

Versuch 204

Wärmeleitfähigkeit von Metallen

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 4. November 2014 Abgabe: 11. November 2014

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Ziel

Ziel des Versuches ist, die Wärmeleitung von den Metallen Messing, Edelstahl und Aluminium zu bestimmen. Dafür werden diese über ein Peltier-Element erhitzt und die Temperatur an zwei verschiedenen Orten gemessen.

2 Theorie

Ist in einem abgeschlossenen System ein Temperaturunterschied vorhanden findet Wärmetransport statt, um ein Temperaturgleichgewicht zu erreichen. Dies kann durch Konvektion, Wärmestrahlung oder Wärmeleitung geschehen. Bei Konvektion vermischen sich Gase oder Flüssigkeiten mit unterschiedlichen warmen Temperaturbereichen; durch Wärmestrahlung gibt ein Körper oder ein Fluid seine Wärme an die Umgebung ab.

Die in diesem Versuch betrachtete Wärmeleitung in festen Körpern geschieht über freie Elektronen und Phononen - quantisierte Schwingungen innerhalb der Gitterstruktur des Metalls. Dabei fließt eine *Wärmemenge*

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

durch den Festkörper mit Querschnittsfläche A von hoher zu niedriger Temperatur. Die *Wärmeleitfähigkeit* κ ist eine Materialkonstante. Mit (1) und der *Wärmestromdichte*, welche den Wärmestrom bezüglich der Querschnittsfläche A darstellt,

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

kann mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung die eindimensionale *Wärmeleitungsgleichung*

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

hergeleitet werden. Diese beschreibt die räumliche und zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung. Dabei ist

$$\sigma_T = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (4)$$

die *Temperaturleitfähigkeit*, welche die Schnelligkeit angibt, mit der der Temperaturausgleich passiert. Sie wird bestimmt durch die Dichte ρ und die *spezifische Wärmekapazität* c . Dabei beschreibt c die Energiemenge, die benötigt wird, um 1kg des untersuchten Materials um 1K zu erwärmen

Werden Körper durch periodischen Temperaturwechsel geheizt oder -kühlt breiten sich in seinem Innern Temperaturwellen der Form

$$T(x, t) = T_{\max} \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega\rho c}{2\kappa}}x\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega\rho c}{2\kappa}}x\right) \quad (5)$$

aus, was eine Lösung der Wärmeleitungsgleichung (3) für lange Probenstäbe darstellt. Diese setzt sich zusammen aus der Amplitude T_{\max} , der *Wellenzahl*

$$k = \frac{\omega \rho c}{2\kappa}, \quad (6)$$

einem Schwingterm und einer Exponentialfunktion mit negativem Exponenten, der für die Dämpfung verantwortlich ist.

Über die Dispersionsbeziehung, die *Phasengeschwindigkeit* v und die *Frequenz* ω miteinander verknüpft

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\kappa}}} = \sqrt{\frac{2\kappa\omega}{c\rho}} \quad (7)$$

erhält man mit (6) und den Beziehungen $\omega = \frac{2\pi}{T}$, der Winkelgeschwindigkeit, und $\phi = 2\pi\Delta t \frac{1}{T}$, der Phase, mit der Periodendauer \tilde{T} ein Gleichung für die Wärmeleitfähigkeit

$$\kappa = \frac{c\rho\Delta x^2}{2\Delta t \ln\left(\frac{A_n}{A_f}\right)}. \quad (8)$$

$\frac{A_n}{A_f}$ ist das Verhältnis der Wellenamplituden, welche an zwei Orten x_1 und x_2 im Abstand $\Delta x = x_2 - x_1$ gemessen werden und den Gangunterschied Δt aufweisen. Nun kann κ über den zeitlichen Verlauf der Temperatur bestimmt werden.

