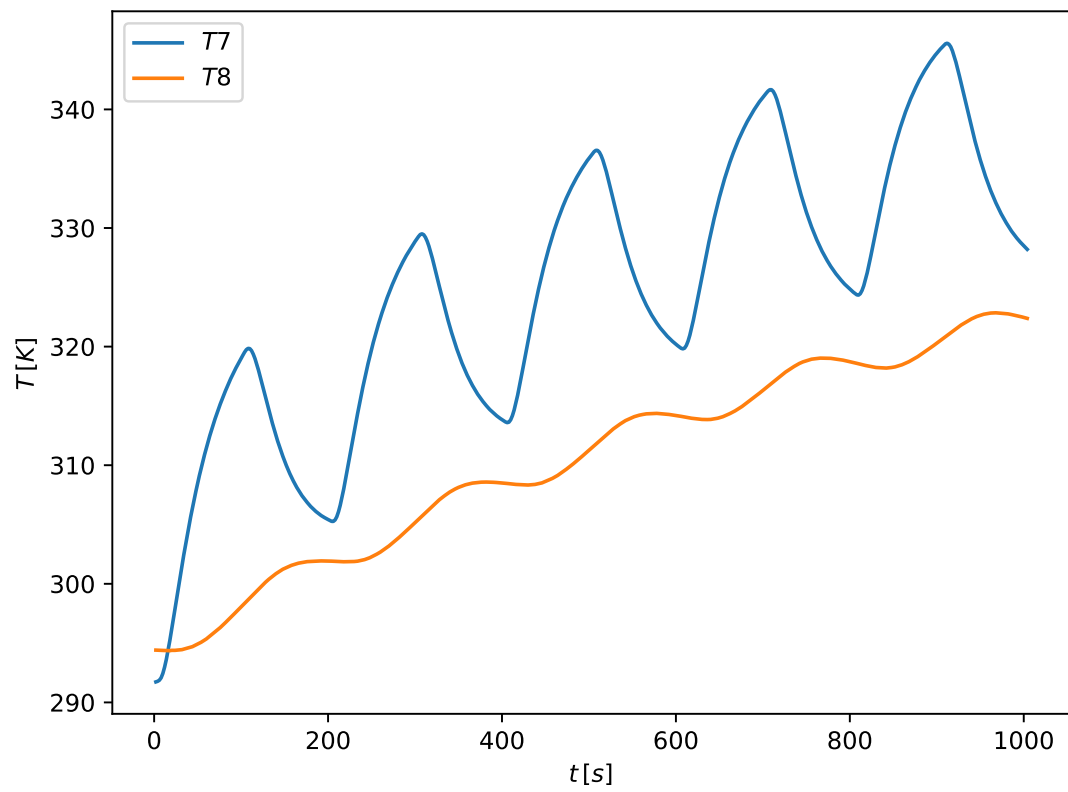


Abbildung 6: Temperaturverläufe der Thermoelemente $T7$ und $T8$

$A7_{\text{Edelstahl}} \text{K}$	$A8_{\text{Edelstahl}} \text{K}$	$\Delta t_{\text{Edelstahl}} \text{S}$	$\kappa_{\text{Edelstahl}} \frac{\text{W}}{\text{m K}}$
14,59	0,07	48	7,659
15,92	0,25	48	9,845
16,74	0,53	47	11,844
17,32	0,86	45	13,619

Tabelle 8: Errechnete Daten aus den Graphen

Wenn man die Wärmeleitfähigkeit mittelt ergibt dies: $\bar{\kappa}_{\text{Edelstahl}} = 10.8017 \pm 1.0546 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$

6.5 Wellenlänge und Frequenz beim Edelstahl

Auch beim Edelstahl ist es möglich die Frequenz aus dem Graphen zu bestimmen und im selben Verfahren wie zuvor die Wellenlänge rechnerisch zu bestimmen:

f_7 / Hz	f_8 / Hz
0.004918	0.005172

Tabelle 9: Frequenz aus den Graphen ermittelt

Daraus lässt sich mithilfe der Formel $\lambda f = v$ und der Formel (2), sowie dem Literaturwerten aus (1), die Frequenz berechnen zu:

$\lambda_{\text{Edelstahl}} / \text{m}$
0.0848

Tabelle 10: Wellenlänge errechnet

7 Diskussion

7.1 Allgemein

Während der Durchführung des Versuchs sind einige Fehlerquellen aufgefallen, die die Ergebnisse beeinflussen. Beim auflegen der Isolierung auf die Probenstäbe fiel auf, dass die Isolierung die Probenstäbe nicht vollständig bedeckt. Dadurch ist der Wärmeaustausch, der mit der Umgebung statt findet, noch schlechter zu verhindern.

