



**Wärmeübertragung und Stofftransport
VUB4**

STATIONÄRE WÄRMELEITUNG

**Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ eines Metallzylinders
durch Messungen der stationären Wärmeverteilung**

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	2
2 Versuchsaufbau und Versuchsmethodik.....	2
3 Versuchsdurchführung.....	5
4 Versuchsergebnisse.....	6
4.1 Messung 1.....	6
4.2 Messung 2.....	7
4.3 Messung 3.....	8
4.4 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur.....	9
5 Fazit.....	9

1 Einführung

Eine außerordentlich wichtige Stoffgröße in der Thermischen Verfahrenstechnik ist die Wärmeleitfähigkeit. Sie bezeichnet das Vermögen eines Körpers bzw. Stoffes thermische Energie, also eine Wärmedifferenz, durch sich zu leiten. Somit stellt sie die Geschwindigkeit dar, mit der ein erwärmtes Teilchen das ihm nächste an seiner zugenommenen Molekularbewegung teilhaben lässt.

Wärme fließt per Definition immer von Gegenden höherer Temperatur in Bereiche niedrigerer. In einer ersten Näherung kann der Wärmestrom als proportional zu der an beiden Punkten herrschenden Temperaturdifferenz ΔT angesehen werden.

Geht man nun davon aus, dass das System sich in einem stabilen Zustand befindet, d.h. sich an einem beliebigen, festen Punkt im System sich die Temperatur über der Zeit nicht mehr ändert, hat man den Zustand der stationären Wärmeleitung erreicht.

2 Versuchsaufbau und Versuchsmethodik

Ziel dieses Versuches soll die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Probenzylinders mit geometrisch definierten Abmaßen sein. Dazu wird der Zylinder auf seiner Mantelfläche von einem gut wärmedämmenden Kunststoff umschlossen. Die freiliegenden ebenen Flächen werden mit einer Wärmeleitpaste aus Silikonöl und Aluminiumoxid versehen, um den Wärmeübergang zu verbessern, da eventuelle Lufteinschlüsse eine stark dämmende Wirkung aufweisen würden. Dieser Zylinder wird nun in die Versuchsanordnung, schematisch in **Abb. 1** dargestellt, eingespannt.

Auf der Unterseite befindet sich dabei das Kühlelement mit drei Temperatursensoren. Die Wärmeabfuhr wird durch einen Wasserstrom erreicht, dessen Temperatur sowohl beim Einlauf (T_{ein}) und Auslauf (T_{aus}) gemessen wird. Der Massenstrom des Wasser wird mithilfe eines Durchflussmessgerätes erfasst und gegebenenfalls durch den Bypass des zwischengeschalteten Durchlaufklimatisiergerätes nachgeregelt.

Die Oberseite stellt das elektrisch betriebene Heizelement dar. Es wird durch einen regelbaren Transformator gemäß der Gesetzmäßigkeit (1) durch Verstellen von Spannung und Stromstärke auf eine bestimmte Ausgangsleistung eingestellt.