3 Durchführung

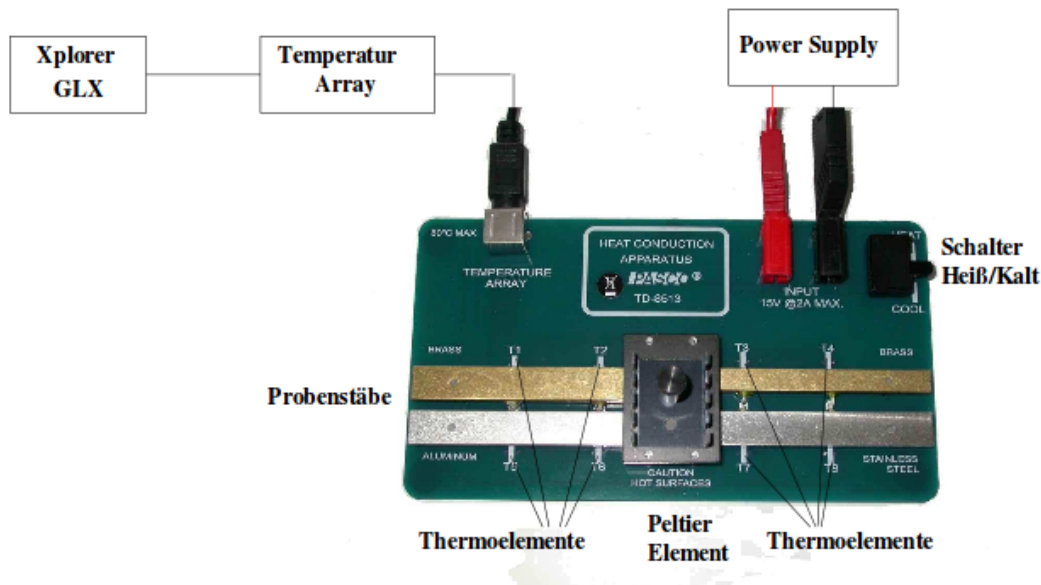


Abbildung 1: Aufbau der Platine

Um den zeitlichen Temperaturverlauf von vier Metallproben bestimmen zu können, wurden diese auf der in Abbildung 1 gezeigten Platine angebracht. Mit dem mittig aufgesetzten *Peltier-Element*, bestehend aus zwei Halbleitern unterschiedlicher Energieniveaus, können die Stäbe durch ausnutzen des Peltier-Effekts simultan geheizt oder gekühlt werden. Betrieben wird das Element durch eine angeschlossene *Spannungsquelle*. An jedem Stab befinden sich zwei *Thermoelemente*, bestehend aus zwei metallischen Leitern, die an den Orten x_1 und x_2 die Temperaturen der Stäbe aufzeichnen. Dabei ruft die Temperaturdifferenz - gegensätzlich zum Peltier-Element - einen Spannungsunterschied hervor, der gemessen wird. Diese Daten werden über ein *Temperature-Array* an den *GLX-Datenlogger* weitergegeben, dort aufgezeichnet und auf einen USB-Stick exportiert.

Vor Messbeginn werden sowohl die korrekte Verkabelung, als auch die Einstellungen des Datenloggers überprüft; alle acht Thermoelemente T_1 - T_8 sollten eine Temperatur aufzeichnen.

3.1 Statische Messung

Das Peltier-Element wird mit einer Spannung $U_P = 5V$ bei maximalem Strom I betrieben. Im Datenlogger wird eine Abtastrate von $\Delta t = 5s$ eingestellt. Nachdem die Isolierung auf die Probestäbe gelegt wurde, um einen Wärmeaustausch mit der Umgebung zu vermeiden, und der Schalter umgelegt ist beginnt das Peltier-Element zu heizen. Der Datenlogger zeichnet alle 5 Sekunden die Temperaturen $T_i, i = 1, \dots, 8$ der

Thermoelemente auf bis Thermoelement 7 eine Temperatur von $T_7 \approx 43^\circ\text{C}$ anzeigt. Anschließend werden die Isolierungen abgenommen, das Peltier-Element auf "cool" gestellt, die aufgenommenen Daten zur Auswertung auf einen USB-Stick übertragen und die für die Auswertung benötigten Diagramme des Temperaturverlaufs ausgedruckt.

3.2 Dynamische Messung

Nachdem die Stäbe wieder auf eine Temperatur von $T < 30^\circ\text{C}$ gekühlt wurden, werden die Isolierungen erneut aufgelegt und das Peltier-Element beginnt bei einer Spannung von $U_P = 8\text{V}$ zu heizen. Die Thermoelemente zeichnen nun mit $\Delta t = 2\text{s}$ den Temperaturverlauf auf.

Nach $\tilde{t} = 40\text{s}$ wird das Peltier-Element umgeschaltet und die Stäbe für weitere 40 s gekühlt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis zehn Perioden von $T = 80\text{s}$ Dauer aufgezeichnet wurden. Anschließend werden die Stäbe analog zur statischen Messung wieder heruntergekühlt. Schließlich wird die dynamische Methode noch einmal wiederholt, wobei die Periodendauer nun $T = 200\text{s}$ beträgt. Erneut werden die Messdaten auf einen USB-Stick übertragen und einige Temperaturverläufe graphisch dargestellt und ausgedruckt.

4 Auswertung

4.1 Statische Messung

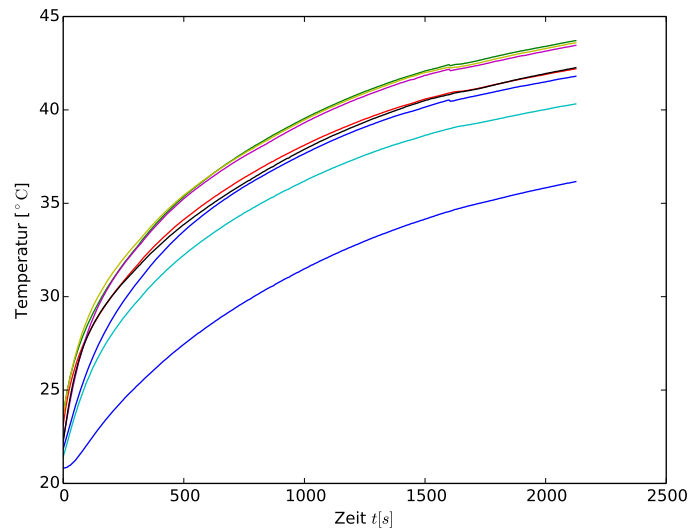


Abbildung 2: Alle gemessenen Temperaturen

Alle Temperaturverläufe werden in Diagramm ?? gleichzeitig aufgetragen. Es zeigt, dass der allgemeine Verlauf der Temperatur unabhängig von dem Material und der Entfernung des Messpunktes ist. Die Temperaturkurven zeigen jeweils beschränktes Wachstum.

Im Diagramm ?? wird der Temperaturverlauf bei den entfernten Messpunkten T1, T4, T5, T8 (vgl. ??) gezeigt. Die Kurve von Aluminium hat zu Beginn des Experiments den stärksten Anstieg und liegt über der der anderen Metallstäbe. Beide Kurven der Messingstäbe haben vergleichbare Steigungen; die Kurve des größeren Messingstabes liegt dabei über der des kleineren Stabes und hat am Endpunkt der Messung zu dieser eine Temperaturdifferenz von etwa 1°C. Die Kurve von Edelstahl ist deutlich von den Kurven der anderen Metallstäbe entfernt und weist die geringste Steigung auf. Zum Endpunkt der Messung liegt zwischen den Messpunkten von Aluminium und Edelstahl eine maximale Temperaturdifferenz von etwa 7°C vor.

Zirka 700 Sekunden nach Beginn des Erwärmens liegen an den entfernten Messpunkten die Temperaturen nach Tabelle ?? vor. Die höchste Temperatur hat der Aluminiumstab,

Edelstahl	Messing,dünn	Messing	Aluminium
29°C	34°C	35.4°C	37°C

Tabelle 1: Temperaturen an entfernten Messpunkten bei $t = 700\text{s}$

die geringste Temperatur hat der Edelstahlstab.

