

V204

Wärmeleitung von Metallen

AUTOR A

Yanick Sebastian Kind

AUTOR B

Till Willershausen

Durchführung: 10.11.2020

Abgabe: 20.11.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Statische Methode	3
2.2	Dynamische Methode	4
3	Durchführung	4
3.1	Vorbereitung	4
3.2	Aufbau	4
3.3	Versuchsdurchführung	5
3.3.1	Statische Methode	6
3.3.2	Dynamische Methode	6
4	Auswertung	6
4.1	Statisches Vefahren	6
4.1.1	Vergleich der Temperaturverläufe	6
4.1.2	Die beste Wärmeleitfähigkeit	7
4.1.3	Wärmestrom	7
4.1.4	Vergleich der Temperaturdifferenzen	7
4.2	Dynamisches Verfahren	8
4.2.1	Temperaturwelle des großen Messingstabs	8
4.2.2	Temperaturwelle des Aluminiumstabs	10
4.2.3	Temperaturwelle des Stahlstabs	12
4.2.4	Fehlerformeln des dynamischen Verfahrens	12
5	Diskussion	13
	Literatur	14

1 Ziel

Mit dem Versuch, soll die Wärmeleitung von Aluminium, Messing und Edelstahl untersucht werden. Dabei soll die Wärmeleitfähigkeit unter statischen, sowie dynamischen Verfahren ermittelt werden. Bei der dynamischen Betrachtung soll außerdem die Wellenlänge und die Frequenz ermittelt werden.

2 Theorie

Die Inhalte des Theorieteils, sind auf Grundlage von [2] und [1], formuliert. Ein Wärmetransport findet statt, wenn Temperaturdifferenzen zwischen zwei Orten auftreten. Dieser Wärmetransport geht entlang des Temperaturgefälles. Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Mechanismen des Wärmetransportes. Dabei unterscheidet man zwischen: der Konvektion, der Wärmeleitung und der Wärmestrahlung. In diesem Versuch behandeln wir, jedoch nur die Wärmeleitung von Metallen. Der Wärmetransport mittels Wärmeleitung erfolgt über Phononen und frei bewegliche Elektronen. Der Betrag des Gitters ist bei Metallen zu vernachlässigen.

2.1 Statische Methode

Betrachtet wird ein Stab der Länge L und der Querschnittsfläche A mit der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c des Materials. Wird ein Ende des Stabes erhitzt, so fließt in der Zeit dt durch die Querschnittsfläche A die Wärmemenge

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

Dabei ist κ ($[\kappa] = \frac{\text{W}}{\text{mK}}$) die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Da der Wärmestrom in Richtung des kälteren Ortes verläuft, ist das Minuszeichen in der Gleichung Konvention. Die Wärmestromdichte j_w lässt sich berechnen durch

$$j_w = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2)$$

Aus dieser Gleichung und der Kontinuitätsgleichung lässt sich die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

herleiten. Die Wärmeleitungsgleichung beschreibt die räumliche und zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung. Dabei ist die Größe $\sigma_T = \kappa/\rho c$ die Temperaturleitfähigkeit. Die Temperaturleitfähigkeit ist eine Materialeigenschaft, die die 'Schnelligkeit' angibt, mit der sich ein Temperaturunterschied ausgleicht. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung ist abhängig von den Anfangsbedingungen und der Stabgeometrie.

2.2 Dynamische Methode

Wird ein Stab mit der Periode τ erwärmt und abgekühlt, so entsteht eine räumliche und zeitliche Temperaturwelle

$$T(x, t) = T_{\max} \exp \left(-\sqrt{\frac{w\rho c}{2\kappa}} x \right) \cos \left(wt - \sqrt{\frac{w\rho c}{2\kappa}} x \right), \quad (4)$$

welche sich über den Stab fortsetzt. Die Phasengeschwindigkeit v der Welle ist folglich

$$v = \frac{w}{k} = \frac{w}{\sqrt{\frac{w\rho c}{2\kappa}}} = \sqrt{\frac{2\kappa w}{\rho c}}. \quad (5)$$

Die Wellenlänge lässt sich jetzt berechnen mit

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\sqrt{\frac{2\kappa w}{\rho c}}}{f}. \quad (6)$$

Dabei ist f die Frequenz der Welle. Das Amplitudenverhältnis A_{nah} zu A_{fern} , an zwei Messstellen x_{nah} und x_{fern} , ergibt die Dämpfung der Welle. Mit $w = \frac{2\pi}{\tau}$ und $\phi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}$ ¹ erhält man für die Wärmeleitfähigkeit

$$\kappa = \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2\Delta t \ln(A_{\text{nah}}/A_{\text{fern}})}. \quad (7)$$

Dabei beschreibt Δx den Abstand der Messstellen und Δt die Phasendifferenz der Temperaturwelle zwischen den beiden Messstellen.