Außerdem birgt das manuelle stoppen der Zeit und gleichzeitigem umlegen des Schalters von 'COOL' auf 'HEAT' bei der dynamischen Methode eine Messunsicherheit mit sich, da es hier auch auf die Reaktionszeit ankommt. Daher ist davon auszugehen, dass die exakten Perioden nicht eingehalten und minimal unregelmäßig gemessen wurden.

Zudem wurden die Platinen im Laufe des Versuchs zweimal ausgetauscht, da diese die Probenstäbe nicht ausreichend gekühlt haben. Da die unterschiedlichen Platinen möglicherweise voneinander abweichende Ergebnisse hervorrufen, zum Beispiel durch ein unterschiedlich schnell oder ungleichmäßig heizendes Peltierelement, muss auch hier ein Fehler in betracht gezogen werden.

Möglich ist auch ein Fehler durch Schwankungen der an der Platine anliegenden Spannung aufgrund von technischen Mängeln der Spannungsquelle.

Die Ergebnisse aus (4) wurden mit einem Lineal gemessen. Dies sorgt beim weiterrechnen mit diesen Werten natürlich für einen Fehler.

Des Weiteren gab es auch bei der Messung große Probleme. Es wurden am Ende Messergebnisse einer anderen Gruppe verwendet, da die ermittelten Daten nicht vollständig gespeichert wurden und so alle Messungen hinfällig waren.

7.2 Messwerte

Beim Vergleich der Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Metalle mit den Literaturwerten fällt schnell auf, dass diese nicht übereinstimmen. Der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von Messing liegt bei $\bar{\kappa}_{\text{Messing}} = 131,8212 \pm 1.8130 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$, von Aluminium bei $\bar{\kappa}_{\text{Aluminium}} = 201,7020 \pm 1.2271 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ und von Edelstahl bei $\bar{\kappa}_{\text{Edelstahl}} = 10.8017 \pm 1.0546 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$.

Mit den Literaturwerten aus der Tabelle (1) folgen folgende Fehler:

Material	relativer Fehler
Aluminium	0.0873
Messing	0.0685
Edelstahl	0.4637

Tabelle 11: relative Fehler der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur Literatur

Die Fehler vom Messing und Aluminium können durch die schon oben angeführten Begründungen gut erklärt werden, jedoch fällt der Fehler von Edelstahl von fast 50 % stark auf. Dieser kann aber bei der Betrachtung der Größenordnung sehr schnell aufgeklärt werden. Die absoluten Abweichungen sind nicht besonders groß, jedoch durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Metalls im Vergleich mit den anderen fällt auf, dass absolut kleine Fehler schnell große relative Fehler produzieren. Um wirklich genau die Eigenschaften der Metalle zu untersuchen empfiehlt sich eine deutliche bessere Isolierung im Labor, zum Beispiel durch eine Vakuumkammer und durch genauere Temperatursensoren die nicht direkt in Kontakt mit dem zu untersuchenden Metall stehen. Daher wenn man Metalle oder andere Stoffe in dem uns gegebenen Versuchsaufbau untersuchen will, empfiehlt es sich Stoffe mit einer voraussichtlich sehr hohen Wärmeleitfähigkeit zu nutzen, um die relativen Fehler durch Messungenauigkeit und Versuchsaufbau klein zu halten.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik I*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-46414-4.
- [2] Geschke. *Physikalisches Praktikum*. Teubner, 29. Apr. 2011.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] F. Kohlrausch. *Praktische Physik*. Teubner, 1996.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [7] *Literaturwert*. 2020. URL: <https://www.chemie.de> (besucht am 01.11.2020).
- [8] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [9] *V204: Wärmeleitung von Metallen*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2020.