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

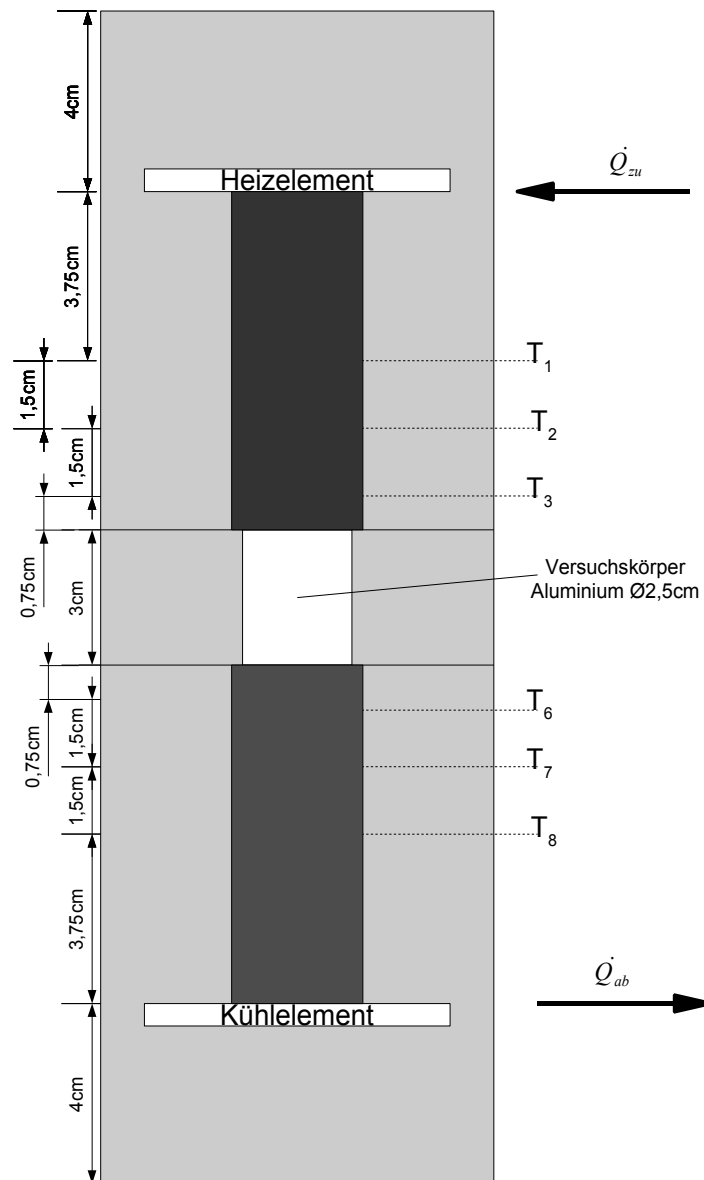


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Versuchseinrichtung

Da mit jeder Temperaturmessung direkt an der Oberfläche des Versuchskörpers der Wärmeübergang und damit auch das Ergebnis gravierend beeinflusst würde, wird die Temperatur sowohl auf der warmen als auch auf der kalten Seite an drei Stellen gemessen. Geht man dann davon aus, dass das Material zwischen Heizelement bzw. Kühlelement und Versuchskörper in sich homogen ist, so erhält man daraus einen linearen Temperaturabfall, durch welchen man auf die Temperatur an den Flächen des Körpers schließen kann.

Vereinfacht erhalten wird damit einen ebenen Körper der Fläche A und der Dicke δ ,

an dessen gegenüberliegenden Seiten die Temperaturen θ_1 und θ_2 herrschen. Für den Wärmestrom, der einen solchen Körper passiert, gilt damit **(2)**.

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta} \quad (2)$$

Da der Wärmeeintrag \dot{Q} durch die elektrische Leistung P von außen bestimmt werden kann und die Fläche mit dem Radius des Versuchszylinders bestimmt werden kann, kann **(2)** nach der Wärmeleitfähigkeit λ aufgelöst werden. Aus der sich ergebenden Formel **(4)** ist unter der Voraussetzung, dass beiden Endtemperaturen korrekt bestimmt wurden, die Wärmeleitfähigkeit direkt bestimmbar.

$$\lambda = \frac{4 \cdot \delta \cdot \dot{Q}}{\pi d^2 (\theta_1 - \theta_2)} \quad (3)$$

Die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Stempel und Probe kann durch Extrapolation des Verlaufs bestimmt werden. Die Temperatursensoren liegen auf den jeweiligen Seiten immer 1,5 cm auseinander. Beispielhaft für den oberen Teil des Stempels kann damit die Temperatur θ_4 zwischen Stempel und Probe nach **(4)** gemittelt werden.

$$T_4 = \frac{1}{3} \cdot \left(\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{x_1 - x_2} \cdot (x_4 - x_1) + \theta_1 \right) + \left(\frac{\theta_2 - \theta_3}{x_2 - x_3} \cdot (x_4 - x_2) + \theta_2 \right) + \left(\frac{\theta_1 - \theta_3}{x_1 - x_3} \cdot (x_4 - x_1) + \theta_1 \right) \right) \quad (4)$$

Um eine Aussage über die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu treffen, wird der stationäre Zustand für 3 unterschiedliche Werte in θ_1 eingestellt.