3 Durchführung

3.1 Vorbereitung

Als Vorbereitungsaufgabe sollte man sich über die Dichte ρ , die spezifische Wärme c und die Wärmeleitfähigkeit κ für Aluminium, Messing, Edelstahl und Wasser informieren. Da die Werte von Wasser nicht relevant sind, werden diese nicht aufgeführt. Zudem wurden die Abmessungen der Probestäbe, für den Aufbau schon beigefügt.

3.2 Aufbau

Das Experiment wird wie in Abbildung 1 aufgebaut. Auf der Grundplatte befinden sich vier rechteckige Probestäbe aus den Materialien: Aluminium, Messing(2x) und Edelstahl. Die Abmessungen der Probestäbe sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Ein Peltierelement heizt bzw. kühlt die vier Probestäbe simultan bei einer Spannung von $U_P = 5 \text{ V}$ und

¹die Phase ϕ und die Periodendauer τ

Tabelle 1: Literaturwerte von Aluminium, Messing und Edelstahl und Abmessungen der Probestäbe

Metall	Abmessungen / m	$\rho / \text{kg m}^{-3}$	$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\kappa / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Aluminium	0,09 x 0,012 x 0,004	2800	830	236
Messing(breit)	0,09 x 0,012 x 0,004	8520	385	120
Messing(schmal)	0,09 x 0,007 x 0,004	8520	385	120
Edelstahl	0,09 x 0,012 x 0,004	8000	400	21

$U_P = 8 \text{ V}$ bei der dynamischen Methode. An jedem Probestab wird an zwei Stellen die Temperatur gemessen und über ein 'Temperatur Array' an einen Datenlogger (Xplorer GLX) weitergegeben. Die Daten können über den Datenlogger simultan gemessen und aufgezeichnet werden. Es wird außerdem eine Stoppuhr für das dynamische Verfahren benötigt.

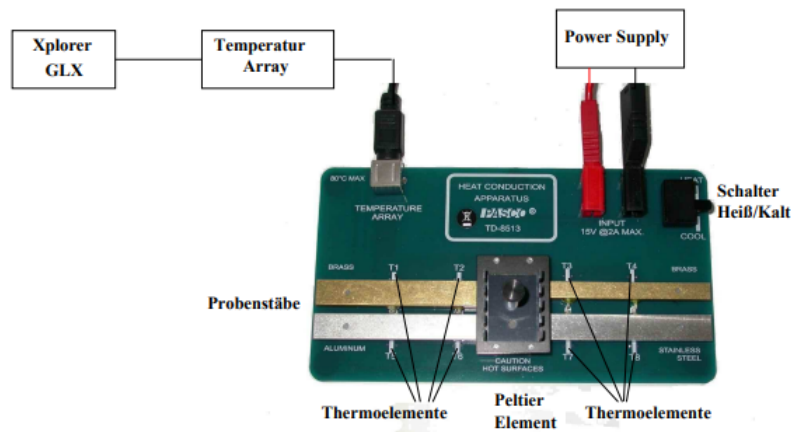


Abbildung 1: Aufbau des Experiments

3.3 Versuchsdurchführung

Zuerst muss die Verkabelung überprüft werden und gegebenenfalls korrigiert werden. Zudem wird der Abstand x zwischen den Thermoelementen gemessen. Um den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu minimieren, wird bei jeder Messung die Wärmeisolierung über die Stäbe gelegt. Nach jeder Messung müssen die Isolierungen entfernt werden und die Stäbe werden mit Hilfe des Peltier Elements gekühlt. Das System ist träge und benötigt Zeit um abzukühlen. Die gesammelten Daten werden nach der Messung auf einen USB-Stick gezogen und können dann benutzt werden.

3.3.1 Statische Methode

Es wird an jedem Stab an jeweils zwei Stellen die Temperatur als Funktion der Zeit gemessen. Der Datenlogger wird auf eine Abtastzeit von $\Delta t_{GLX} = 5\text{ s}$ eingestellt, während die Spannung für das Peltier Element auf $U_P = 5\text{ V}$ gestellt wird. Die Messung wird durchgeführt bis das Thermoelement T7 die Temperatur 45°C erreicht. Danach wird die Messung beendet und die Probestäbe werden gekühlt. Es werden die Temperaturverläufe für T1 und T4, sowie für T5 und T8 in jeweils einer Graphik dargestellt.

3.3.2 Dynamische Methode

Es wird das Angström-Meßverfahren verwendet, bei dem die Probestäbe periodisch geheizt und gekühlt werden. Der Datenlogger wird auf eine Abtastzeit von $\Delta t_{GLX} = 2\text{ s}$ eingestellt. Bevor die neue Messung erfolgt, sollte die Temperatur der Thermoelemente unter 30°C gefallen sein. Die erste dynamische Messung hat eine Periode von 80 s , dabei werden die Probestäbe, ohne die Isolierung zu entfernen, 40 s geheizt und dann 40 s gekühlt. Die Messung wird nach mindestens 10 Perioden beendet und anschließend wird wieder gekühlt. Nachdem die Thermoelemente wieder hinreichend gekühlt sind, wird der Versuch mit einer Periodendauer von 200 s wiederholt. Die Messung wird gestoppt, sobald eins der Thermoelemente über 80°C fällt. Zuletzt wird noch einmal gekühlt und dann ausgewertet.

