

Ignaz-Günther-Gymnasium Rosenheim

Oberstufenjahrgang 2015/16

SEMINARARBEIT

aus dem Fach

Physik

Thema:

Wärmeleitfähigkeit und geometrische Kohäsion in asphärischen Granulaten

Kurztitel¹:

.....

Verfasser der Seminararbeit: Katharina Staudt
Kursbezeichnung: Faszination Sand: Die Physik granularer
Materialien
Kursleiter: StR Dr Thomas Grillenbeck
Abgabetermin: 10. November 2015
Abgegeben am

Mündliche Prüfung abgelegt am

Erzielte Punkte in der schriftlichen Arbeit:

Erzielte Punkte in der Präsentation:

Gesamtpunktzahl (3-fach schriftlich + mündlich = 4-fache Wertung):

Doppelte Wertung (= 4-fache Wertung geteilt durch 2, gerundet)²:

Aus der einfachen Wertung (= 4-fache Wertung geteilt durch 4, gerundet):

ergibt sich für die Gesamtleistung die Note, in Worten:

Unterschrift des Kursleiters:

¹ Falls das Thema mehr als 3 Zeilen zu je 44 Zeichen lang ist, wird hier ein Kurztitel für das Abiturzeugnis angegeben.

² Die doppelte Wertung (maximal 30 Punkte) geht in die Gesamtqualifikation ein.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	4
2. Grundlagen und physikalische Größen	7
2.1. Wärmemenge.....	7
2.2. Wärmeleitung.....	8
3. Material und Methode.....	9
3.1. Granulares Material.....	9
3.2. Probekörper.....	9
3.3. Herstellung verschiedener Materialpackungen.....	10
3.3.1. Befüllmethode „Rieseln“.....	11
3.3.2. Befüllmethode „Zupfen“.....	11
3.3.3. Befüllmethode „Klopfen“.....	12
3.4. Messung der Temperaturdifferenz ΔT	12
3.5. Versuchsaufbau.....	14
3.6. Durchführung des Versuches.....	15
3.6.1. Vorbereitung.....	15
3.6.2. Herstellung einer konstanten Temperaturdifferenz.....	16
3.6.3. Bestimmung von ΔQ	16
3.7. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit.....	17

4. Ergebnisse.....	18
5. Diskussion.....	20
5.1. Hypothesen.....	20
5.2. Streuung der Messwerte.....	20
5.2.1. Messungenauigkeit.....	21
5.2.2. Geometrische Kohäsion.....	21
5.3. Ausblick.....	22
5.3.1. Bestimmung der Messungenauigkeit.....	22
5.3.2. Bestimmung der geometrischen Kohäsion.....	22
6. Zusammenfassung.....	23
7. Danksagung.....	24
8. Quellenverzeichnis.....	25
9. Anhang: Temperatur - Zeit - Diagramme der zwölf Messreihen...	27
10. Erklärung.....	33

1. Einleitung

Als granulares Material (oder Granulat) bezeichnet man eine Ansammlung separater makroskopischer Teilchen¹. Die meisten Granulate sind leicht schüttbar, im Sonderfall von kugelförmigen Teilchen (sphärische Teilchen) fließen sie sogar fast wie Wasser.

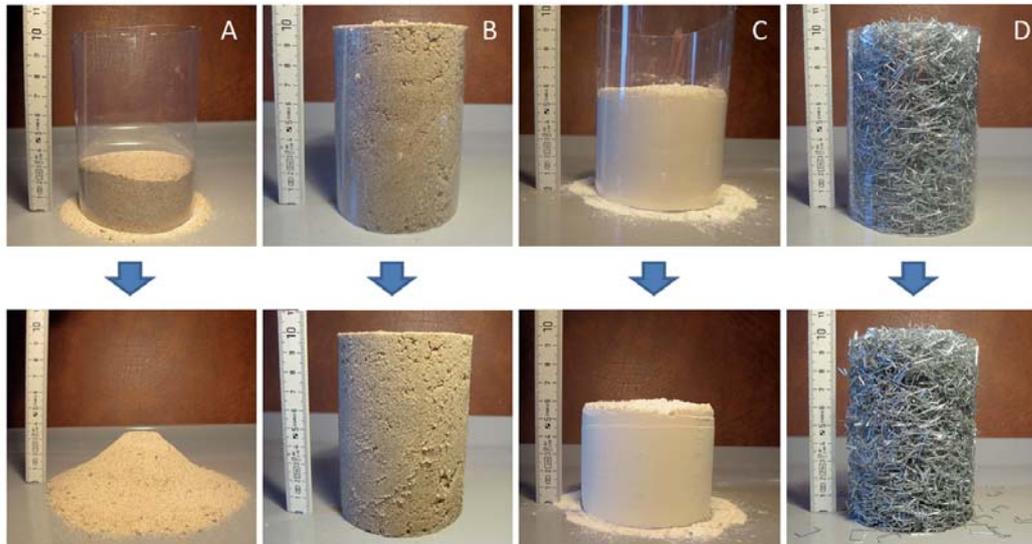


Abb.1 Kohäsive Eigenschaften granularer Materialien

In besonderen Fällen, in denen die Partikel starke Anziehungskräfte aufeinander ausüben (= Kohäsion)², können Granulate jedoch einmal angenommene dreidimensionale Formen beibehalten (Abb. 1). Anders als beispielsweise trockener Sand (Abb. 1 A), behält nasser Sand, der in ein zylindrisches Gefäß gefüllt wird, seine zylindrische Form selbst dann bei, wenn das Gefäß entfernt wird (Abb. 1 B). Die Ursache hierfür sind Kapillarbrücken³, die durch das Wasser zwischen den Sandkörnern entstehen. Dieses Phänomen kann auch bei Granulaten aus sehr kleinen Partikeln wie z. B. Mehl beobachtet werden (Abb. 1 C), selbst wenn die Granulate trocken sind. In diesem Fall liegt die Ursache in intermolekularen Van-der-Waals-Kräften, die durch die geringe Partikelgröße wirksam werden⁴. Da diese Kräfte verhältnismäßig schwach sind, lassen sich hier nur Formen mit niedrigerer Höhe bilden. (Abb. 1 C). Schließlich

können längliche Partikel (z. B. Nadeln) oder mit komplexerer Struktur wie beispielsweise Tackerklammern (Abb. 1 D) aufgrund ihrer Form zusammenhängen. Dies wird als geometrische Kohäsion bezeichnet⁴.

Granulate, welche das Phänomen der geometrischen Kohäsion zeigen, weisen zudem eine weitere Besonderheit auf: In Granulaten ohne geometrische Kohäsion lässt sich durch Einrieseln in ein Gefäß die niedrigste Partikeldichte (Partikel pro Volumeneinheit)⁴ erreichen. Eine Verdichtung des Granulats und damit eine höhere „Packing Fraction“ oder einen höheren „Filling Faktor“ (Volumen aller Partikel durch das Volumen des Gefäßes)⁴ kann beispielsweise durch Rütteln des Behälters während des Einfüllens erzielt werden. Eine Verringerung des Filling Faktors eines gerieselten Granulats ist jedoch normalerweise nicht möglich. Anders bei Granulaten mit geometrischer Kohäsion: Diese lassen sich nämlich im gerieselten Zustand so auseinanderzupfen, dass ein Granulat mit geringerer Packungsdichte entsteht.

Für die Wärmeleitfähigkeit λ von Granulaten, also die Eigenschaft, thermische Energie zu leiten⁵, existieren komplexe Rechenmodelle⁶. Dabei nimmt trivialerweise in Granulaten aus Partikeln mit hoher Wärmeleitfähigkeit (wie Metallen) in einem wenig wärmeleitenden Medium (wie Luft) die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Filling Faktor stetig zu.

