

# Schüttgut-Kalibrierung für die Berechnung thermo-mechanischer Belastungen in Festbett-Wärmespeichern

Bulk material calibration for the calculation of thermo-mechanical loads in packed-bed thermal energy storages

**Thomas Mitterlehner**  
**Georg Kartnig**

*Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung  
Forschungsbereich: Konstruktionslehre, Fördertechnik und Ecodesign  
Technische Universität Wien*

**Markus Haider**

*Institut für Energietechnik und Thermodynamik  
Forschungsbereich: Thermodynamik und Wärmetechnik  
Technische Universität Wien*

**U**m für die DEM-Simulation das Schüttgutverhalten richtig abbilden zu können, ist eine Kalibrierung der Schüttgutparameter notwendig. Als Kalibrier-Methode kommt der Draw-Down-Versuch zur Anwendung, der den Wert für die Haft- und Rollreibung der Partikel liefert. Rutsch- und Rollversuche liefern die weiteren Materialkennwerte. Um die Spannungen in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand ermitteln zu können, wird der E-Modul der Schüttung benötigt. Zu dessen exakter Bestimmung wurde ein Druckversuch mit Schüttgut in einem Behälter durchgeführt und mit einer DEM-Simulation verglichen. Das vorliegende Paper beschreibt einen vollständigen Prozess zur Ermittlung sämtlicher Parameter, die für die Spannungsberechnung erforderlich sind.

*[Diskrete Elemente Methode, Schüttgut, Kalibrierung, thermo-mechanische Belastungen, Festbett-Wärmespeicher]*

**I**n order to be able to represent the bulk material behaviour correctly for the DEM simulation, a calibration of the bulk material parameters is necessary. The draw down test is used as the calibration method, which provides the value for the static and rolling friction of the particles. Slip and roll tests provided the other material parameters. In order to determine the stresses in the bulk material and between bulk material and container wall, the young's modulus of the bulk material is required. For its exact determination a pressure test with bulk material in a container was performed which was compared with a DEM simulation. This paper describes a complete process for determining all parameters required for stress calculation.

*[Discrete Element Method, bulk material, calibration, thermo-mechanical loads, thermal energy storage]*

## 1 EINLEITUNG

Im Zuge eines New Energy for Industry (NEFI) Projektes zur Verbesserung der Energieeffizienz soll die Abwärme eines Zementwerks mit einer Temperatur von 300 - 400°C genutzt werden. Dafür soll eine Wärmespeicherung in Form eines luftdurchströmten Festbettregenerator-Wärmespeichers implementiert werden. Die gespeicherte Wärme soll benachbarte Betriebe mit Prozessenergie für Warmwasseraufbereitung, Herstellungsprozesse etc. versorgen. Aus diesem Grund wurde 2018 an der Technischen Universität Wien ein Gemeinschaftsprojekt vom Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET) und dem Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung (IKP) gestartet.

Festbett-Wärmespeicher spielen in der Energietechnik eine wichtige Rolle [SSS10]. Vereinfacht gesagt handelt es sich dabei um Behälter, die mit Schüttgut (Schotter, Kies etc.) gefüllt sind. Das Schüttgut dient dabei als wärmespeicherndes Medium. Bei der Energieaufnahme wird der Inhalt des Festbett-Wärmespeichers von oben nach unten mit heißer Luft durchströmt. Beim Erwärmungsvorgang kommt es zu nachteiligen Begleiterscheinungen durch die Ausdehnung des wärmespeichernden Mediums (Schüttgut). Die Kontaktkräfte zwischen den einzelnen Partikeln bzw. den Partikeln und der Behälterwand steigen mit zunehmender Temperatur [Bli85], [LP06], [ZBL93]. Dabei kann es – wie in den Berechnungen von [DZM13], [Sas18], [Sas18] beschrieben – zu einer Schädigung der Schüttung oder der Behälterwand kommen (siehe Abbildung 1).

In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits die Modellbildung vorgestellt [MKH20], [MKH20]. Dabei lag der Fokus in der Erstellung eines DEM-Modells, mit dem sich die Wärmeausdehnung des Schüttgutes und der damit ver-

bundene Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. der Behälterwand für die vorliegende Wärmespeicher-Geometrie in allgemeiner Form ermitteln lassen.