Mit

$$dQ = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x} dt \quad (9)$$

kann der Wärmestrom $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ innerhalb der Stäbe bestimmt werden. Hierzu sind κ in 9 die Literaturwerte der Wärmeleitfähigkeit und A die Querschnittsfläche (vgl. hierzu [V204]) des jeweiligen Stabes; $\frac{\partial T}{\partial x}$ ist der Temperaturgradient innerhalb des Stabes und wird hier mit $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ und Δx genähert. Es ergibt sich

Im Diagramm ?? ist die Temperaturdifferenz innerhalb eines Stabes für den Edelstahl-

Messing				
Nach 500s	Nach 1000s	Nach 1500s	Nach 2000s	Nach 50s
-0.3552W	-0.36288W	-0.37248W	-0.3648W	-0.49728W

Messing, dünn				
Nach 500s	Nach 1000s	Nach 1500s	Nach 2000s	Nach 50s
-0.2128W	-0.21504W	-0.21728W	-0.21056W	-0.28672W

Aluminium				
Nach 500s	Nach 1000s	Nach 1500s	Nach 2000s	Nach 50s
-0.06768W	-0.0564W	-0.0564W	-0.04888W	-0.41736W

Edelstahl				
Nach 500s	Nach 1000s	Nach 1500s	Nach 2000s	Nach 50s
-0.15384W	-0.1536W	-0.1524W	-0.14688W	-0.1116W

und für den Messingstab aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Differenzkurve für Edelstahl näherungsweise ein beschränktes Wachstum beschreibt und kurz nach Beginn der Erwärmung einen Grenzwert erreicht, der bei etwa 6.25°C liegt. Die Differenzkurve des Messingstabes steigt zu Beginn der Messung an und erreicht kurz nach Beginn mit 2.6°C ihr globales Maximum. Nach dem Maximum nimmt die Differenz exponentiell ab und erreicht einen Grenzwert von etwa 2°C. Der Vergleich der Kurven zeigt, dass der Messingstab gegenüber dem Edelstahlstab den Grenzwert der Temperaturdifferenz schneller erreicht.

4.2 Dynamische Messung mit 80 Sekunden-Periode

Die Diagramme ?? zeigen bei periodischer Anregung einer Temperaturwelle mit Periodendauer von 80 Sekunden den Temperaturverlauf an den jeweiligen Enden. Zusätzlich zum Verlauf sind die Extrema eingezeichnet und die Amplitudenfunktion der Extrema

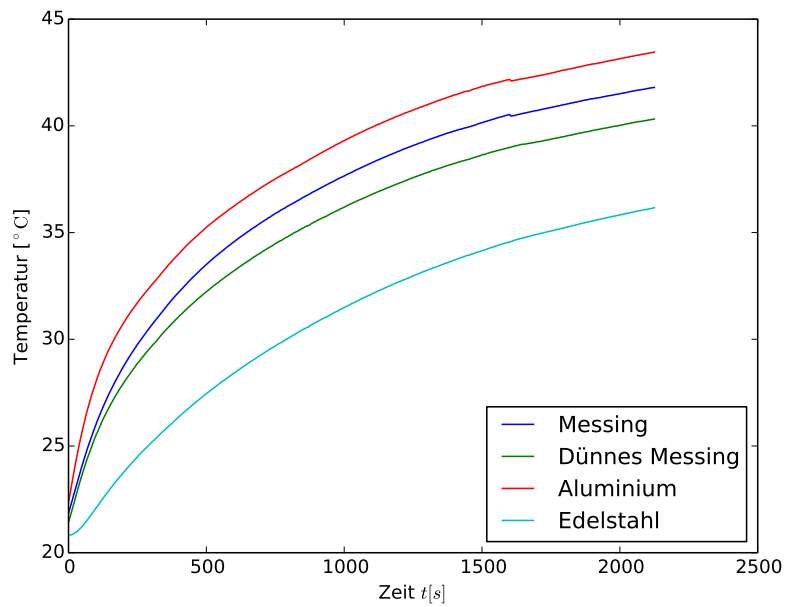


Abbildung 3: Verlauf der Temperaturen an den entfernten Messpunkten

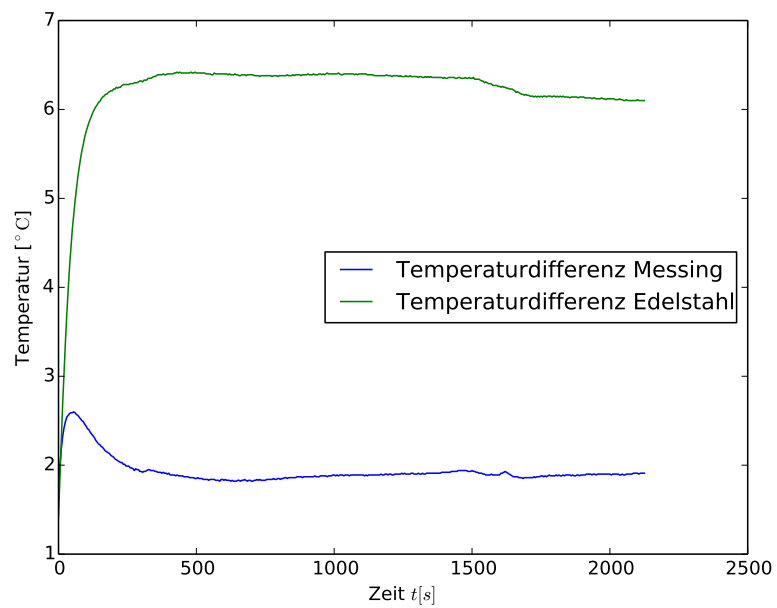


Abbildung 4: Temperaturdifferenz der Messpunkte von Messing und Edelstahl

ingezeichnet. Analoges Vorgehen mit den Werten für den Aluminiumstab ergeben die Diagramme ?? und ?. Von der Auswertung wurden wegen offensichtlicher Abweichung von der Erwartung die Werte ab dem neunten lokalen Maximum.