In beiden Phänomenen, geometrischer Kohäsion und Wärmeleitfähigkeit, spielen Kontakte zwischen den einzelnen Partikeln eine wesentliche Rolle. Daher nahm ich an, dass geometrische Kohäsion und Wärmeleitfähigkeit von Granulaten in Zusammenhang stehen könnten, und gelangte zu der zentralen Hypothese, dass asphärische Granulate aus Tackerklammern im Zustand hoher geometrischer Kohäsion, aber niedrigem Filling Faktor (gezupfter Zustand, Abb. 2 A) eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als in einem Zustand mit niedriger geometrischer Kohäsion, aber höherem Filling Faktor (gerieselter Zustand, Abb. 2 B).

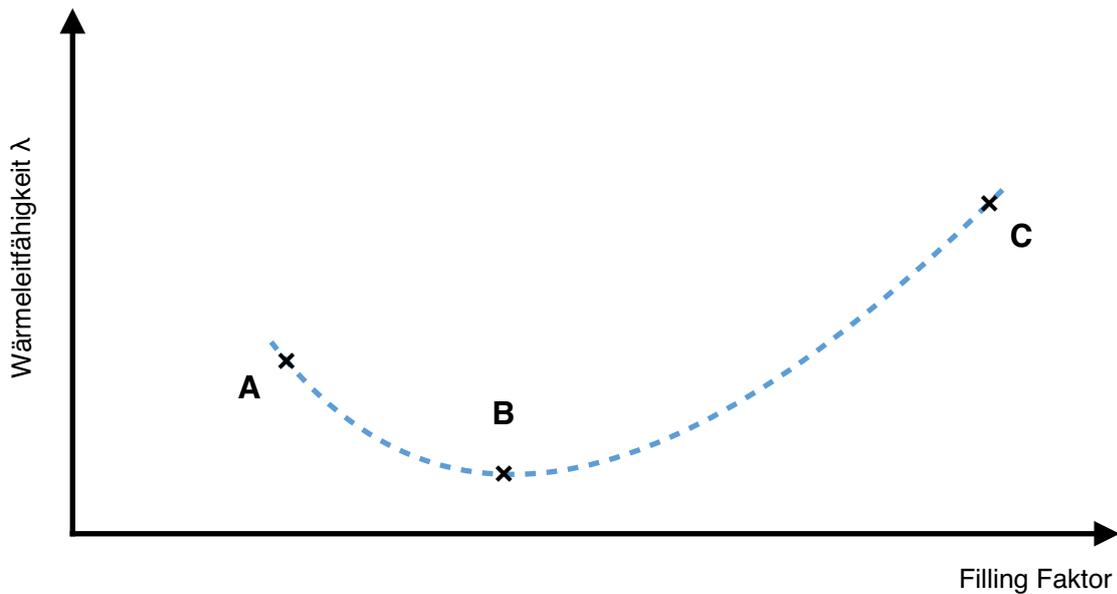


Abb. 2 Hypothetischer Kurvenverlauf

Zur Untersuchung dieser Hypothese wurden Experimente durchgeführt, in denen die Wärmeleitfähigkeit in verschiedenen gezupften Packungen (Abb. 2 A) aus Tackerklammern mit der gerieselten Packungen (Abb. 2 B) verglichen wurde.

Zusätzlich wurden Granulate gemessen, welche durch leichtes Klopfen während des Einfüllens verdichtet wurden. Da ich davon ausging, dass in diesen Packungen die geometrische Kohäsion die Wärmeleitfähigkeit nicht wesentlich beeinflusst, nahm ich an, dass die Wärmeleitfähigkeit im geklopften Zustand höher sein würde (Abb. 2 C) als im gerieselten Zustand, entsprechend einem „typischen“ Zusammenhang zwischen Filling Faktor und Wärmeleitfähigkeit bei granularen Materialien.

2. Grundlagen und physikalische Größen

2.1. Wärmemenge

Wird einem Körper der Masse m eine Wärmemenge ΔQ hinzugefügt oder wird ihm diese entzogen, so verändert sich seine Temperatur T :

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Gleichung 1})^7$$

Hierbei steht c für die spezifische Wärmekapazität, also diejenige Energie, die einem System zugeführt werden muss, um eine Masseneinheit des Stoffes um 1 K zu erwärmen⁸.

Eine Phasenumwandlung (z.B. von fest nach flüssig) kann jedoch auch bei gleichbleibender Temperatur, der sogenannten Schmelztemperatur, stattfinden, wobei gilt:

$$\Delta Q = r \cdot \Delta m \quad \text{bei } T = \text{konstant} \quad (\text{Gleichung 2})^7$$

Dabei ist die spezifische Schmelzwärme r diejenige Energie, die gebraucht wird, um einen Phasenübergang eines Körpers wie z.B. von fest nach flüssig hervorzurufen, ohne dabei jedoch eine Temperaturänderung zu bewirken⁹. Δm ist die hierbei geschmolzene Masse des Körpers.

2.2. Wärmeleitung

Fließt eine Wärmemenge ΔQ in der Zeit Δt durch einen Quader mit der Dicke d und der Querschnittsfläche A , so gilt:

$$\Delta Q = \lambda \cdot A/d \cdot (T_2 - T_1) \cdot \Delta t \quad (\text{Gleichung 3})^7$$

Hierbei bezeichnen T_1 und T_2 die Temperaturen an den beiden Seitenflächen des Quaders (Fläche A) und λ die Wärmeleitfähigkeit, also die Eigenschaft, thermische Energie innerhalb eines ruhenden Körpers weiterzuleiten¹⁰.

3. Material und Methode

3.1. Granulares Material

Als granulares Material wurden für dieses Experiment verzinkte Stahl-Tackerklammern der Firma „RHEITA“, Modell DIN 7405 No. 24/6 (1,08 cm / 0,55 cm) verwendet. Diese wurden mit einem handelsüblichen Handtackergerät so getrennt, dass die typische U-Form der Klammern erhalten blieb (Abb.1 D; Abb. 3).



Abb. 3: Befüllter Probekörper

3.2. Probekörper

Die einzelnen Tackerklammern wurden in einen quaderförmigen Probekörper (Abb. 3) eingefüllt, welchem zwei handelsübliche, 0,5 cm dicke und auf eine Höhe von 15,0 cm und eine Breite von 9,2 cm zugeschnittene Keramikfliesen als Seiten- bzw. Kontaktflächen dienen (Abb. 3 A, B). Keramik besitzt die Eigenschaft, Energie in Form von Wärme rasch zu transmittieren (Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 1,2 \text{ W / m}^{\circ}\text{K}$)¹¹, ohne elektrisch zu leiten - eine notwendige Voraussetzung für die Bestimmung der Temperaturdifferenz mittels Thermoelementen (siehe 3.4.).

Verbunden wurden die beiden Fliesen mit zwei Platten aus Acrylglas als Vorder- und Rückseite des Probekörpers (Plexiglas® der Firma „Evonic industries“; Stärke 2,5 mm) mit den Maßen 4,1 cm x 5,8 cm (Abb. 3 C, D), welche mit Heißkleber an den Innenseiten der Fliesen befestigt wurden. Die Unterseite des Probekörpers wurde ebenfalls mit einer Acrylglasplatte (4,1 cm x 9,2 cm x 0,25 cm) hergestellt und mit Heißkleber an den Innenseiten der Fliesen und an den Unterseiten der beiden anderen Acrylglasplatten fixiert. Aufgrund der dämmenden Wirkung des Acrylglases ($\lambda = 0,19 \text{ W / m}^*\text{K}$)¹² konnte ein Wärmefluss von Fliese zu Fliese durch die Acrylglasplatten, und damit am zu messenden Granulat vorbei, vernachlässigt werden. Nach oben hin blieb der Probekörper geöffnet, damit die zu messenden Materialien eingefüllt werden konnten.

3.3. Herstellung verschiedener Granulatpackungen

Der Probekörper wurde bis zu einer Markierung kurz unterhalb der Oberkante mit Granulat befüllt, so dass die Materialpackung eine Höhe von 12,0 cm erreicht. Mit den Innenmaßen des Probekörpers ergibt sich ein Probenvolumen von V_P von 12,0 cm x 8,7 cm x 4,0 cm = 417 cm³.