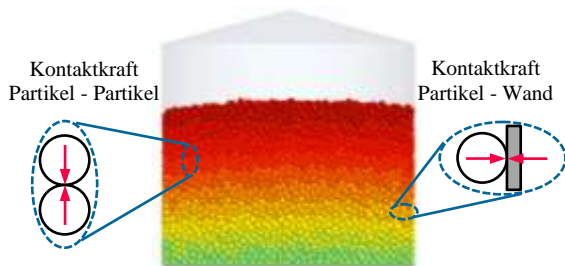


Abbildung 1. Erhöhung der Kontaktkräfte zwischen Partikeln (links) bzw. zwischen Partikeln und Behälterwand (rechts) beim Erwärmungsvorgang

Damit diese Belastungen in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand berechnet und eine Aussage über eventuelle Schädigungen gemacht werden kann, müssen vorab die Materialkennwerte bekannt sein. Um trotz der für die DEM-Simulation erforderlichen Vereinfachungen das Schüttgutverhalten richtig abbilden zu können, ist eine Kalibrierung der Schüttgutparameter notwendig. Diese Vereinfachungen sind im speziellen die sphärische Abbildung der Kornform sowie die Erhöhung der Partikelgröße und die Verringerung der Partikelsteifigkeit. Dadurch kann die Rechenzeit erheblich reduziert werden. Für die Kalibrierung der DEM-Parameterwerte gibt es mehrere Ansätze [Coe17].

Als Schüttgut wird ein von einem Kies- und Betonwerk bereitgestellter Quarzsotter mit einer Korngröße von 8 bis 16 mm (Bezeichnung: RK 8/16) verwendet (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2. Zu kalibrierendes Schüttgut RK 8/16

Dieser Beitrag beschäftigt sich daher mit der Bestimmung der für die DEM-Simulation erforderlichen Materialkennwerte. Als Kalibrier-Methode kommt dabei der Draw-Down-Versuch nach [RRK19] zur Anwendung, der den Wert für die Haft- und Rollreibung der Partikel liefert. Bei dieser Kalibriermethode wird neben dem Böschungswinkel und Scherwinkel ( $^{\circ}$ ) auch der Massefluss (kg/s) und der verbliebene Massenanteil (%) gemessen (näheres siehe Kapitel 4 und 5). Weitere Materialkennwerte werden in Kapitel 3 über Rutsch- und Rollversuche ermittelt. Auch die richtige Wahl des E-Moduls ist von Bedeutung, um die Spannungen in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand ermitteln zu können. Dazu wurden Druckversuche mit Schüttgut in einem Behälter durchgeführt und

mit DEM-Simulationen verglichen (siehe Kapitel 6). Dieser Vergleich liefert den gesuchten E-Modul.

## 2 MATERIALKENNWERTE AUS DER LITERATUR

Der mittlere Partikeldurchmesser und die Korngrößenverteilung lassen sich aus der vom Kies- und Betonwerk übermittelten Sieblinie (Tabelle 1) ausrechnen. Um den für die DEM-Simulation notwendigen mittleren Partikeldurchmesser zu bekommen, wird der Partikeldurchmesser der Sieblinie bei einem Siebdurchgang von 50% genommen. Dieser ergibt einen Wert von 12,158 mm. Der gewählte mittlere Partikeldurchmesser wird mit 12 mm festgelegt.

Tabelle 1. Ergebnistabelle der Sieblinie

		Sieblinie							
Siebweite (mm)	0,063	4	8	11,2	16	22,4	31,5	45	63
Siebdurchgang (%)	0,1	0,1	2,2	39,0	94,1	100	100	100	100

Der aus der Literatur vorgeschlagene Wertebereich für den E-Modul des Schotters ist sehr groß. Dieser kann nach [Zha11] bei 13 GPa bis hin zu 50 GPa [Yag09] oder 70 GPa [Zhu10] liegen. Zur richtigen Wahl des E-Moduls folgen experimentelle Druckversuche (näheres siehe Kapitel 6).

## 3 RUTSCH- UND ROLLVERSUCH

Für den Draw-Down-Versuch muss die Haft- und Rollreibung  $\mu_H$  und  $\mu_R$  zwischen Partikel-Stahl (P-S) und Partikel-Plexiglas (P-PG) bekannt sein. Diese Reibwerte, die der Geometrie der Kalibriervorrichtung zugewiesen werden müssen, werden über einen Rutsch- bzw. Rollversuch bestimmt. Abbildung 3 zeigt in a) bzw. b) die Ermittlung der Haftreibung zwischen Schotter und Stahl bzw. Schotter und Plexiglas mittels Rutschversuch. Zur Ermittlung der Rollreibung wird eine Gummunterlage verwendet (siehe Abbildung 3c)). Damit wird sichergestellt, dass das Schüttgut nicht rutscht, sondern rollt.