4 Auswertung

Für die Temperatur wurde eine Messunsicherheit von $\Delta T = 0,2\text{ K}$ angenommen. Die Messunsicherheit der Zeit wird als $\delta t = 0,1\text{ s}$ angesehen.² Jegliche Fehlerrechnung wurde mit der Python-Bibliothek `uncertainties` [3] absolviert. Trotz dessen sind die Formeln für die Unsicherheiten am Ende des jeweiligen Abschnitts angegeben. Allgemeine Rechnungen wurden mit der Python-Bibliothek `numpy` [4] automatisiert.

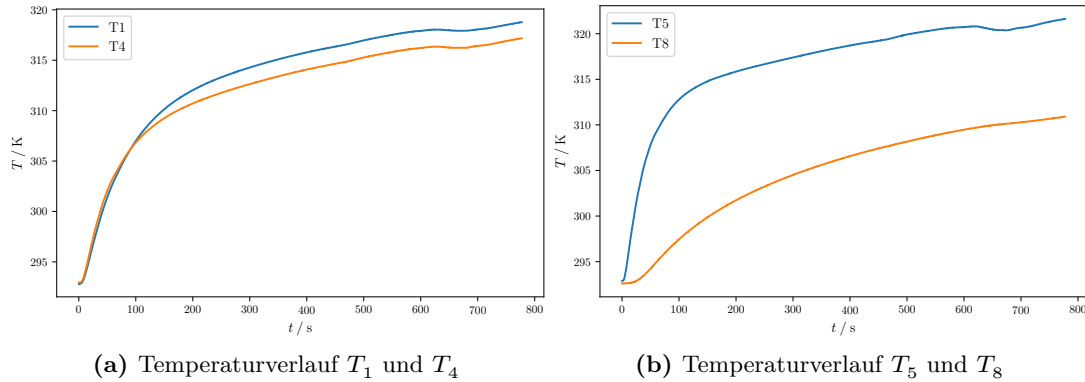
4.1 Statisches Vefahren

4.1.1 Vergleich der Temperaturverläufe

Bei dem Vergleichen der Kurven aus Abbildung 2 fällt auf, dass alle vier Kurven zu Beginn einen starken Temperaturanstieg repräsentieren, welcher jedoch schnell wieder abschwächt. Dennoch verhalten sich die Temperaturen T_1 und T_4 anfangs beinahe identisch, wobei die Temperaturen T_5 und T_8 dort Diskrepanzen aufzeigen. T_5 steigt sehr stark an und flacht vergleichsweise schnell wieder ab, während die Temperatur T_8 eine eher verhaltene Steigung aufweist. Nach dem beinahe identischen Verhalten fällt die Kurve von T_4 früher ab, wonach dann eine kleine, annähernd konstante Differenz zwischen den beiden Temperaturen herrscht. Aufgrund der verhaltenen Steigung der Temperaturkurve von T_8 ist die Differenz zwischen den beiden Kurven aus der Graphik 3b schon von Anfang

²Die Messunsicherheit der Zeit wird mit dem kleinen δ beschrieben, da das große Δ für die Phasendifferenz gebraucht wird.

Abbildung 2: Temperaturverlauf der statischen Methode



an sehr groß, wobei sich diese ab dem Zeitpunkt $t \approx 150$ s eingestellt hat. Als letzte Gemeinsamkeit erkennt man leicht, dass alle Kurven einen leichten Abfall bei $t \approx 620$ s erleiden.

4.1.2 Die beste Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 2: Temperaturen nach 700 s

T_1 / K	T_4 / K	T_5 / K	T_8 / K
318,06	316,42	320,66	310,28

Der Tabelle 2 nach zu urteilen, kann man klar erkennen, dass der Aluminiumstab die beste Leitfähigkeit hat.