Dabei wurden drei verschiedene Methoden der Befüllung angewendet, die sich in ihrem Filling Faktor unterschieden.

Der Filling Faktor einer Packung definiert sich⁴ als der Quotient aus dem Volumen der verwendeten Tackerklammern V_T und dem Volumen des Probekörpers V_P . Das Volumen der Tackerklammern lässt sich über deren Masse m_T und die Dichte von verzinktem Stahl ρ_{vS} ($\rho_{vS} = 7800 \text{ kg/m}^3$)¹³ bestimmen:

$$\text{Filling Faktor} = \frac{V_T}{V_P} = \frac{\frac{m_T}{\rho_{vS}}}{V_P} \quad (\text{Gleichung 5})$$

3.3.1. Befüllmethode „Rieseln“

Bei der Methode des Rieselns wurden die Tackerklammern einzeln in den Behälter gerieselst, wobei darauf geachtet wurden, dass dies gleichmäßig über die gesamte Grundfläche des Körpers verteilt geschah.

Um später einen Vergleich der einzelnen Packungen anstellen zu können, wurde bei dieser Methode versucht, eine möglichst gleichbleibende Masse von etwa 395 g der eingefüllten Klammern (entsprechend einem Filling Faktor von etwa 12%) zu erreichen. War dies nicht der Fall, so wurde die Packung verworfen und von neuem mit dem Einfüllen begonnen.

3.3.2. Befüllmethode „Zupfen“

Beim „Zupfen“ wurden die Klammern zuerst einzeln in den Behälter eingerieselst (wie in 3.3.1.). Nachdem jeweils eine Packungshöhe von etwa 3 cm erreicht worden war, wurden die Klammern leicht von oben auseinander gezogen, um so das Volumen der Packung zu vergrößern. Dieser Vorgang wurde während des Befüllens in regelmäßigen Abständen wiederholt, bis schließlich die Füllhöhe von 12 cm erreicht war.

Ziel der Herstellung einer Probe durch Zupfen war eine möglichst niedrige Masse im Probenvolumen zu erreichen, um die Wärmeleit-

fähigkeit von Packungen mit kleinstmöglichem Filling Faktor bestimmen zu können.

3.3.3. Befüllmethode „Klopfen“

Bei der Methode des Klopfens wurden die Klammern erneut zunächst einzeln in das Behältnis geriebelt (wie in 3.3.1.), es wurde nun aber bei einer Füllhöhe von etwa 1 cm der Probekörper mehrmals leicht auf eine feste Unterlage geklopft. Diese Prozedur wurde abermals so oft wiederholt, bis die Packung die gewünschte Höhe von 12 cm aufwies. Dadurch wurde eine kompaktere Füllung erreicht, entsprechend ein höherer Filling Faktor.

Hierbei wurde eine möglichst hohe Masse der Tackerklammern im Probekörper angestrebt, um die Wärmeleitfähigkeit von Proben mit größtmöglichem Filling Faktor zu bestimmen.

3.4. Messung der Temperaturdifferenz ΔT

Die Messung der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seitenflächen des Probekörpers erfolgte über sog. Thermoelemente⁸ (Abb. 4).

Dazu wurden an den Außenseiten des Probekörpers (d.h. an den beiden Fliesen) Thermoelemente mit der Paarung Nickel-Chrom / Nickel befestigt, um die Thermospannung U zwischen den beiden Kontaktstellen an den Außenseiten des Probekörpers zu messen. Diese Spannungsdifferenz lässt sich mit nachfolgender Formel in eine Temperaturdifferenz umrechnen:

$$\Delta T = U / 0,041 \text{ mV/K} \quad (\text{Gleichung 6})^7$$

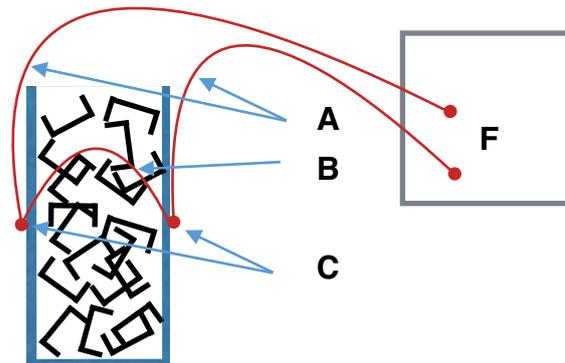


Abb.4: Spannungsmessung am Probekörper

Von zwei isolierten Nickeldrähten (Abb. 4 A) wurde hierzu an beiden Enden die Isolierung auf einer Länge von 1,5 cm entfernt. Ein Ende jedes Nickeldrahts wurde mit einem Draht aus einer Chrom-Nickel-Legierung (Abb. 4 B), dessen Isolierung ebenfalls an beiden Enden entfernt worden war, eng verzwirbelt. Die verzwirbelten Enden wurden nun mit Tesafilm® an jeweils einer Außenseite des Probekörpers befestigt (Abb. 4 C), ohne dass zwischen Fliese und Klebeband ein Lufteinschluss entstand. Die beiden losen Drahtenden wurden an ein Multimeter angeschlossen (Abb. 4 D).

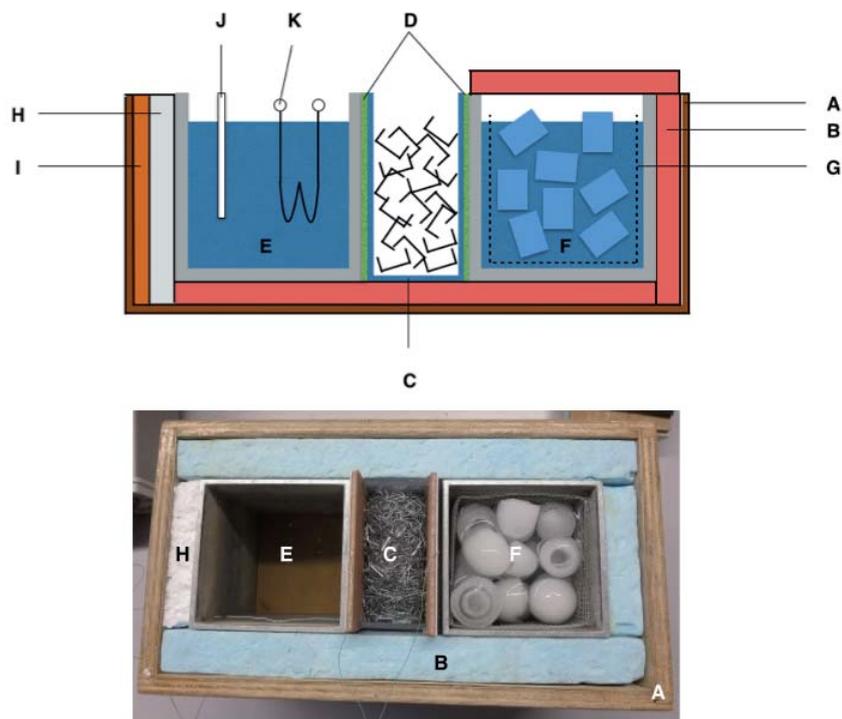


Abb.5: Versuchsaufbau schematisch (oben; modifiziert nach Referenz⁷) und fotografisch (unten)

3.5. Versuchsaufbau (nach Referenz⁷)

Der gesamte Aufbau war in einer offenen quaderförmigen Holzkiste (Abb. 5 A) platziert, die an Vorder- und Rückseite, der rechten Seite und dem Boden mit 3,5 cm dickem Bauschaumstoff (Abb. 5 B) gedämmt war. Im Inneren dieser Kiste befanden sich neben dem Probekörper (Abb. 5 C) zwei weitere Behälter: An die linke Seite des Probekörpers schloss, durch eine 2 mm dicke Moosgummiplatte (Abb. 5 D) abgetrennt, ein nach oben hin geöffneter Quader aus Aluminium (Abb. 5 E) an (9,2 cm x 9,2 cm x 12,0 cm), der später mit Heißwasser befüllt wurde. Auf der rechten Seite des Probekörpers, abermals durch eine Moosgummiplatte abgetrennt, wurden ein baugleicher Quader (Abb. 5 F) platziert, welcher jedoch einen Drahtkorb (Abb. 5 G) enthielt und später mit Eiswasser befüllt wurde. Das Heißgefäß wurde zudem an seiner noch freiliegenden Seite, die

der linken Seitenwand der Holzkiste zugewandt war, durch eine 1,5 cm dicke Platte aus Styropor gedämmt (Abb. 5 H).