Normiert man den Temperaturverlauf mit der eingezeichneten Amplitudenfunktionen, so ergeben sich normierte Schwingungen in Diagramm ?? und ?. In diesem Diagramm ist erkennbar, dass sich für eine gleichmäßige Schwingung jeweils die oberen Amplitudenfunktionen zur Normierung eignen.

4.3 Dynamische Messung mit 200 Sekunden-Periode

Die Diagramme ?? zeigen bei periodischer Anregung einer Temperaturwelle mit Periodendauer von 200 Sekunden den Temperaturverlauf an den jeweiligen Enden. Zusätzlich zum Verlauf sind die Extrema eingezeichnet und die Amplitudenfunktion der Extrema eingezeichnet. Analoges Vorgehen mit den Werten für den Aluminiumstab und den Edelstahlstab ergeben die Diagramme ?? und ?, ?? und ?.

Normiert man den Temperaturverlauf mit der eingezeichneten Amplitudenfunktionen, so ergeben sich normierte Schwingungen in Diagramm ??, ?? und??. Man erkennt anhand dieser Diagramme, dass sich jeweils die oberen Amplitudenfunktionen dazu eignen, den Temperaturverlauf eine gleichmäßige Grundschiwingung zu normieren.

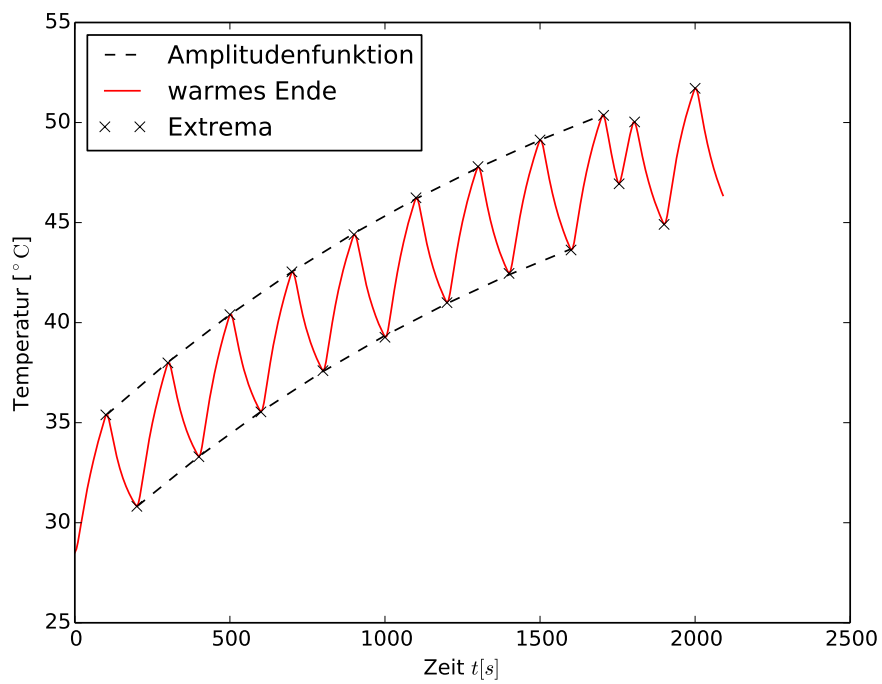
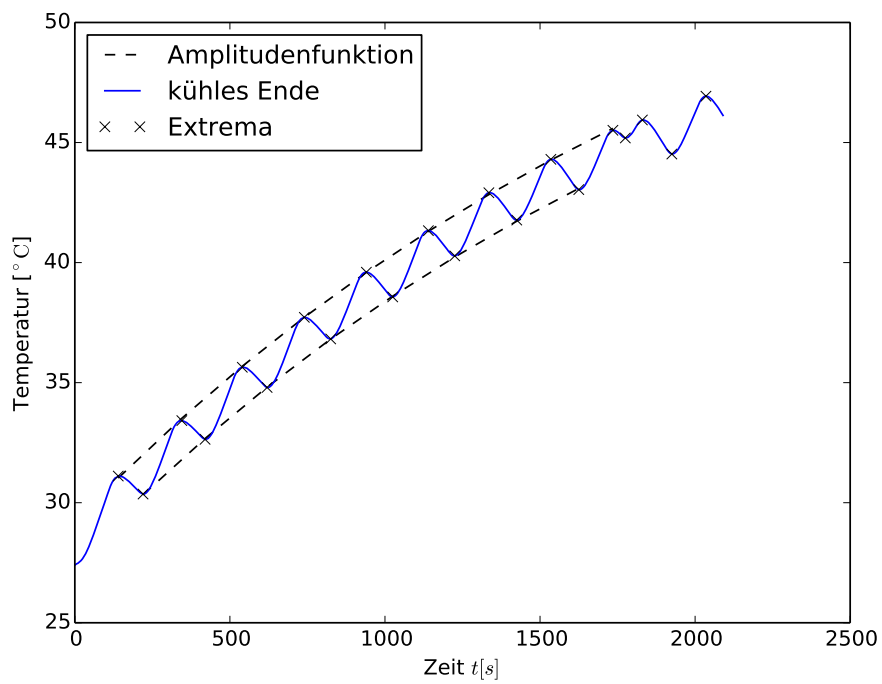