Um einen besseren Nachweis über den tatsächlich stationären Zustand zu erhalten werden die Messwerte bei Annäherung an den stationären Zustand von allen Messfühlern mitprotokolliert. Unterscheiden sich alle Werte in zwei aufeinander folgenden Messungen, die mindestens eine Minute auseinander liegen um weniger als 0,2K, so wird von einem stationären Zustand ausgegangen. Nicht berücksichtigt bleiben dabei die Temperaturen des Kühlwasserein- bzw. auslaufs, da diese von der aktuellen Kühlleistung des Temperieraggregats abhängen.

3 Versuchsdurchführung

Die erste Temperatur, auf welche sich der oberste Temperatursensor nahe des Heizelements (T_1) einpendeln sollte, wurde mit 30°C relativ nahe an der Umgebungstemperatur (18°C) gewählt. Es bedurfte dennoch 48 Minuten, bis sich eine stabile Temperaturverteilung eingestellt hat. Die Heizleistung wurde dafür durch Regulierung der Versorgungsspannung und -stroms auf 5,55 W gesetzt.

Bereits im Verlauf dieser ersten Messreihe wird deutlich, dass ein gewisses Fehlerpotential von der Wärmetauschervorrichtung und seiner Bypasssteuerung ausgeht. Zum einen muss der Volumenstrom immer wieder nachgeregelt werden, zum anderen arbeitet das Aggregat nicht durchgehend, wodurch der Temperaturverlauf von T_{ein} leicht pulsiert, anstatt einen konstanten Wert beizubehalten.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Messung 1

Nach 48 min wird bei der ersten Messung von einer stationären Temperaturverteilung ausgegangen, die Werte sind dafür – wie auch die Ergebnisse der anderen Messungen - in **Anhang A** angegeben. Aufgetragen über dem Abstand ergibt sich **Diagramm 1**. Darin ist bereits ersichtlich, dass die drei Messfühler auf den beiden Seiten annähernd eine Gerade ergeben. Daraus folgt, dass das Material der Stempel in etwa die gleiche Wärmeleitfähigkeit wie der Prüfkörper besitzen muss. Nach einer rechnerischen Extrapolation nach (4) ergibt sie als obere Grenztemperatur $26,96^{\circ}\text{C}$, am unteren Ende hat die Probe $22,88^{\circ}\text{C}$. Als Wärmeleitfähigkeit ergibt sich damit nach (3) damit $83,13 \text{ W}/(\text{mK})$.