Damit möglichst wenig Luft zwischen den einzelnen Kontaktwänden des Heißwasser- und Eiswasserbehälters sowie des Probekörpers verblieb, wurde ein Beilagebrettchen (Abb. 5 I) zur Verdichtung des Aufbaus an der linken Innenseite des Probekörpers platziert.

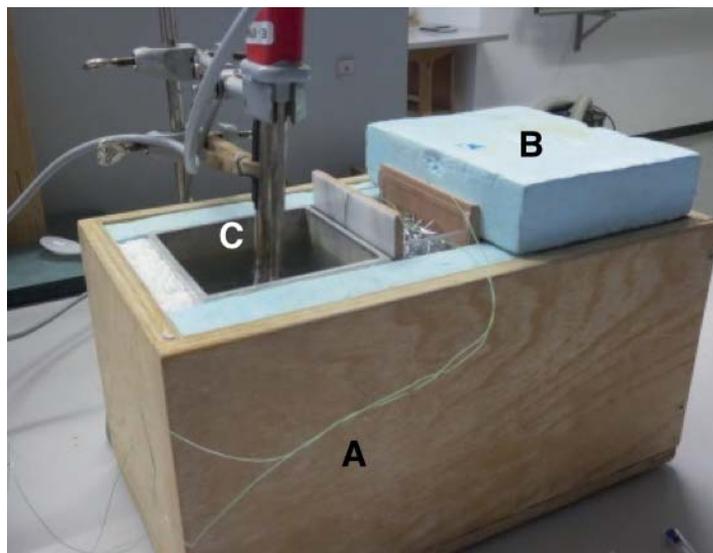


Abb. 6: Versuchsaufbau während der Durchführung

3.6. Durchführung des Versuches

3.6.1. Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Messung wurden die beiden losen Drahtenden der Thermolemente (Abb. 6 A) mittels zweier Klemmen an einem Multimeter angeschlossen. Um die Funktionsfähigkeit der Thermolemente zu überprüfen, wurde eine Kontaktstelle am Probekörper mit dem Finger erwärmt: Bei einem Ausschlag des Spannungsmessgerätes war dieses einsatzfähig. Der Drahtkorb wurde bis zum Rand hin mit Eiswürfeln befüllt, in den rechten Quader gestellt, bis 1 cm unter den Rand mit Wasser aufgefüllt und anschließend

vollständig mit der Wärmedämmung abgedeckt (Abb. 6 B). Schließlich wurden in dem linken Quader, nachdem er ebenfalls bis 1 cm unter die Oberkante mit Wasser gefüllt worden war, ein Tauchsieder und ein Temperaturfühler (Abb. 5 J, K; Abb. 6 C) installiert.

3.6.2. Herstellung einer konstanten Temperaturdifferenz

Um eine konstante Temperaturdifferenz herzustellen, wurde der Heizungsregler des Tauchsieders, welcher die Warmwassertemperatur auf ca. 80°C stabilisierte, angestellt. Hierbei lag die Leistung während der Erhitzungsphase des Wassers bei 80% der maximalen Leistung des Tauchsieders. Sobald diese Solltemperatur erreicht war, wurde die Leistung auf 30% verringert.

Im Folgenden wurde die Thermospannung tabellarisch festgehalten, bis ein stationärer Zustand erreicht war, also die Thermospannung mindestens fünf Minuten konstant war (s. $\Delta T - t$ - Diagramme im Anhang). Im stationären Zustand, also bei konstanter Temperaturdifferenz ΔT , fand nun ein konstanter Wärmestrom vom Heißwasserbehälter (links) durch den Probekörper und damit durch die Granulate hindurch in den Eiswasserbehälter (rechts) statt.

3.6.3. Bestimmung der geflossenen Wärmemenge ΔQ

Aus der Menge Δm des pro Zeiteinheit Δt geschmolzenen Eises bei konstanter Temperaturdifferenz lässt sich die geflossene Wärmemenge ΔQ über die Gleichung 2 (2.1.1.) errechnen, wobei r der spezifischen Schmelzwärme von Eis ($r = 334 \text{ kJ/kg}$) entspricht.

Dazu wurde zu Beginn der Messung der Drahtkorb mit dem Eis aus dem Kaltgefäß entfernt und zügig die Masse m_1 der Eiswürfel bestimmt, nachdem anhängendes Wasser durch Rütteln des Drahtkorbes entfernt worden war. Der Korb mit dem Eis wurde nun rasch wieder in den Kaltwasserbehälter gestellt und anschließend mit der Dämmung abgedeckt.

Nach 15 Minuten war ausreichend Eis geschmolzen, und die Masse m_2 des übriggebliebenen Eises wurde (abermals rasch) gemessen, sodass die Menge des geschmolzenen Eises $\Delta m = m_1 - m_2$ bestimmt werden konnte.

3.7. Berechnung der Wärmeleitfähigkeit

Aus den Größen $\Delta Q = r \cdot \Delta m$ und ΔT lässt sich nach Gleichung 3 (2.2.1.) die Wärmeleitfähigkeit der Packung bestimmen:

$$\text{(Gleichung 7)}^7 \quad \lambda = \frac{r \cdot \Delta m}{\Delta T \cdot \Delta t \cdot \frac{A}{d}}$$

Hierbei ist Δt die Zeit, während welcher Δm geschmolzen ist (hier: 15 min). Aus den Maßen des Probekörpers ergibt sich $A/d = 26,3 \text{ cm}$.

Bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit einer Packung ist zu beachten, dass die berechnete Größe nicht der Wärmeleitfähigkeit der Packung der Tackerklammern, sondern zusätzlich der der für den Probekörper verwendeten Fliesen entspricht, durch die ebenfalls ein Wärmefluss stattfand. Somit dürfen die Messwerte nicht absolut, sondern nur relativ zueinander interpretiert werden.

4. Ergebnisse

Mit der oben geschilderten Methodik wurden insgesamt zwölf Experimente durchgeführt, mit unterschiedlichen Befüllungsverfahren (5x Zupfen, 5x Rieseln, 2x Klopfen).

Die Abbildungen im Anhang stellen jeweils den Verlauf der Temperaturdifferenz während der Herstellung des stationären Zustands, mit Angabe der Masse der Tackerklammern, sowie der Masse des während der 15 min bei konstanter Temperaturdifferenz geschmolzenen Eises dar. Hierbei ist zu beobachten, dass der stationäre Zustand nach einer unterschiedlich langen Zeitdauer erreicht wurde: Am schnellsten stellte dieser sich in der zweiten geklopften Messung ein (s. Anhang S. 32: Messung geklopft₂), hier dauerte es 13 Minuten, am langsamsten war dies in der dritten gerieselten Messung der Fall (s. Anhang S. 28: Messung geriesel₃), hier trat die konstante Temperaturdifferenz erst nach 35 Minuten ein. Diese Unterschiede sind auf unterschiedliche Temperaturen des Wassers im Heißwasserbehälter vor Beginn des Aufheizens zurückzuführen: Wurde das Wasser erst kurz vor Versuchsbeginn frisch aus der Wasserleitung in das Gefäß gefüllt, so war die Temperaturdifferenz zu Beginn weit niedriger, als wenn das Wasser bereits (aus vorherigen Messungen) leicht erwärmt war. Auf das Ergebnis der Messung im stationären Zustand nimmt dies jedoch keinen Einfluss.