Abbildung 5: Periodische Messung bei Messing mit 80 Sekunden-Periode

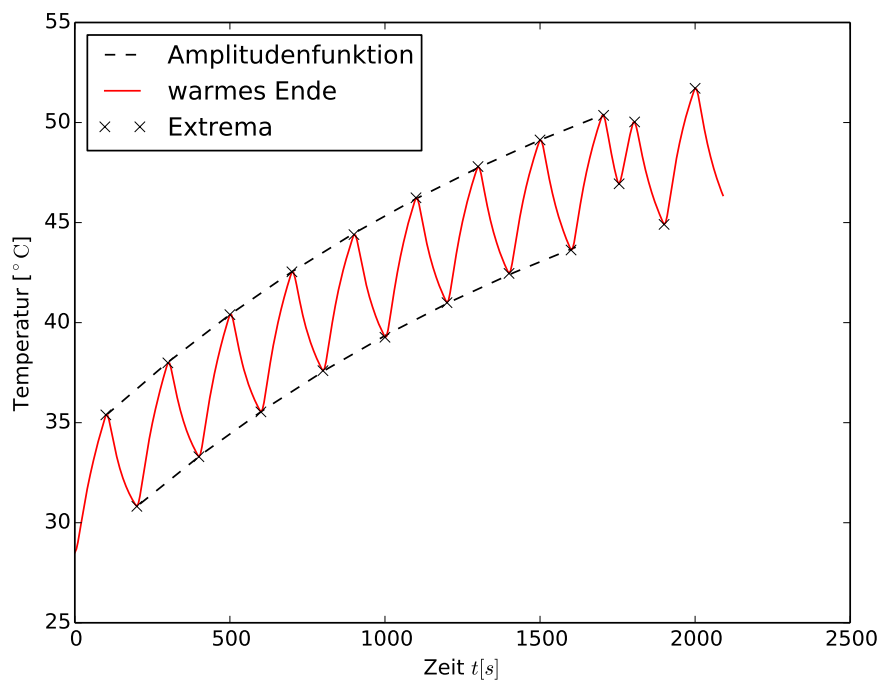
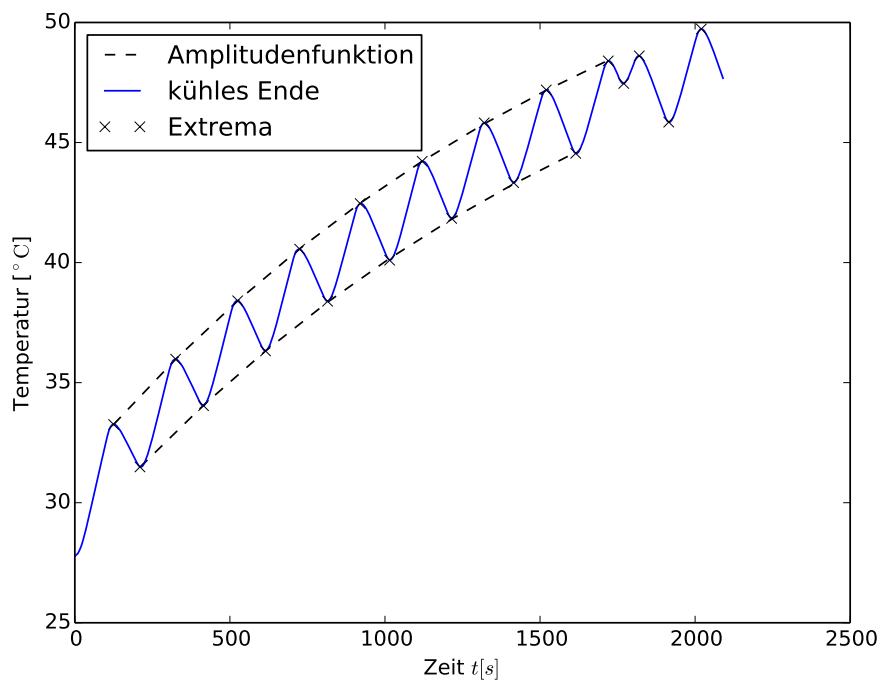