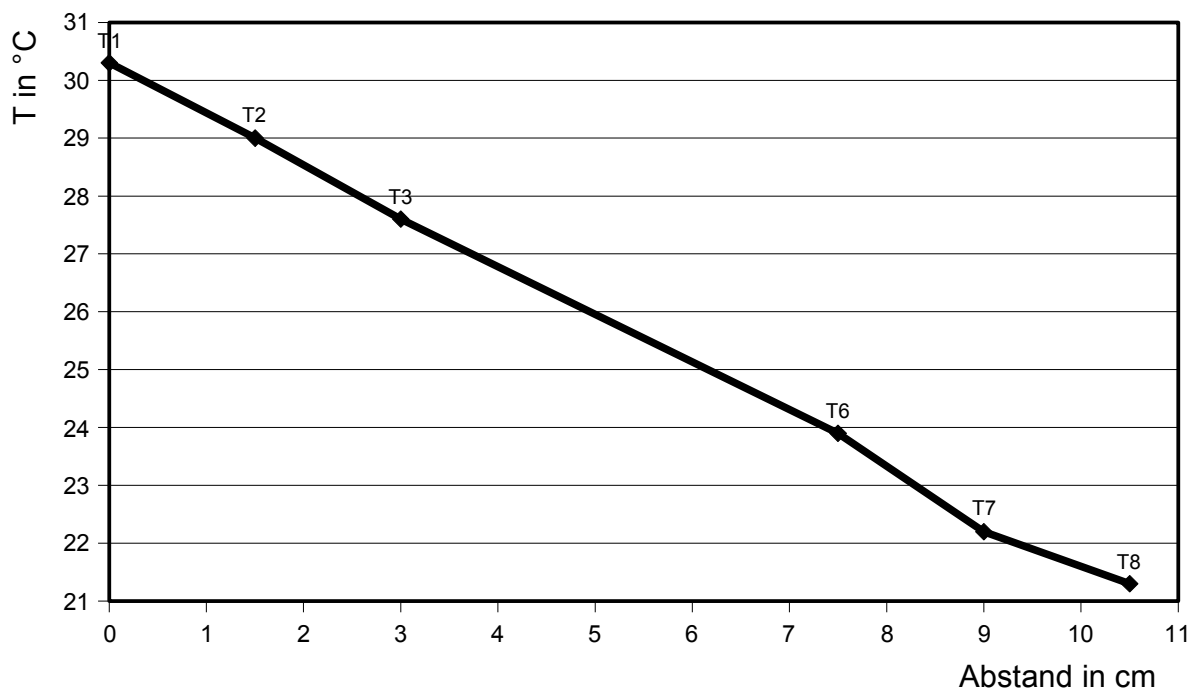


Diagramm 1: Temperaturverlauf für die erste Messung über den Abstand zum ersten Temperatursensor

4.2 Messung 2

Die zweite Temperatur, auf welche sich der oberste Temperatursensor nahe des Heizelements (T_1) einpendeln sollte, wurde mit 50°C . Es dauerte weitere 40 Minuten, bis sich wieder eine stabile Temperaturverteilung eingestellt hat. Die Heizleistung wurde dafür durch Regulierung der Versorgungsspannung und -stroms auf $16,64\text{ W}$ gesetzt.

Nach einer rechnerischen Extrapolation nach (4) ergibt sie als obere Grenztemperatur $43,83^\circ\text{C}$, am unteren Ende hat die Probe $36,24^\circ\text{C}$. Als Wärmeleitfähigkeit ergibt sich damit nach (3) $133,99\text{ W/(mK)}$. Der Temperaturverlauf für diese zweite Messung ist in **Diagramm 2** dargestellt.