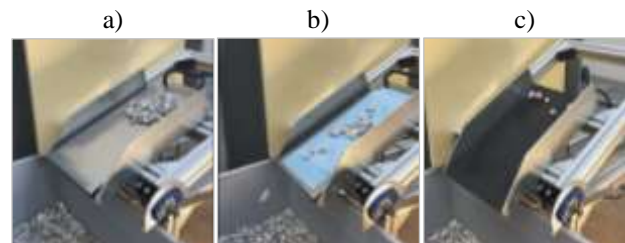


Abbildung 3. Experimentelle Durchführung der Rutsch- bzw. Rollversuche

Sobald das Schüttgut zu rutschen bzw. rollen beginnt, wird der Reibwinkel  $\varphi_R$  des Winkelmessers notiert. Über (1) lassen sich somit die gemittelten Reibwerte des Haftreibungskoeffizienten  $\mu_H$  und Rollreibungskoeffizienten  $\mu_R$  ermitteln, welche in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

$$\mu_H, \mu_R = \tan(\varphi_R) \quad (1)$$

Tabelle 2. Materialkennwerte Rutsch- und Rollversuch

Experimentell bestimmte Materialkennwerte						
Kennwert	Methode	Messwert 1 $\varphi_{R1}$ (°)	Messwert 2 $\varphi_{R2}$ (°)	Messwert 3 $\varphi_{R3}$ (°)	Mittelwert $\varphi_R$ (°)	Errechner Reibwert $\tan(\varphi_R)$
Haftreibung P-S	Rutsch-V.	20,4	20,2	21,1	20,6	0,375
Rollreibung P-S	Roll-V.	29,0	34,3	30,7	31,3	0,609
Haftreibung P-PG	Rutsch-V.	26,5	23,1	24	24,5	0,456
Rollreibung P-PG	Roll-V.	29,0	34,3	30,7	31,3	0,609

#### 4 DRAW-DOWN-VERSUCH

Obwohl die in Kapitel 1 erwähnten Vereinfachungen bei fast jeder DEM-Simulation angewendet werden, gibt es aktuell keine Standard-Kalibriermethode. In den meisten Fällen wird über den Böschungswinkel (Angle of repose = AoR) kalibriert. Dabei wird aber nur eine Größe in Form des Böschungswinkels betrachtet, um die Haft- und Rollreibung zwischen den einzelnen Partikeln zu kalibrieren. Um mehr unabhängige Größen für die Ermittlung dieser beiden Reibparameter zu erhalten, wird der Draw-Down-Versuch verwendet. Hier wird neben dem Böschungs- und Scherwinkel (°) auch der Massefluss (kg/s) und der verbliebene Massenanteil (%) in der oberen Kammer gemessen. Für diesen Versuch wurde eine Kalibriervorrichtung am IKP der TU Wien gebaut (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).

Der im Zuge dieses Projektes entworfene Prüfstand für Schüttgutkalibrierungen nach [RRK19] besteht aus drei Hauptkomponenten (siehe Abbildung 4). Diese Hauptkomponenten sind eine Oberkammer, eine Unterkammer und ein Gestell. Die Oberkammer ist im Sinne der statischen Bestimmtheit über drei Kraftmessdosen (S2M, Genauigkeitsklasse 0.02, Nennkraft 500 N) mit der Oberseite des Gestells verbunden.

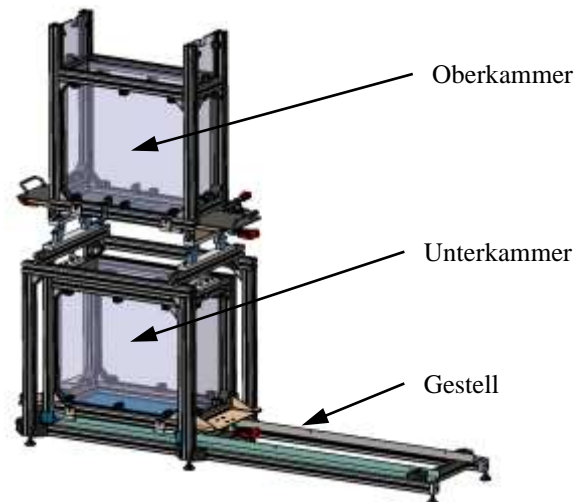


Abbildung 4. Kalibriervorrichtung für Schüttgüter (CAD-Modell)