4.1.3 Wärmestrom

Für die Berechnung des Wärmestroms dient die Gleichung (1). Jedoch lässt sich in diesem Fall die Wärmestromdichte j_w nicht mit dem Differentialquotient $\partial T / \partial x$ sondern nur mit dem Differenzenquotienten $\Delta T / \Delta x$ berechnen, so dass der Wärmestrom auch durch einen Differenzenquotienten dargestellt wird. Für den Abstand zwischen zwei Thermoelementen wurde $\Delta x = 0,03$ m gemessen. Der Fehler lässt sich mittels der Fehlerfortpflanzung nach Gauß berechnen:

$$\Delta \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \kappa A \frac{\Delta T}{0,03 \text{ m}} \quad (8)$$

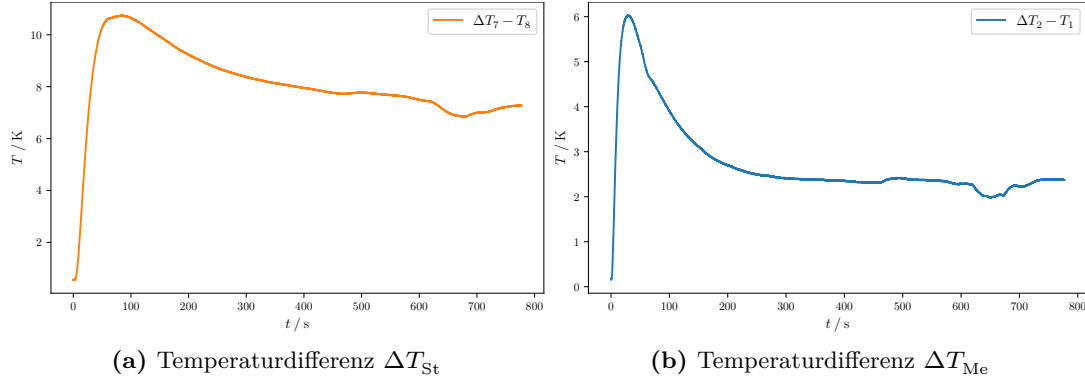
4.1.4 Vergleich der Temperaturdifferenzen

Bei der Betrachtung der Graphen 5a und 5b erkennt man instantan, dass bei beiden Kurven ein Maximum kurz vor $t = 100$ s erreicht wird, wobei beide Verläufe danach wieder abfallen. Bei näherer Betrachtung wird die Stärke des Abfalls auffällig, da die

Tabelle 3: Errechnete Wärmeströme

t / s	$\frac{\Delta Q_{\text{Me}}}{\Delta t} / \text{J s}^{-1}$	$\frac{\Delta Q_{\text{Me,k}}}{\Delta t} / \text{J s}^{-1}$	$\frac{\Delta Q_{\text{Al}}}{\Delta t} / \text{J s}^{-1}$	$\frac{\Delta Q_{\text{St}}}{\Delta t} / \text{J s}^{-1}$
100	$7,49 \pm 0,38$	$4,65 \pm 0,22$	$7,51 \pm 0,76$	$3,57 \pm 0,07$
200	$5,18 \pm 0,38$	$3,43 \pm 0,22$	$5,08 \pm 0,76$	$3,10 \pm 0,07$
300	$4,63 \pm 0,38$	$3,16 \pm 0,22$	$4,66 \pm 0,76$	$2,82 \pm 0,07$
500	$4,63 \pm 0,38$	$3,15 \pm 0,22$	$4,78 \pm 0,76$	$2,61 \pm 0,07$
700	$4,28 \pm 0,38$	$2,92 \pm 0,22$	$4,44 \pm 0,76$	$2,35 \pm 0,07$

Abbildung 4: Differenzen der Temperaturen der statischen Methode



Temperaturdifferenz des Stahlstabes deutlich langsamer als die des großen Messingstabes abfällt. Wie bereits bei der Abbildung 2 angemerkt, erleiden beide Temperaturverläufe einen Knick bei $t \approx 620 \text{ s}$.

4.2 Dynamisches Verfahren

Dieser Teil der Auswertung dient zu Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und den Eigenschaften (Frequenz und Wellenlänge) der Temperaturwellen. Hierzu wurden die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten zu den einzelnen Amplituden ermittelt, fortlaufend gemittelt um anschließend ein aussagekräftiges Resultat zu erzielen.

4.2.1 Temperaturwelle des großen Messingstabs

Mit dem gegebenen Literaturwert für die Dichte von Messing $\rho_{\text{Me}} = 8520 \text{ kg/m}^3$, der gegebenen spezifischen Wärmekapazität $c_{\text{Me}} = 385 \text{ J/(kg K)}$ und dem gemessenen Abstand $\Delta x = 0,03 \text{ m}$ lässt sich der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit zu

$$\bar{\kappa}_{\text{Me}} = (81 \pm 9) \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad (9)$$