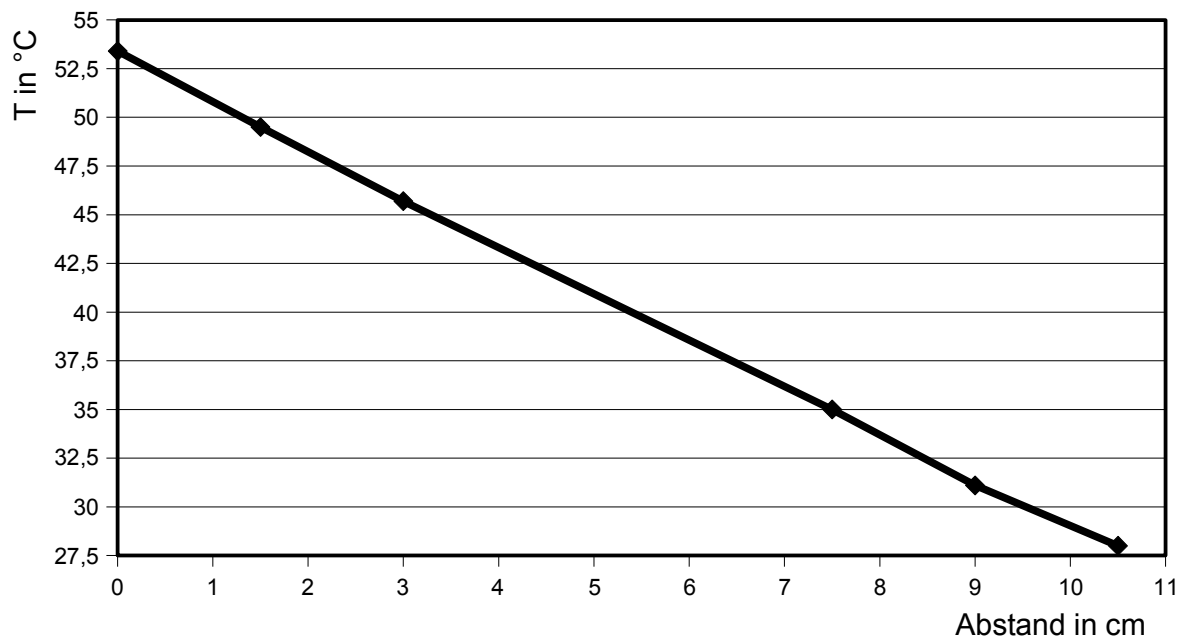


Diagramm 2: Temperaturverlauf für die zweite Messung über den Abstand zum ersten Temperatursensor

4.3 Messung 3

In der dritten Messung wurde der oberste Temperatursensor auf eine Temperatur von ca. 70°C eingestellt. Nach ca. 45 min war der stationäre Zustand mit einer Heizleistung von 25,76 W erreicht.

Nach einer rechnerischen Extrapolation nach (4) ergibt sie als obere Grenztemperatur 58,6°C, am unteren Ende hat die Probe 47,23°C. Als Wärmeleitfähigkeit ergibt sich damit nach (3) 138,46 W/(mK). Zu erwähnen wären die relativ stark schwankenden Temperaturen am Kühlwasserein- und auslauf, da das Aggregat zur Abfuhr der Wärme immer wieder sich an- und ausschaltete.

Graphisch aufgetragen stellen sich die die Werte für die Temperaturverteilung in **Diagramm 3** dar.

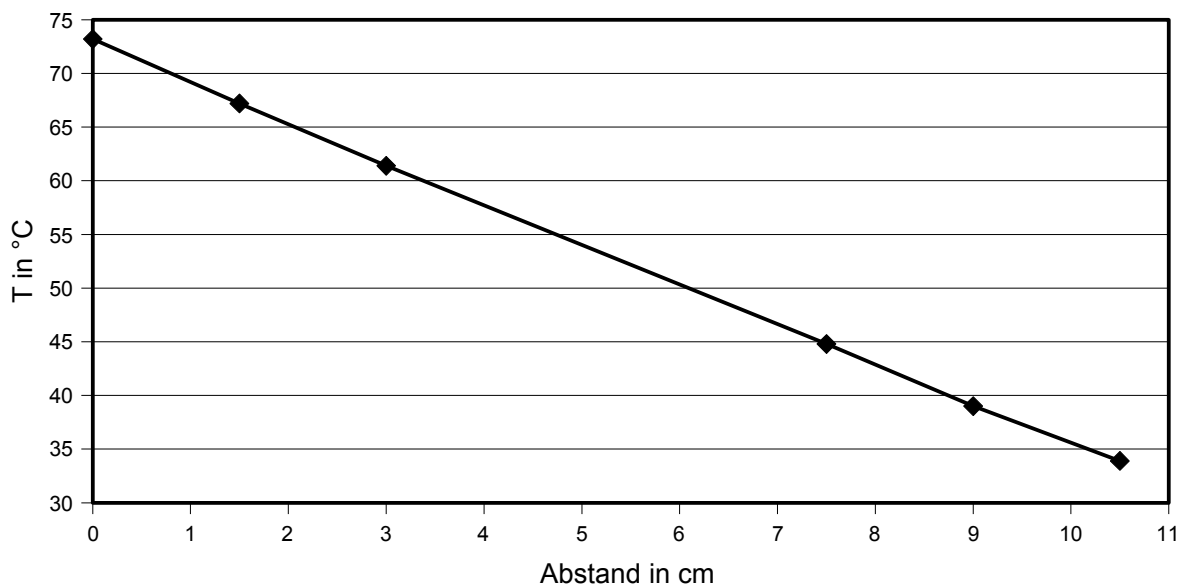


Diagramm 3: Temperaturverlauf für die dritte Messung über den Abstand zum ersten Temperatursensor