Die Ober- bzw. Unterkammer ist jeweils mit vier Plexiglasscheiben eingefasst und am Boden befinden sich zwei aufklappbare Verschlüsse. Damit erfolgt die Entleerung der Kammern. Die Oberkammer umfasst zusätzlich zwei verschiebbare Platten, über die ein variabler Spalt eingestellt wird.

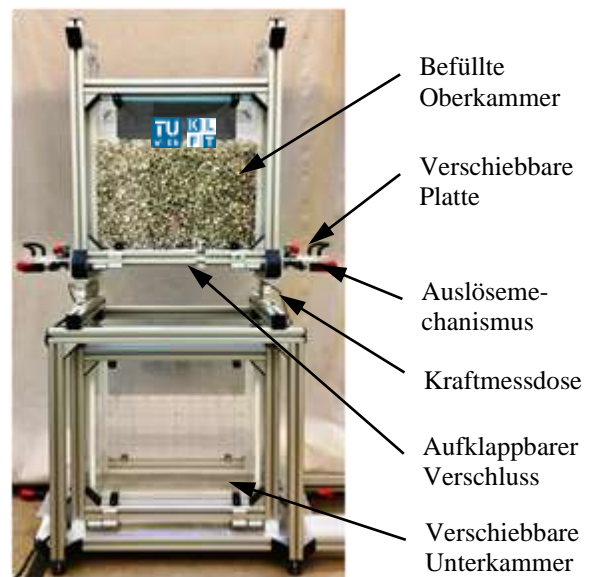


Abbildung 5. Kalibriervorrichtung am IKP, TU Wien

Zu Beginn der Kalibrierung erfolgt die Befüllung der Unterkammer mit einer gewissen Menge des gewünschten Schüttguts – in unserem Fall RK 8/16 Schotter – in der 2. Position (siehe Abbildung 6). Davor muss bereits der gewünschte Spalt über die zwei verschiebbaren Platten eingestellt sein. Mittels Kran kann die Unterkammer für den Füllvorgang auf die Oberkammer in Position 3 aufgesetzt werden. Mit den auf der linken und rechten Seite vorhandenen Schiebern werden die auf der Unterseite der Unterkammer befindlichen Klappen geöffnet und das Schüttgut fällt in die Oberkammer. Nach dem Füllvorgang wird die

verriegelte Unterkammer wieder in die 1. Position gebracht, um den Versuch zu starten.