Die Ergebnisse der zwölf Messungen zur Wärmeleitfähigkeit verschiedener Packungen werden in Abbildung 7 und Tabelle 1 dargestellt. Man erkennt, bei erheblicher Streuung, insgesamt einen ansteigenden Verlauf der Messpunkte: Mit steigendem Filling Faktor erhöht sich auch die Wärmeleitfähigkeit des Systems.

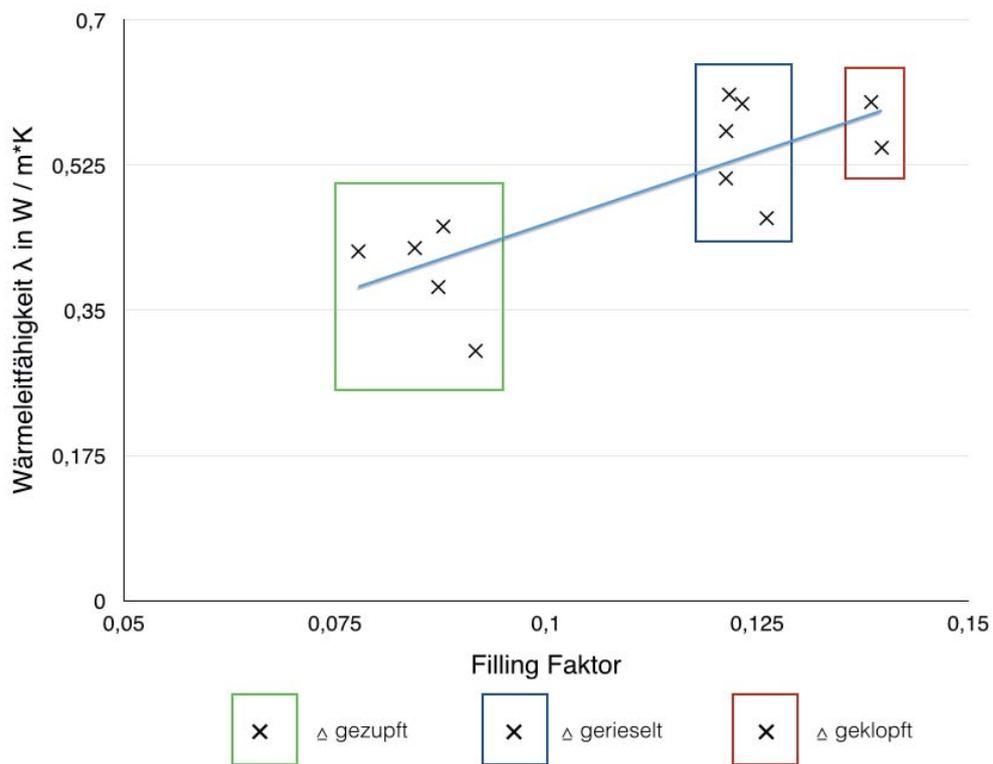


Abb. 7: Messergebnisse graphisch

	gezupft	gezupft	gezupft	gezupft	gezupft
Filling Faktor	0,085	0,088	0,078	0,092	0,088
λ in W / m²K	0,425	0,378	0,421	0,301	0,451

	gerieselt	gerieselt	gerieselt	gerieselt	gerieselt
Filling Faktor	0,122	0,122	0,127	0,122	0,124
λ in W / m²K	0,566	0,610	0,461	0,509	0,599

	geklopft	geklopft
Filling Faktor	0,14	0,139
λ in W / m²K	0,546	0,601

Tab. 1: Messergebnisse tabellarisch

5. Diskussion

5.1. Hypothese

Das wesentliche Ergebnis meiner Arbeit ist, dass gezupfte Packungen (Abb. 7 grün) eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als gerieselte Packungen (Abb. 7 blau). Damit konnte meine eingangs aufgeführte Hypothese, dass im Zustand hoher geometrischer Kohäsion (gezupfte Packung) trotz niedrigerem Filling Faktor eine höhere Wärmeleitfähigkeit auftritt als im Zustand geringerer geometrischer Kohäsion (gerieselte Packung), nicht bestätigt werden.

Die Messungen bestätigten jedoch, dass die Klammern im verdichteten Zustand (geklopfte Packungen; Abb. 7 rot), und damit bei hohem Filling Faktor, im Mittel eine höhere Wärmeleitfähigkeit zeigen als losere Packungen (gezupft und gerieselte) - wie es für Packungen aus einem stark wärmeleitenden Granulat in Luft zu erwarten war.

5.2. Streuung der Messwerte

Es ist außerdem zu beobachten, dass die Messwerte eine hohe Streuung aufweisen: Dieser Unterschied wird besonders bei den fünf gerieselten Packungen deutlich, bei deren Herstellung zwar auf ein möglichst konstantes Gewicht von etwa 395 g geachtet wurde, deren Wärmeleitfähigkeiten jedoch in einem weiten Bereich von $0,461 \text{ W / m} \cdot \text{K}$ bis $0,610 \text{ W / m} \cdot \text{K}$ streuten.

Für diese Variabilität gibt es zwei denkbare Erklärungen:

5.2.1. Messungenauigkeit

Der verwendete Versuchsaufbau könnte eine hohe Messungenauigkeit bedingen. Eine mögliche Ursache hierfür wäre ein variabler Verlust von Wärme an die Umwelt durch kleine Lücken in der Dämmung des Aufbaus. Ein weiterer Grund könnten variable Mengen an Luft sein, die zwischen den einzelnen Körpern des Aufbaus eingeschlossen ist und damit die Berührung der einzelnen Kontaktflächen verringert. Zudem könnte auch die Variabilität des Kontaktes zwischen den Innenwänden des Probekörpers und der Packung der Tackerklammern eine Rolle spielen: Je mehr Klammern die Innenseite der Fliesen berühren und je größer die Kontaktfläche einer einzelnen Klammer am Probekörper ist, desto höher ist der Wärmefluss. Liegt etwa nur eine Spitze der Tackerklammer an der Fliese an, so wäre der Wärmefluss geringer als wenn diese mit ihrer gesamten u-förmigen Seitenfläche anliegt. Zuletzt könnten auch Ungenauigkeiten im Wiegen des Eises im Verlauf der Messung Einfluss auf die Messgenauigkeit haben. Da der mit Eis gefüllte Drahtkorb sich während des Experiments in einem Wasserquader befindet, könnte ein Teil des Wassers beim Herausnehmen des Drahtkorbes trotz des Abschüttelns vor dem Wiegen an den Eiswürfeln haften bleiben und somit die gemessene Massendifferenz des Eises verfälschen.

5.2.2. Geometrische Kohäsion

Neben Messungenauigkeiten könnte auch das Phänomen der geometrischen Kohäsion selbst, welches in Tackerklammern beobachtet werden kann, die Streuung der Messpunkte hervorrufen. Es wäre nämlich denkbar, dass in den Packungen, die nach gleicher Methode hergestellt wurden, trotz vergleichbarem Filling Faktor die geometrische Kohäsion unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Und unter der Annahme, dass meine eingangs formulierte Hypothese doch zuträfe, würde eine Packung, deren Tackerklammern stark kohärieren, einen höheren Wärmestrom aufweisen als eine Packung, in der eine niedrigere Kohäsion der Granulate vorherrscht.

5.3. Ausblick

Um die in 5.2.1. und 5.2.2. genannten Ursachen für die hohe Streuung der Messungen weiter zu untersuchen, ließen sich weitere Versuche zur Thematik durchführen:

5.3.1. Bestimmung der Messungenauigkeit

Durch eine mehrmalige Messung einzelner Packungen, ohne dass diese in ihrer Masse, Struktur oder Volumen verändert werden, ließe sich die Messungenauigkeit der angewendeten Methode bestimmen.