4.4 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur

Nimmt man den Mittelwert der oberen und unteren Grenztemperaturen am Stempel für die drei Versuchsdurchführungen und ordnet ihnen die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten zu, so ergibt sich der in **Tabelle 1** aufgeführte Zusammenhang, graphisch dargestellt in **Diagramm 4**.

Mittlere Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)
24,92	83,13
40,04	133,99
59,90	138,46

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit bei gemittelten Temperaturen

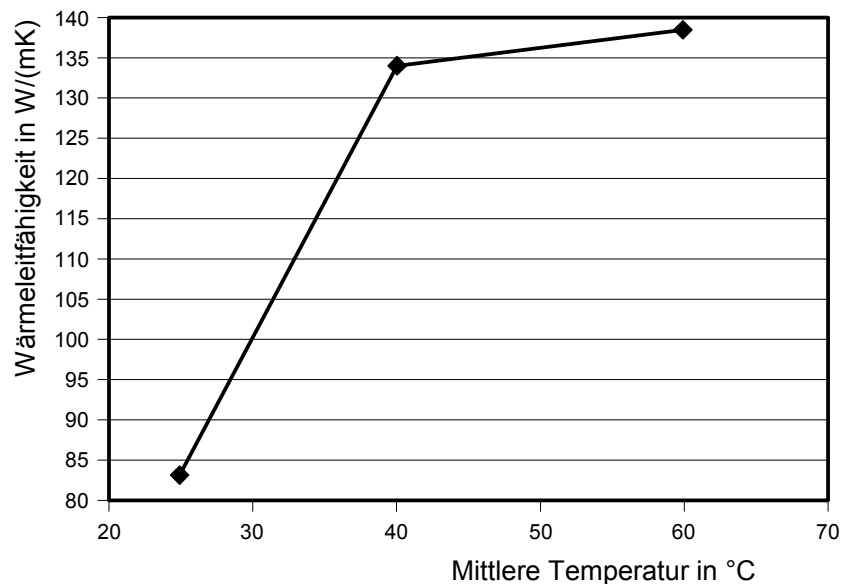


Diagramm 4: Zusammenhang Wärmeleitfähigkeit - Temperatur

5 Fazit

Die sich ergebenden Werte der Wärmeleitfähigkeit, insbesondere der erste, für den metallischen Probenzylinder weisen am ehesten auf einen ferritischen Stahl hin. Dagegen spricht allerdings, dass bei dem Probenzylinder die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur steigt. Dieses Verhalten weist eher auf einen austenitischen Stahl hin, dessen Werte liegen allerdings nur etwa bei der Hälfte.

Einen großen Teil zu den Ungenauigkeiten hat das Aggregat beigetragen, das die Kühlwassertemperatur konstant halten sollte. Dort waren aber immer wieder starke Schwankungen zu verzeichnen.

Anhang A

Versuchsergebnisse

30°C	Abstand	Temperatur
T1	0,00	30,30
T2	1,50	29,00
T3	3,00	27,60
AluAnfang	3,75	
AluEnde	6,75	
T6	7,50	23,90
T7	9,00	22,20
T8	10,50	21,30

50°C	Abstand	Temperatur
T1	0,00	53,40
T2	1,50	49,50
T3	3,00	45,70
AluAnfang	3,75	
AluEnde	6,75	
T6	7,50	35,00
T7	9,00	31,10
T8	10,50	28,00

70°C	Abstand	Temperatur
T1	0,00	73,20
T2	1,50	67,20
T3	3,00	61,40
AluAnfang	3,75	
AluEnde	6,75	
T6	7,50	44,80
T7	9,00	39,00
T8	10,50	33,90