Abbildung 6: Temperaturen des großen Messingstabs

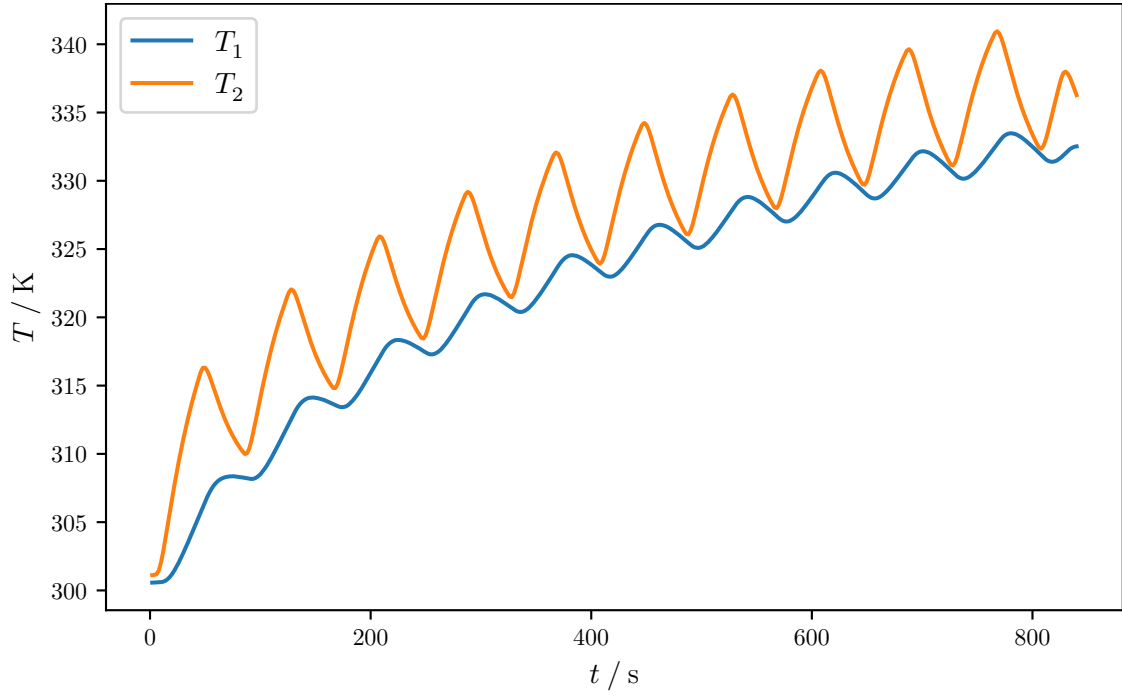


Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeiten des großen Messingstabs

A_1 / K	A_2 / K	$\Delta t_{\text{Me}} / \text{s}$	$\kappa_{\text{Me}} / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$0,10 \pm 0,28$	$1,24 \pm 0,28$	$26,00 \pm 0,14$	$22,5495 \pm 25,1596$
$0,35 \pm 0,28$	$2,11 \pm 0,28$	$20,00 \pm 0,14$	$41,0822 \pm 18,5464$
$0,53 \pm 0,28$	$2,34 \pm 0,28$	$16,00 \pm 0,14$	$62,1238 \pm 22,6669$
$0,65 \pm 0,28$	$2,49 \pm 0,28$	$16,00 \pm 0,14$	$68,6903 \pm 22,7777$
$0,78 \pm 0,28$	$2,67 \pm 0,28$	$14,00 \pm 0,14$	$85,6819 \pm 26,0541$
$0,85 \pm 0,28$	$2,66 \pm 0,28$	$14,00 \pm 0,14$	$92,4183 \pm 28,0298$
$0,90 \pm 0,28$	$2,73 \pm 0,28$	$14,00 \pm 0,14$	$95,0154 \pm 28,0654$
$0,94 \pm 0,28$	$2,74 \pm 0,28$	$14,00 \pm 0,14$	$98,5527 \pm 29,0265$
$1,01 \pm 0,28$	$2,82 \pm 0,28$	$12,00 \pm 0,14$	$119,7985 \pm 34,3854$
$1,04 \pm 0,28$	$2,85 \pm 0,28$	$12,00 \pm 0,14$	$122,0194 \pm 34,7186$

berechnen. Die Periodendauer dieser Temperaturwelle beträgt $\tau = (80,0 \pm 0,1) \text{ s}$, so dass sich eine Frequenz von