Abbildung 6: Periodische Messung bei Aluminium mit 80 Sekunden-Periode

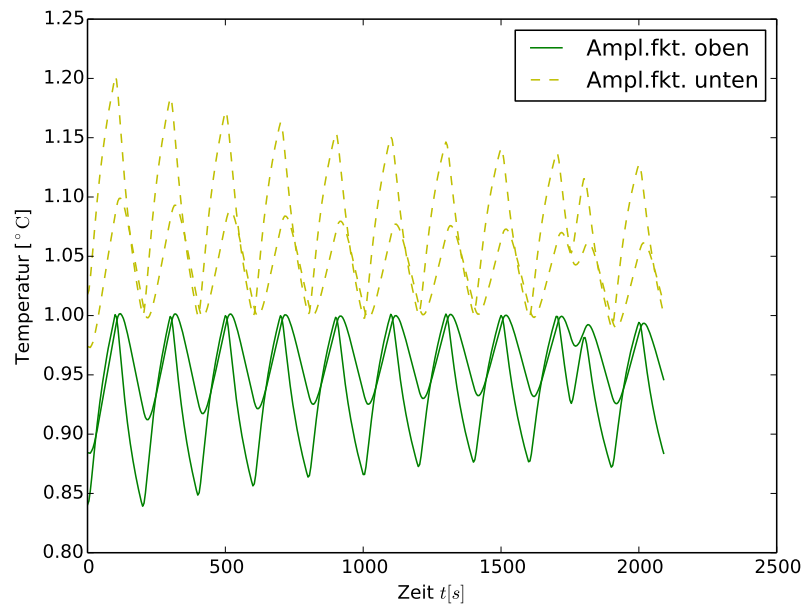


Abbildung 7: Normierung von Diagramm ?? auf Grundschiwingung

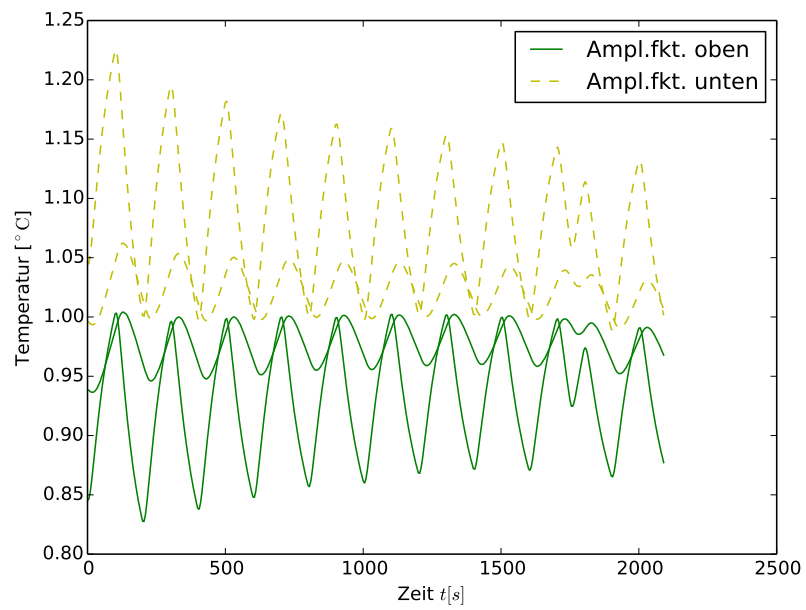


Abbildung 8: Normierung von Diagramm ?? auf Grundschiwingung

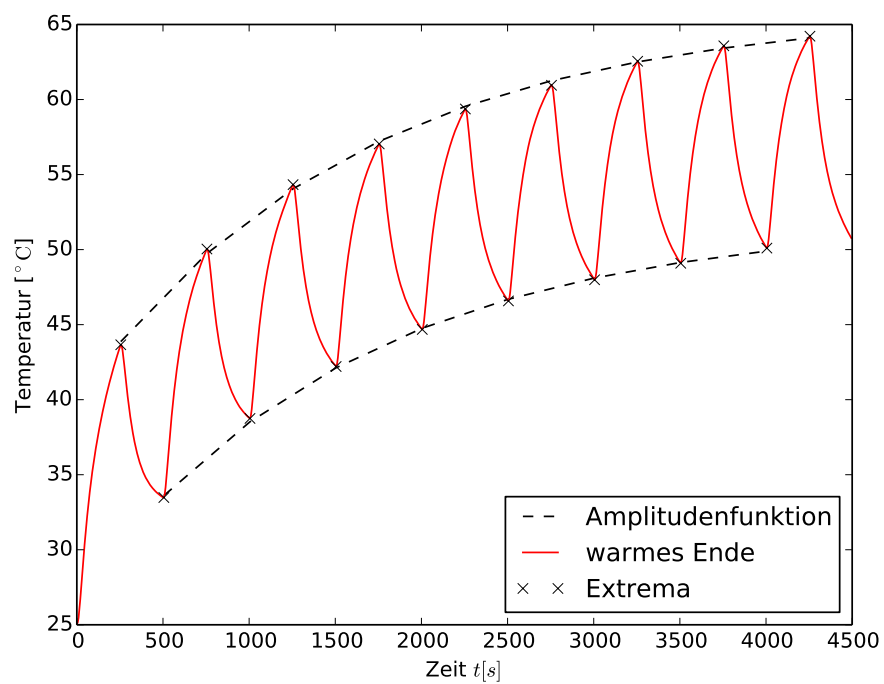
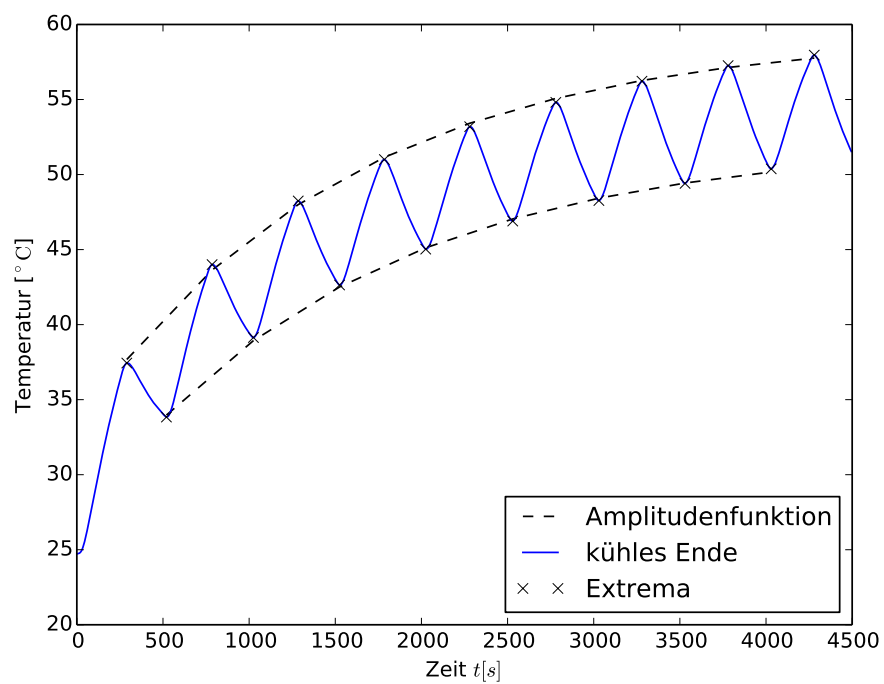