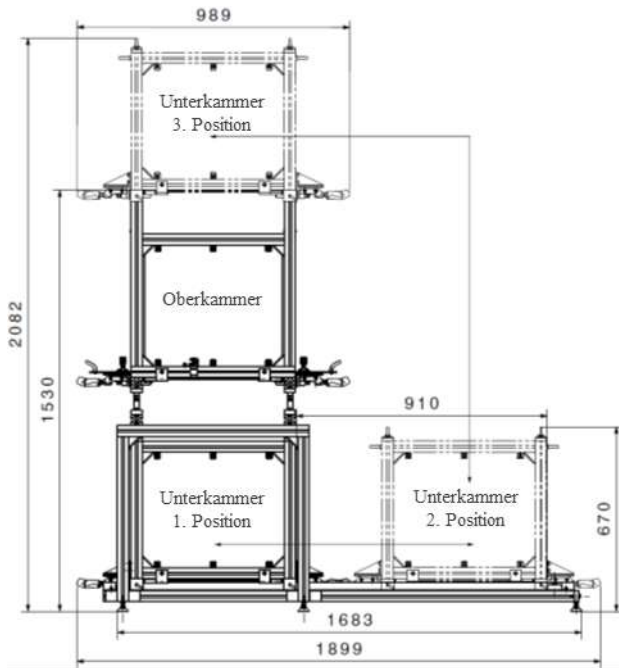


Abbildung 6. Kalibriervorrichtung - Aufbau und Funktionsweise

Wie bereits erwähnt, werden der Böschungswinkel ( $^\circ$ ), der Massefluss (kg/s) und der verbliebene Massenanteil (%) gemessen. Der Draw-Down-Versuch wird gestartet, indem die Klappen der Oberkammer über einen Auslösemechanismus geöffnet werden. Die Klappen schnappen dabei in zwei Fangvorrichtungen ein, damit der Massenfluss des Schüttguts durch mögliches Rückpendeln nicht beeinträchtigt wird. Das Schüttgut beginnt über die nun vorhandene Auslauföffnung (Spaltbreite: 100 mm, Spalttiefe: 152 mm) in die Unterkammer zu rieseln. Die Kraftmessdosen zeichnen die Änderung der Masse  $\Delta m_K$  in Abhängigkeit von der Zeit  $\Delta t_K$  auf (kg/s). Nach Versuchsende lässt sich neben dem Massefluss (kg/s) auch der verbliebene Masseanteil (%) feststellen (siehe Abbildung 7).

Im Bereich des näherungsweise linearen Masseflusses (siehe Abbildung 7) kann  $\dot{m}_K$  nach (2) berechnet werden.

$$\dot{m}_K = \frac{\Delta m_K}{\Delta t_K} \quad (2)$$

Den verbliebenen Masseanteil zeigt die Kennlinie in Abbildung 7 als konstanten Wert auf der rechten Seite. Von der ursprünglichen Schüttgutmasse von 40 kg verblieben im Mittel 7,96 kg in der Oberkammer. Das entspricht einem prozentualen Masseanteil von 19,9%.

In der Unterkammer stellt sich ein Böschungswinkel ein und in der Oberkammer bildet sich ein Scherwinkel auf der linken und rechten Seite (siehe Abbildung 10 c)).

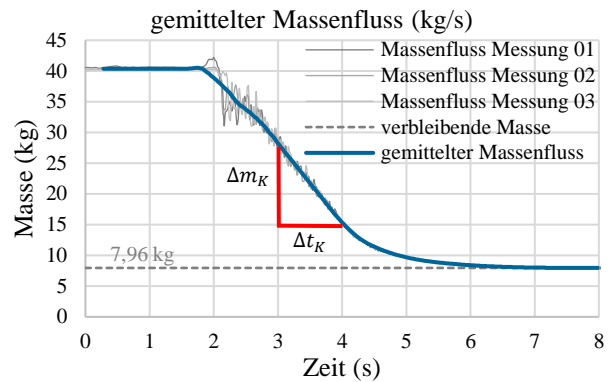


Abbildung 7. Gemessener und gemittelter Massenfluss

Das Kalibrirexperiment wird mehrmals durchgeführt und die gemittelten Messergebnisse zusammengefasst (Tabelle 3).

Tabelle 3. Materialkennwerte Draw-Down-Versuch

Experimentell bestimmte Materialkennwerte						
Kennwert	Messwert 1	Messwert 2	Messwert 3	gemittelter Wert	Standardabweichung	Einheit
verbleibender Masseanteil	20,1	20,0	19,6	19,9	$\pm 0,3$	%
Massenfluss	12,9	13,0	12,7	12,9	$\pm 0,1$	kg/s
Böschungswinkel (Unterkammer)	24,5	26,5	26,8	25,9	$\pm 1,2$	$^\circ$
Scherwinkel (Oberkammer)	40,0	40,5	39,0	39,8	$\pm 0,7$	$^\circ$

## 5 SCHÜTTGUT-KALIBRIERUNG

Um die richtigen Reibwerte für die DEM-Simulation zu erhalten, müssen diese über einen Kalibriervorgang mit Hilfe des Draw-Down-Versuchs ermittelt werden. Dazu wird ein vereinfachtes DEM-Modell des Draw-Down-Versuchs erstellt (Abbildung 8).

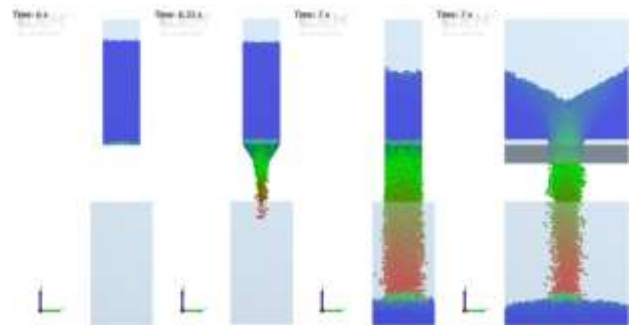


Abbildung 8. Kalibrierung mittels DEM-Simulation



In der Simulation erfolgt die Anpassung der Porosität über die Partikeldichte, damit die Schüttdichte in der Oberkammer eingehalten werden kann.