$$f = (0,012\,500 \pm 0,000\,016) \frac{1}{\text{s}} \quad (10)$$

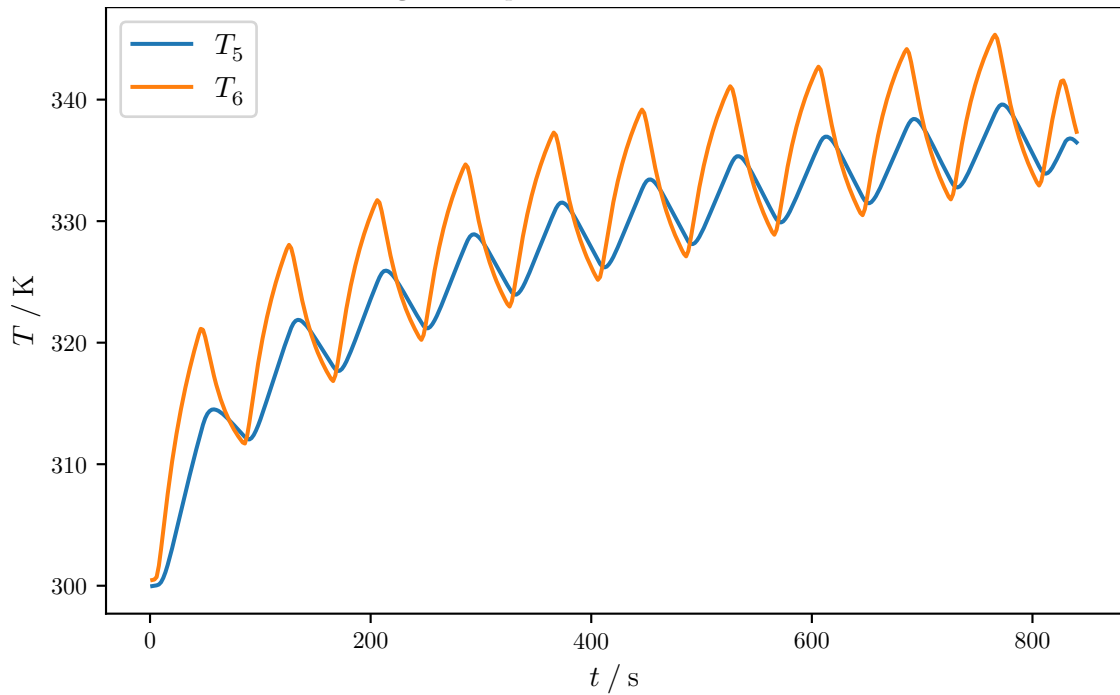
ergibt. Mit Hilfe der Gleichung (6) lässt sich die Wellenlänge zu

$$\lambda_{\text{Me}} = (0,157 \pm 0,008) \text{ m} \quad (11)$$

berechnen.

4.2.2 Temperaturwelle des Aluminiumstabs

Abbildung 7: Temperaturen des Aluminiumstabs



Mit der Dichte von Aluminium $\rho_{\text{Al}} = 2800 \text{ kg/m}^3$, der spezifischen Wärmekapazität $c_{\text{Al}} = 830 \text{ J/(gK)}$ und dem Abstand $\Delta x = 0,03 \text{ m}$ lässt sich der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit zu

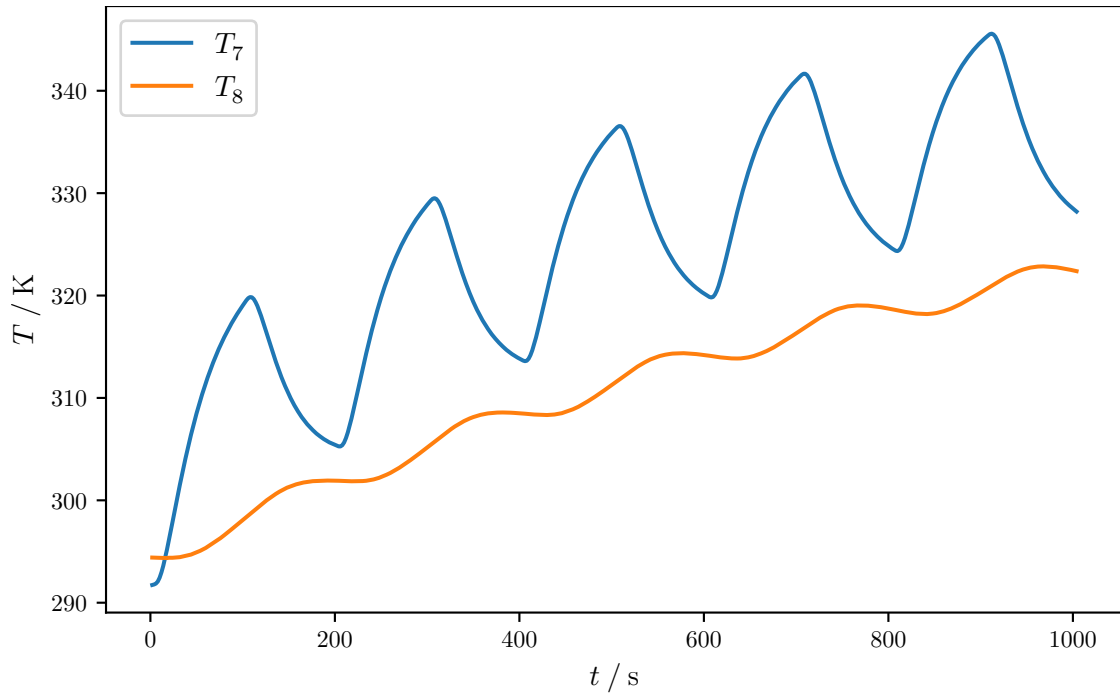
$$\bar{\kappa}_{\text{Al}} = (168 \pm 8) \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad (12)$$