Abbildung 9: Periodische Messung bei Messing mit 200 Sekunden-Periode

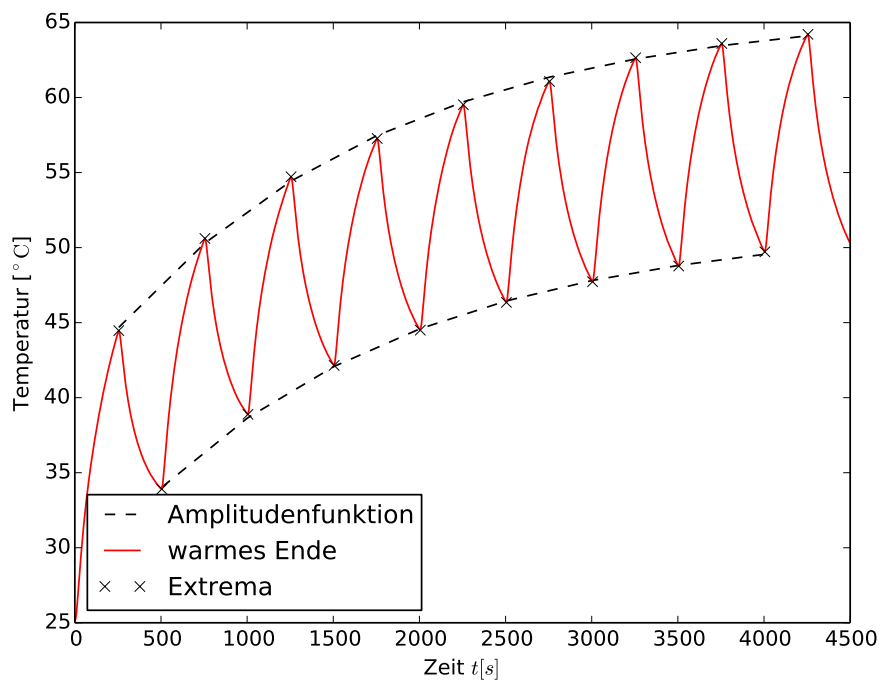
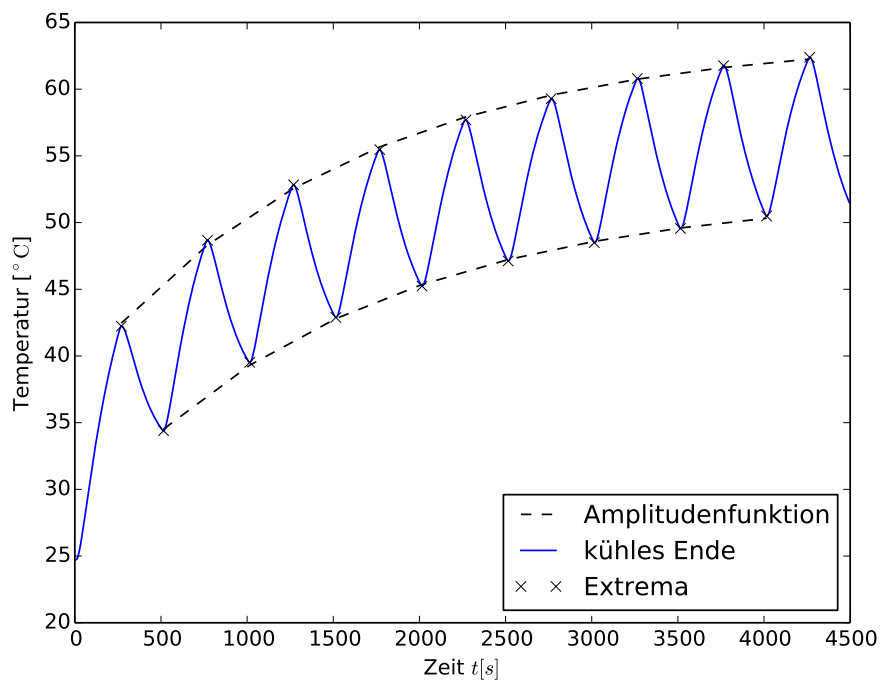