Der erste Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die gewählten Reibparameter zu gering gewählt sind, da das Schüttgut bereits vor Beginn des Versuches unter die beiden Schiebepplatten rollt (Abbildung 9 - links). Nach Versuchsende rieselt das Schüttgut auch noch zu lange nach und die verbliebene Masse in der Oberkammer ist zu gering (Abbildung 9 - rechts). Auch der Böschungswinkel (Unterkammer) und die Scherwinkel (Oberkammer) lieferten keine richtigen Ergebnisse.

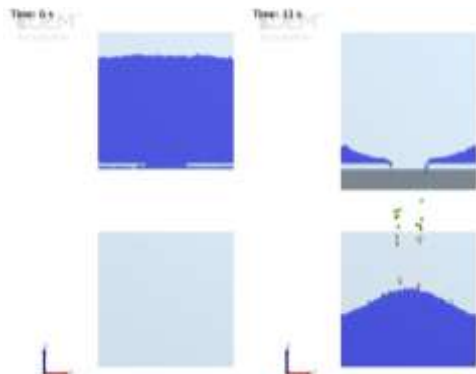


Abbildung 9. Kalibrierung – Reibparameter zu gering

Die Haft- und Rollreibung wird nun so lange angepasst, bis die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen des experimentell durchgeführten Draw-Down-Versuches übereinstimmen. Die Reibparameter werden zu

Beginn mit dem Wert 0,1 festgelegt und in 0,1 Schritten erhöht. Abbildung 10 zeigt den Vergleich zwischen Experiment und DEM-Simulation. In Abbildung a) sieht man die mit 40 kg Schotter gefüllte Oberkammer vor Versuchsbeginn, in Abbildung b) den Ablauf des Versuches, während der Massefluss  $\dot{m}_K$  (kg/s) aufgezeichnet wird. In Abbildung c) ist das Versuchsende mit den Winkeln zu sehen. Die Oberkammer zeigt den verbliebenen Masseanteil (%) und den Scherwinkel ( $^\circ$ ) auf der linken und rechten Seite der Kammer. In der Unterkammer ist der Böschungswinkel zu erkennen.

Folgende Werte der DEM-Simulation werden mit den Werten der Messung (Tabelle 3) abgeglichen:

- verbleibender Masseanteil in %
- Massenfluss in kg/s
- Böschungswinkel (Unterkammer) in  $^\circ$
- Scherwinkel (Oberkammer) in  $^\circ$

Die fertige Kalibrierung ergibt nachstehende Werte für die Haft- und Rollreibung der Partikel:

Haftreibung: 0,2    Rollreibung: 0,8

In der Simulation wurde der Zeitschritt beim Kalibriervorgang mit 20% ( $10 \cdot 10^{-7}$  s) festgelegt. Die Materialkennwerte der Kalibrierung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