berechnen. Mit der Frequenz aus Gleichung (9) erhält man als Wellenlänge

$$\lambda_{\text{Al}} = (0,270 \pm 0,006) \text{ m} \quad (13)$$

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeiten des Aluminiumstabs

A_5 / K	A_6 / K	$\Delta t_{\text{Al}} / \text{s}$	$\kappa_{\text{Al}} / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$1,24 \pm 0,28$	$4,72 \pm 0,28$	$12,00 \pm 0,14$	$65,1980 \pm 11,4129$
$2,11 \pm 0,28$	$5,61 \pm 0,28$	$8,00 \pm 0,14$	$133,6844 \pm 19,5231$
$2,38 \pm 0,28$	$5,75 \pm 0,28$	$8,00 \pm 0,14$	$148,1976 \pm 21,5482$
$2,49 \pm 0,28$	$5,85 \pm 0,28$	$8,00 \pm 0,14$	$153,0453 \pm 22,0601$
$2,67 \pm 0,28$	$6,61 \pm 0,28$	$8,00 \pm 0,14$	$144,2077 \pm 18,1684$
$2,66 \pm 0,28$	$6,04 \pm 0,28$	$8,00 \pm 0,14$	$159,4056 \pm 22,5306$
$2,73 \pm 0,28$	$6,11 \pm 0,28$	$6,00 \pm 0,14$	$216,3537 \pm 30,5878$
$2,74 \pm 0,28$	$6,11 \pm 0,28$	$6,00 \pm 0,14$	$217,3401 \pm 30,7722$
$2,82 \pm 0,28$	$6,19 \pm 0,28$	$6,00 \pm 0,14$	$221,6998 \pm 31,1995$
$2,85 \pm 0,28$	$6,21 \pm 0,28$	$6,00 \pm 0,14$	$223,7938 \pm 31,4970$

Abbildung 8: Temperaturen des Stahlstabs**Tabelle 6:** Wärmeleitfähigkeiten des Stahlstabs

A_7 / K	A_8 / K	$\Delta t_{\text{St}} / \text{s}$	$\kappa_{\text{St}} / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$7,23 \pm 0,28$	$0,03 \pm 0,28$	$80,00 \pm 0,14$	$3,2818 \pm 5,5846$
$7,90 \pm 0,28$	$0,13 \pm 0,28$	$72,00 \pm 0,14$	$4,8696 \pm 2,5541$
$7,47 \pm 0,28$	$0,27 \pm 0,28$	$56,00 \pm 0,14$	$7,7447 \pm 2,4206$
$8,66 \pm 0,28$	$0,43 \pm 0,28$	$60,00 \pm 0,14$	$7,9928 \pm 1,7356$

4.2.3 Temperaturwelle des Stahlstabs

Die Dichte von dem Edelstahl beträgt $\rho_{\text{St}} = 8000 \text{ kg/m}^3$, die spezifische Wärmekapazität $c_{\text{St}} = 400 \text{ J K/kg}$. Auch der Abstand der beiden Thermoelemente von dem Stahlstab beträgt $\Delta x = 0,03 \text{ m}$, so dass sich der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von

$$\bar{\kappa}_{\text{St}} = (6,0 \pm 1,7) \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad (14)$$

ergibt. Die hier betrachtete Temperaturwelle wurde mit einer Periodendauer von $\tau = (200,0 \pm 0,1) \text{ s}$ erzeugt. Daraus resultiert eine Frequenz von

$$f = (0,005\,000\,0 \pm 0,000\,002\,5) \frac{1}{\text{s}}. \quad (15)$$

Somit besitzt diese Temperaturwelle eine Wellenlänge von

$$\lambda_{\text{St}} = (0,068 \pm 0,010) \text{ m}. \quad (16)$$

4.2.4 Fehlerformeln des dynamischen Verfahrens

Der Fehler der Amplituden, des natürlichen Logarithmus des Verhältnis der Amplituden und der Phasendifferenz lassen sich mittels der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnen:

$$\Delta A = \sqrt{2} \Delta T \quad (17)$$

$$\Delta(\Delta t) = \sqrt{2} \delta t \quad (18)$$

$$\Delta \ln \left(\frac{A_{\text{nah}}}{A_{\text{fern}}} \right) = \sqrt{\frac{1}{A_{\text{nah}}^2} (\Delta A)^2 + \frac{A_{\text{nah}}^2}{A_{\text{fern}}^4} (\Delta A)^2} \quad (19)$$