5.3.2. Bestimmung der geometrischen Kohäsion einer Packung

Die geometrische Kohäsion der einzelnen Packungen ließe sich durch eine Erweiterung des Versuchs experimentell bestimmen. Man könnte dazu eine Kugel, welche an einem dünnen Faden befestigt

ist, während der Herstellung einer Packung in das Zentrum des Probekörpers platziert, sodass sie vollständig von Tackerklammern umgeben ist. Nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit würde dann die Kraft bestimmt, mit der man am Faden ziehen muss, um die Kugel aus der Packung zu befreien. Diese Kraft würde damit ein Maß für die geometrische Kohäsion der jeweiligen Packung liefern, so dass man dann die vorher gemessene Wärmeleitfähigkeit zur geometrischen Kohäsion der jeweiligen Packung in Beziehung setzen könnte.

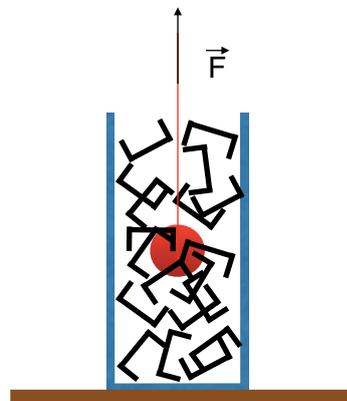


Abb. 8: Bestimmung der geometrischen Kohäsion

6. Zusammenfassung

Die Korrelation zwischen Filling Faktor und Wärmeleitfähigkeit gilt auch für radikal asphärisches granulares Material wie Tackerklammern. Dies ist selbst dann der Fall, wenn dieses in einen Zustand hoher geometrischer Kohäsion gebracht wird.

7. Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Kursleiter Herrn StR Dr. Grillenbeck für die Hilfe bei der Themenfindung und hervorragende Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit danken.

Die Experimente wurden in den Räumlichkeiten und mit den Gerätschaften des physikalischen Praktikums von Herrn Prof. Dr. Junker an der Fachhochschule Rosenheim, University of Applied Sciences, durchgeführt, dem ich an dieser Stelle meinen Dank ausspreche.

Besonderer Dank gebührt auch Herrn Lackovic für seine Hilfestellung in technischen Fragen vor Ort.

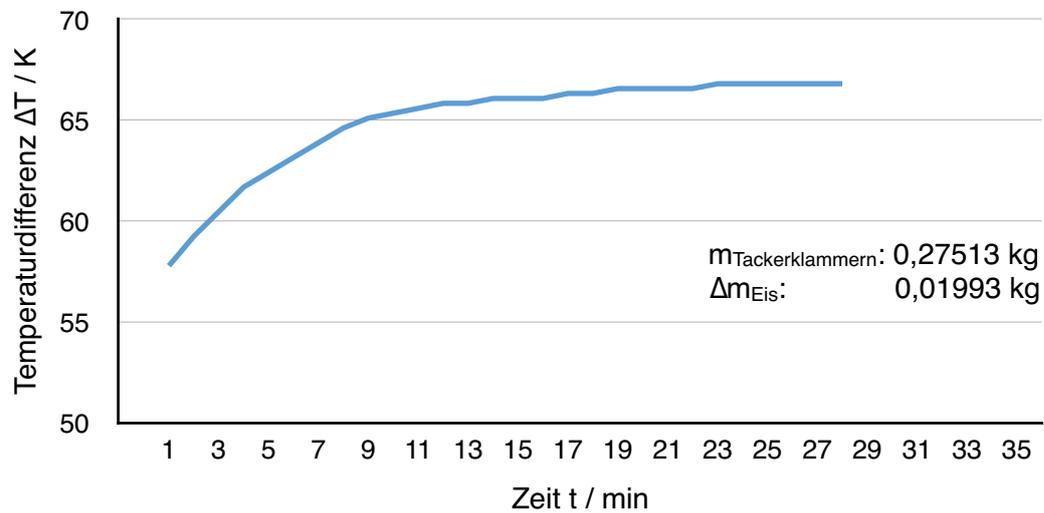
8. Quellenverzeichnis

- 1 Lois, Gregg (2008): Granular Materials
<http://web.physics.ucsb.edu/~complex/research/granular.html>
(Stand: 6.11.15)
- 2 Art. „Kohäsion“, in: Brockhaus Enzyklopädie, Band15, Leipzig 2006
- 3 Meier, Christian: Brücken, die Sand verbinden
http://www.mpg.de/799012/W002_Physik-Astronomie_048-055.pdf
(Stand 7.11.15)
- 4 Franklin, Scott V.: Geometric cohesion in granular materials,
in: Physics Today 69, 9 (2012), S.70f.
- 5 Pitka, R u.a.: Physik, Der Grundkurs, 3. Auflage,
Frankfurt am Main, S.428f.
- 6 Leyers, H.J.: Wärmeleitung in losen Kugelschüttungen in
stagnierenden Medien, in: Chemie-Ing.-Techn. 44 (1972), 19,
S. 1109-1115
- 7 Aschhaber, J. u.a., Hochschule Rosenheim, University of Applied
Sciences, Fakultät für Angewandte Natur- und
Geisteswissenschaften / Physik: Physikalisches Praktikum,
Versuch: Wärmeleitung (Stand 15.03.14)
- 8 Pitka, R. u.a. a.a.O., S.380f.
- 9 Pitka, R. u.a. a.a.O., S.463
- 10 Pitka, R. u.a. a.a.O., S.428f.

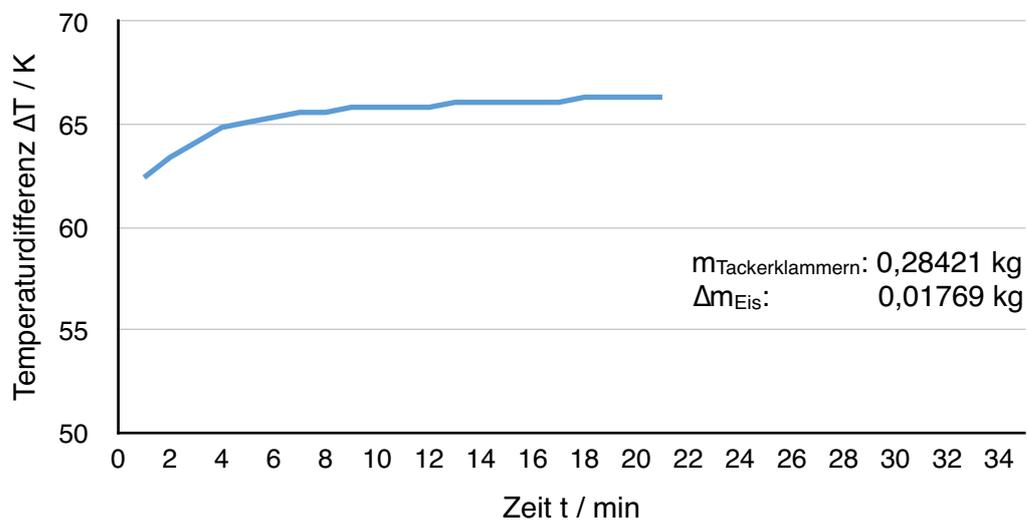
- ¹¹ Kompetenzzentrum technischer Umweltschutz (Hrsg., 2009):
Keramische Fliesen und Platten
<http://www.crtib.lu/Leitfaden/content/DE/116/C478/> (Stand: 2.9.15)
- ¹² BauNetz Media GmbH
[http://www.baunetzwissen.de/dl/134812/
eigenschaften_kunststoffe.pdf](http://www.baunetzwissen.de/dl/134812/eigenschaften_kunststoffe.pdf) (Stand 6.11.15)
- ¹³ Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Hrsg.,
2013): Bleche und Metalle [http://www.ibo.atdocuments20081022_
BaustoffeReferenz_Homepage_bleche.pdf](http://www.ibo.atdocuments20081022_BaustoffeReferenz_Homepage_bleche.pdf) (Stand 6.11.15)