Abbildung 10: Periodische Messung bei Aluminium mit 200 Sekunden-Periode

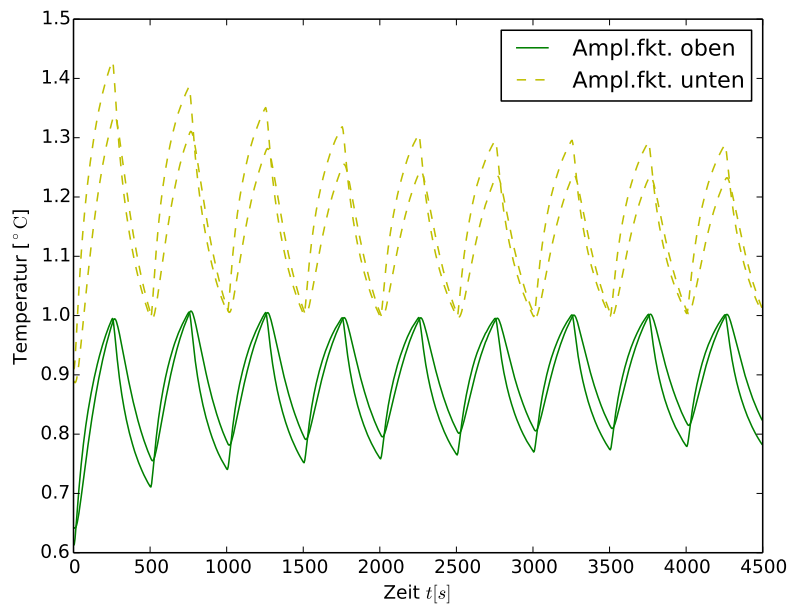


Abbildung 11: Normierung von Diagramm ?? auf Grundschiwingung

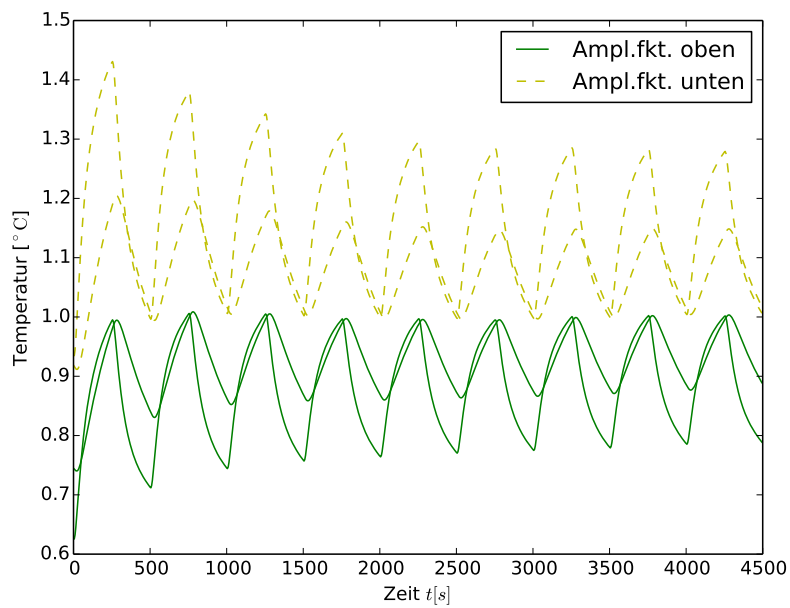


Abbildung 12: Normierung von Diagramm ?? auf Grundschiwingung

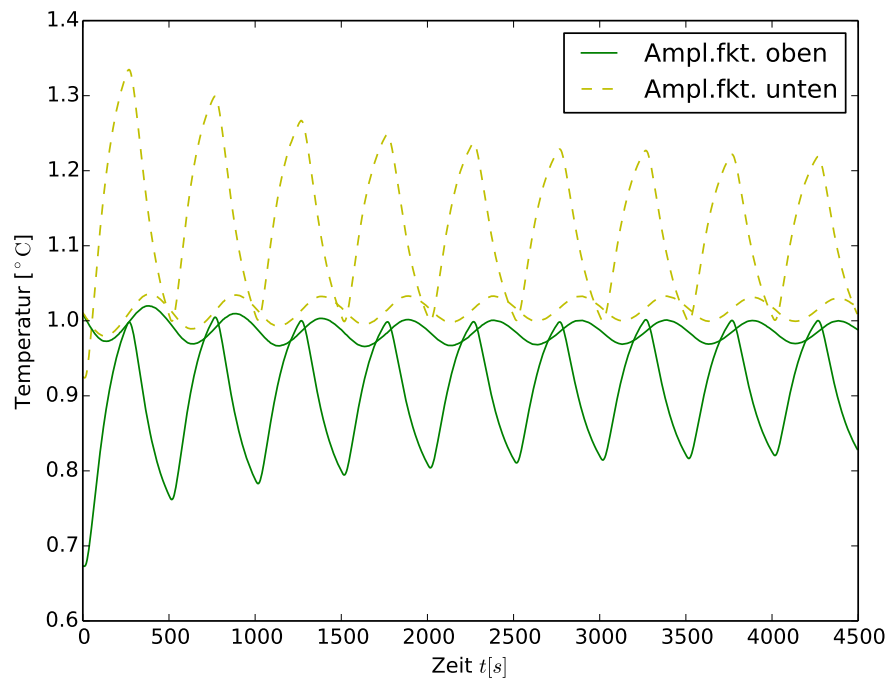
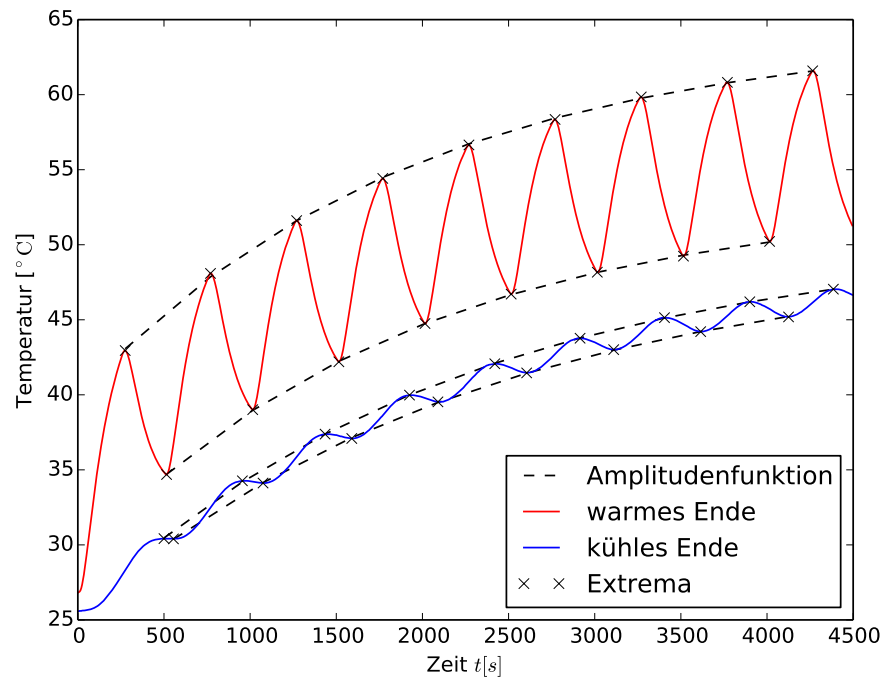


Abbildung 13: Periodische Messung bei Edelstahl mit 200 Sekunden-Periode sowie Normierung auf Grundschwingung

5 Diskussion

Diskussionsmaterial

6 Daten

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/90/1>. Version 1.3.1.
- [2] Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. 2001. URL: <http://www.scipy.org/>. Version 0.14.0.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>. Version 2.4.5.
- [4] Travis E. Oliphant. „Python for Scientific Computing“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/10/1>. Version 1.8.1.
- [5] The GIMP Team. *GIMP: GNU Image Manipulation Program*. URL: <http://www.gimp.org/>. Version 2.8.10.

Die verwendeten Plots wurden mit *matplotlib*[1] und die Grafiken mit *GIMP*[5] erstellt sowie die Berechnungen mit *Python-Python-Numpy*, [4], *Python-Scipy*[2] und *Python-uncertainties*[3] durchgeführt.