Die Unsicherheit der Wärmeleitfähigkeit wird ebenfalls mit der Fehlerfortpflanzung nach Gauß berechnet:

$$\Delta \kappa = \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2 \ln \left(\frac{A_{\text{nah}}}{A_{\text{fern}}} \right) \Delta t} \sqrt{\frac{1}{(\Delta t)^2} (\Delta(\Delta t))^2 + \frac{1}{\ln \left(\frac{A_{\text{nah}}}{A_{\text{fern}}} \right)^2} \left(\Delta \ln \left(\frac{A_{\text{nah}}}{A_{\text{fern}}} \right) \right)^2} \quad (20)$$

Für die Wellenlänge gilt folgende Formel für den Fehler:

$$\Delta \lambda = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho c}}}{f} \sqrt{\frac{\omega}{4\kappa} (\Delta \kappa)^2 + \frac{\kappa}{4\omega} (\Delta \omega)^2 + 4 \frac{\omega \kappa}{f^2} (\Delta f)^2} \quad (21)$$

, wobei

$$\Delta f = \frac{1}{T^2} \delta t \quad (22)$$

$$\Delta \omega = 2\pi \Delta f \quad (23)$$

gilt. Um die Unsicherheit des Mittelwertes zu erhalten, teilt man die jeweiligen Größen durch die Quadratwurzel der Anzahl der vorhandenen Werte.

5 Diskussion

Bei Betrachtung der Graphen von Abbildung 2 fällt auf, dass die Graphen von T1, T4 und T5 jeweils eine Anomalie bei $t \approx 700$ s haben. Jedoch ist bei dem Graphen von T8 so etwas nicht zu erkennen. Da alle Messungen gleichzeitig und mit gleichem Aufbau ausgeführt wurden, könnte dies eine Materialabhängigkeit sein. Da aber der Graph von T8 anders verläuft als der Rest, ist die Abweichung vielleicht zu klein um sie zu erkennen. Wenn T8 auch eine Anomalie hätte, könnte man auf eine Schwankung des Peltier-Elements oder des Netzgeräts schließen. Die Fehler ließen sich untersuchen, wenn man die Geräte austauscht und die Daten erneut auswerten würde. Zudem wäre für mehr Präzision eine mehrfache Wiederholung des Versuches notwendig, um Fehler mit Hilfe von Mittelwerten zu dezimieren.

Zwar haben die Kurven aus Abbildung 4 einen auf den ersten Blick ähnlichen Verlauf, jedoch ist der Abfall nach dem Peak verschieden. Der Abfall bei dem Stahlstab ist weitaus geringer und länger anhaltend als der des Messingstabs. Dies liegt der Ursache zu Grunde, dass die Wärmeleitfähigkeit von Stahl geringer ist und die Wärme länger braucht um nach außen zu strömen. Somit bleibt die Differenz bei Stahl nachhaltig größer als die von besser leitenden Materialien.

Bei der dynamischen Methode liegen relativ große Abweichungen von den Literaturwerten aus der Tabelle 1 vor:

$$\begin{array}{ll} \kappa_{\text{Messing, gemessen}} = (81 \pm 9) \frac{\text{W}}{\text{m K}} & \kappa_{\text{Messing, Literatur}} = 120 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\ \kappa_{\text{Aluminium, gemessen}} = (168 \pm 8) \frac{\text{W}}{\text{m K}} & \kappa_{\text{Aluminium, Literatur}} = 236 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\ \kappa_{\text{Edelstahl, gemessen}} = (6,0 \pm 1,7) \frac{\text{W}}{\text{m K}} & \kappa_{\text{Edelstahl, Literatur}} = 21 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \end{array}$$

Die relativen Abweichungen betragen

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \text{Abweichung}_{\text{Messing}} \hat{=} 32.5\% \\ &\Rightarrow \text{Abweichung}_{\text{Aluminium}} \hat{=} 28.9\% \\ &\Rightarrow \text{Abweichung}_{\text{Edelstahl}} \hat{=} 70.15\% . \end{aligned}$$

Auffällig ist, dass alle berechneten Wärmeleitfähigkeiten deutlich unter den Literaturwerten liegen. Eine genauere Messung wäre möglich, wenn man mehr Messpunkte auf einen Probestab plazierte. So könnte man die Wegabhängigkeit besser ermitteln. Durch das manuelle Umschalten des Peltier-Elements, kommt es zu Abweichungen in der Periode und Frequenz, was auch Einfluss auf die weitere Auswertung hat.

Messfehler entsprangen auch den nicht komplett isolierten Probestäben, so dass diese mit der Umgebung interagieren konnten und Wärme abgaben. Da die Aperaturen, welche wir benutzt haben, schon relativ alt waren, könnte auch dies zu einigen Störungen geführt haben.

Interessant ist auch der große Relativfehler von dem Edelstahlwert. Dieser könnte nur durch schlechte Isolierung oder durch einen bereits beschädigten Probestab geschehen sein. Außerdem ist er durch die relativ große Phasenverschiebung zu erklären.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1*. Springer Spektrum, 1994.
- [2] TU Dortmund. *V204: Wärmeleitung von Metallen*.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] 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/>.