9. Anhang: Temperatur - Zeit - Diagramme der 12 Messungen

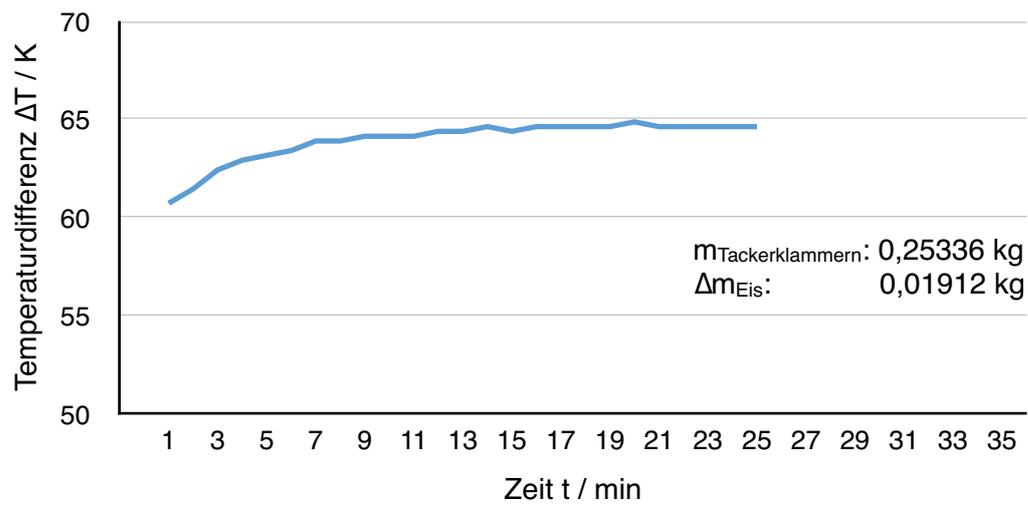
Diagramme der gezupften Messungen



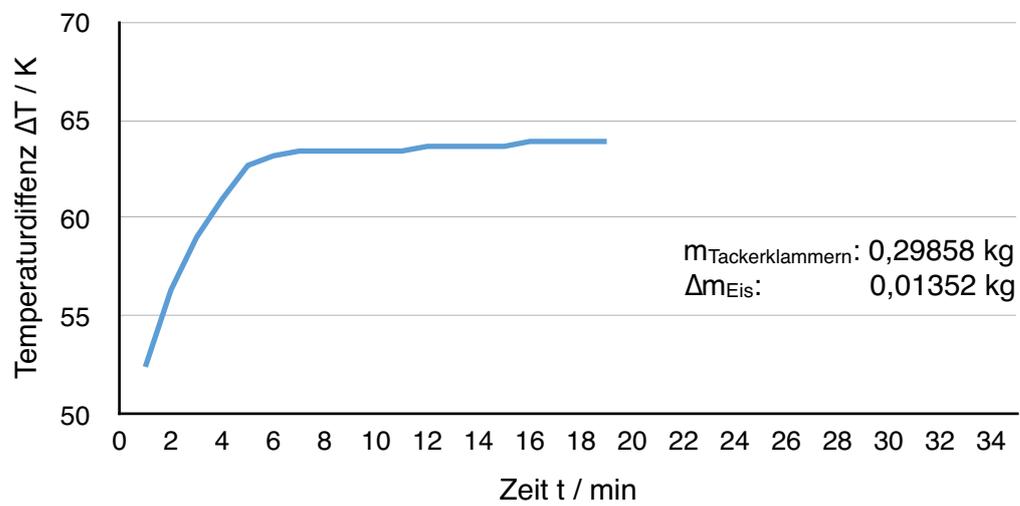
Messung gezupft₁



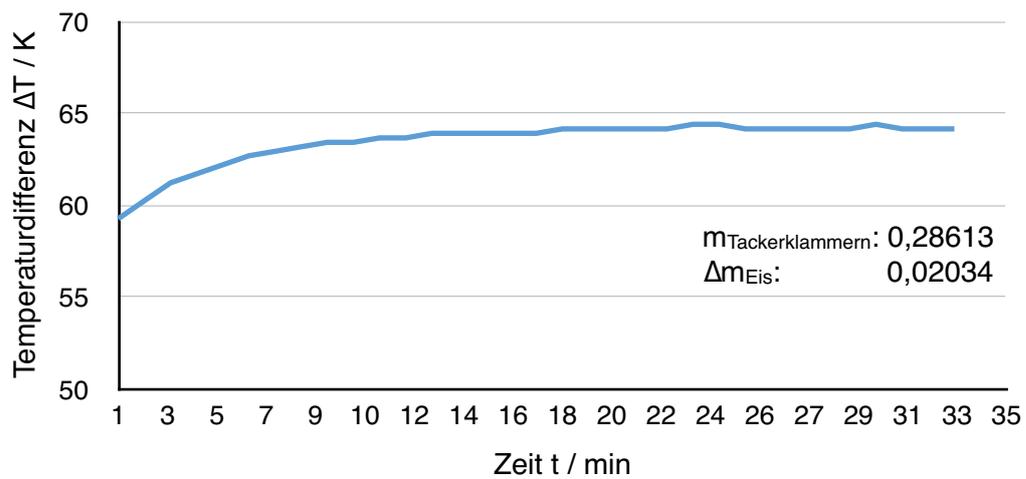
Messung gezupft₂



Messung gezupft₄

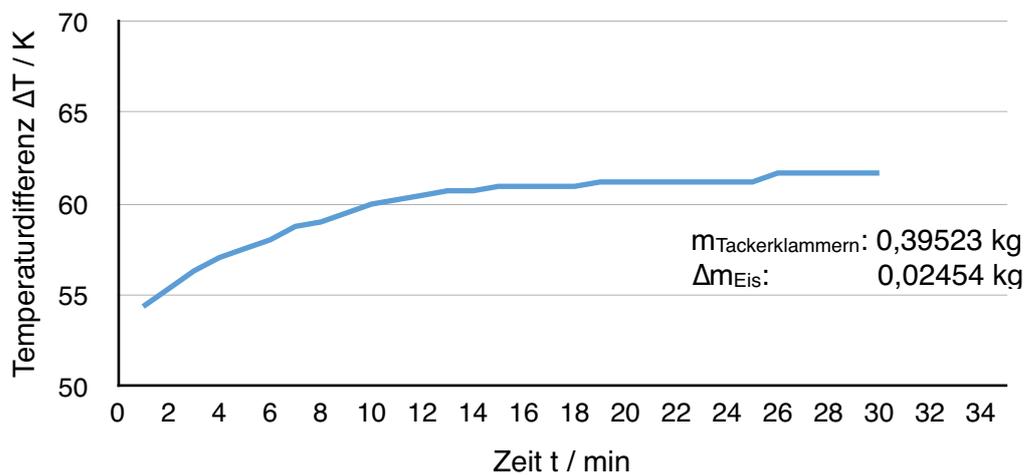


Messung gezupft₄

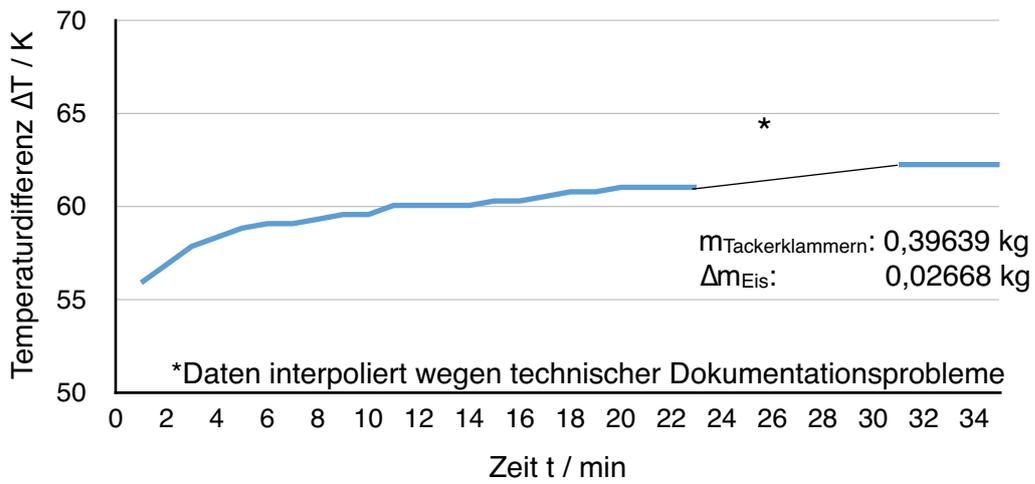


Messung gezipft₅

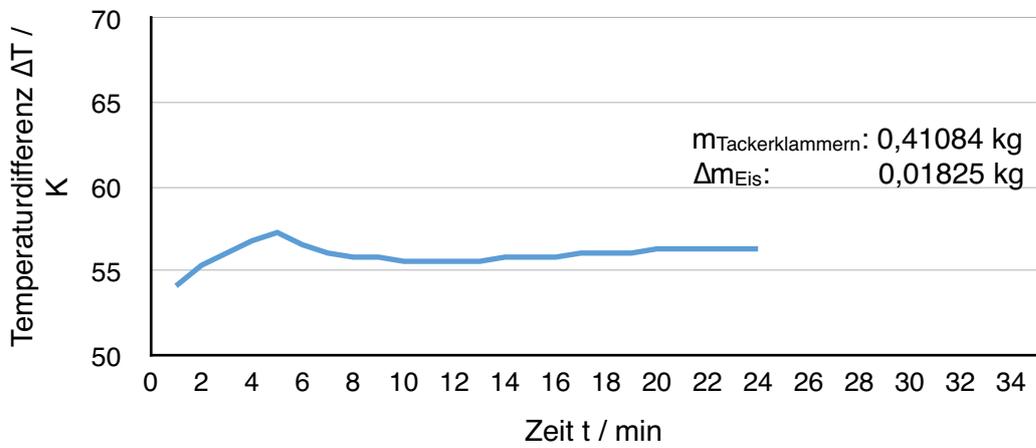
Diagramme der gerieselten Messungen



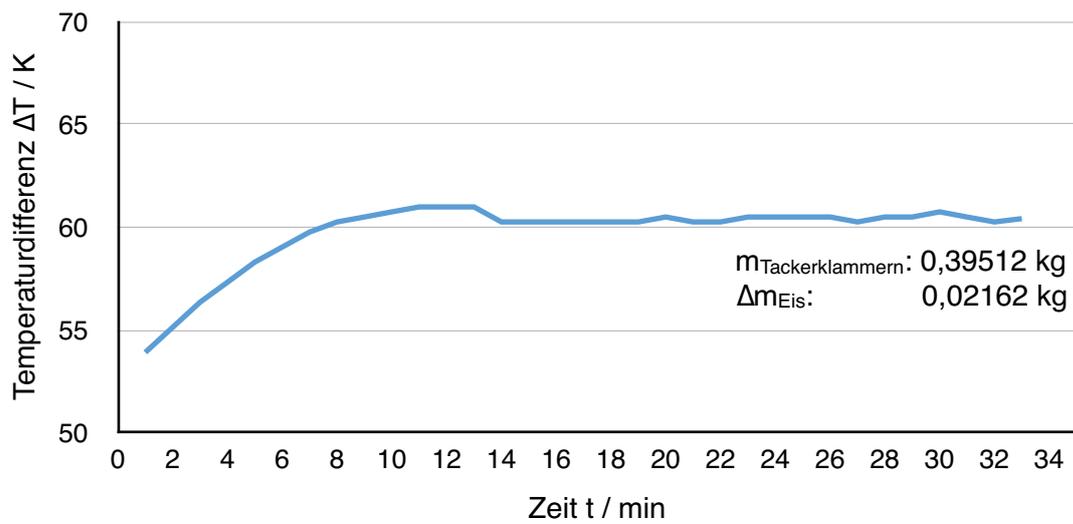
Messung geriesel₁



Messung geriesel2



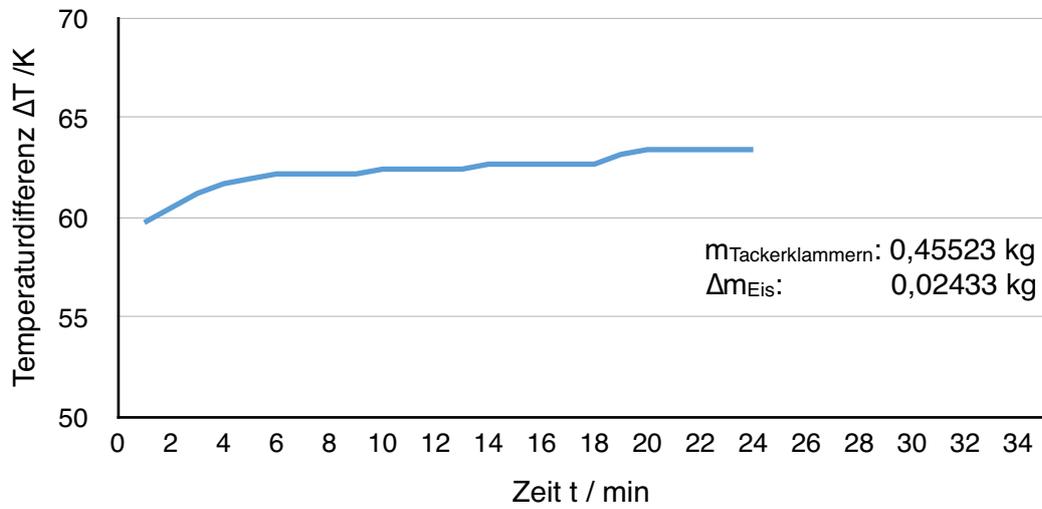
Messung geriesel3



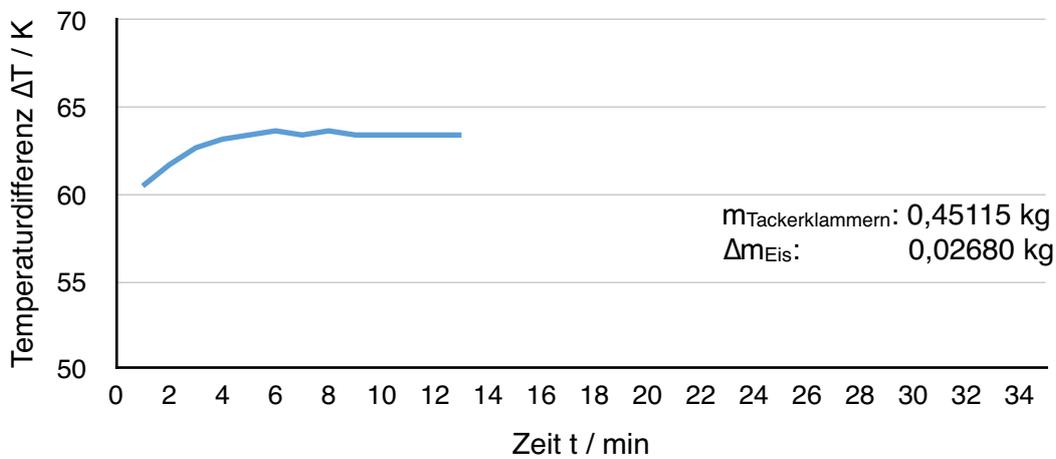
Messung gerieselt₄

Für die Messung gerieselt₅ ist auf Grund eines technischen Datenverlusts kein Verlauf der Temperaturdifferenz bis zum stationären Zustand vorhanden. Die Temperaturdifferenz ΔT im stationären Zustand betrug 65,0 °C, die Masse Δm 0,02668 kg und die Masse der Tackerklammern 0,40144 kg.

Diagramme der geklopften Messungen



Messung geklopft₁



Messung geklopft₂

Erklärung zur Seminararbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Mir ist bekannt, dass die vorliegende Arbeit mit 0 Punkten bewertet werden kann, wenn gegen diese Grundsätze verstoßen wurde, und dass in diesem Fall eine Zulassung zum Abitur nicht möglich ist.

Rosenheim, den 10. November 2015

.....

Katharina Staudt