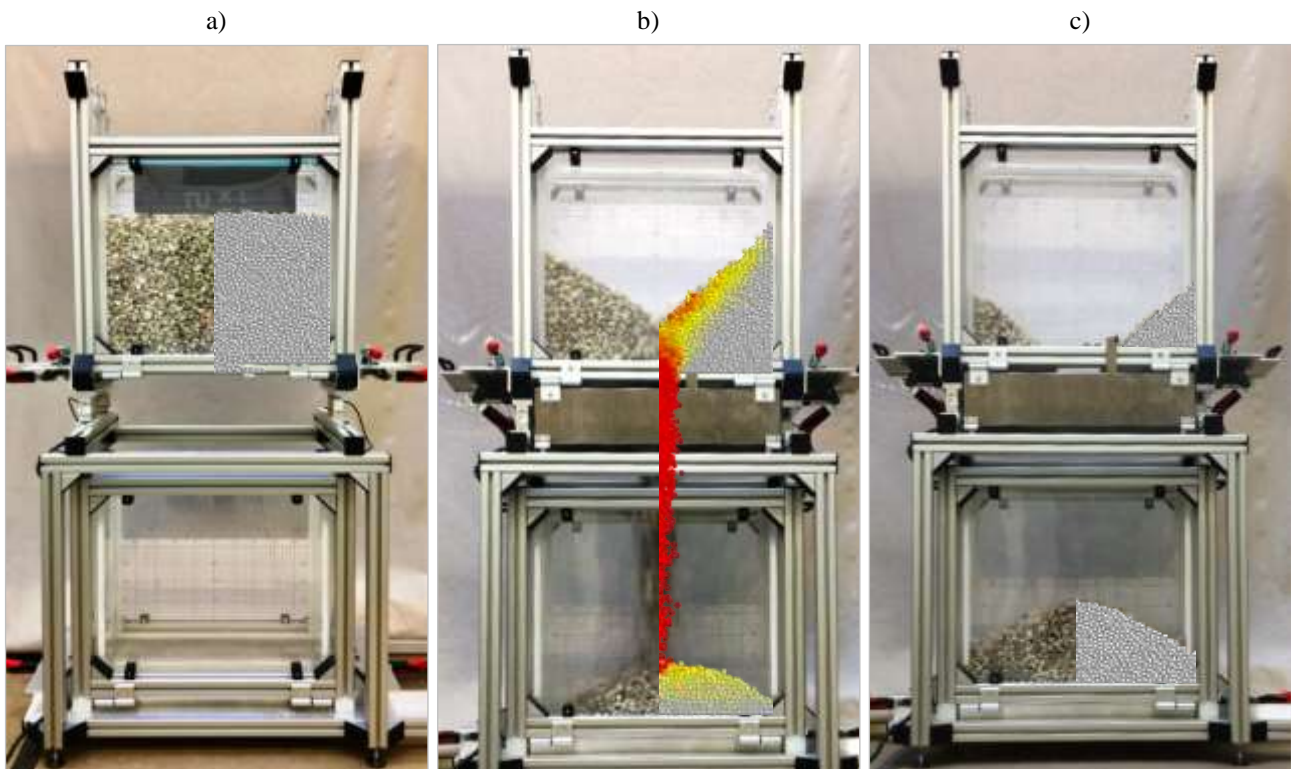


Abbildung 10. Vergleich des Draw-Down-Versuchs (links: Experiment im IKP-Labor, rechts: DEM-Simulation)

Tabelle 4. Kalibrierte Materialkennwerte für die Simulation

Materialkennwerte RK 8/16		
Kennwert	Wert	Einheit
Mittlerer Partikeldurchmesser	12	mm
Elastizitätsmodul Partikel	13-90	GPa
Partikeldichte	2500	kg/m <sup>3</sup>
Restitutionskoeff. P-P	0,275	-
Haftreibung P-P	0,2	-
Rollreibung P-P	0,8	-
Restitutionskoeffizient P-S	0,275	-
Haftreibung P-S	0,375	-
Rollreibung P-S	0,609	-
Poissonzahl Partikel	0,3	-
Porosität	0,39	-
Zeitschritt	20	%

## 6 DRUCKVERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DES ZEITSCHRITTS UND DES E-MODULS

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 12 zeigt den Ausgangspunkt zur Durchführung der Validierung der Simulationsergebnisse. Die Grundlage bilden die in Kapitel 5 ermittelten Materialkennwerte (siehe Tabelle 4). Diese sollen mit einem experimentellen Druckversuch validiert werden. Dabei wird ein mit Schotter befüllter Behälter (Durchmesser: 300 mm, Höhe 300 mm) in einer Universal-Zug/Druck-Prüfmaschine (max. Prüfkraft Zug/Druck 250 kN) mit einer Druckkraft  $F$  belastet, bis sich das Schotterbett um einen Weg  $\Delta s$  verdichtet (siehe Abbildung 11).

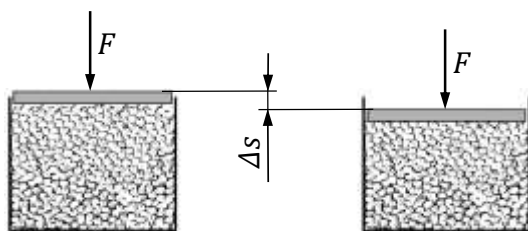


Abbildung 11. Schematischer Ablauf des Druckversuchs

Der im Behälter befindliche Schotter wird kraftgesteuert bis zu einem Wert von 36 kN belastet. Dabei setzt sich das Schotterbett um etwa 4,2 mm (siehe schwarze Linie in Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16). Dieses gemessene Kraft-Weg-Diagramm dient als Referenz für die nachfolgenden Untersuchungen in diesem Kapitel.

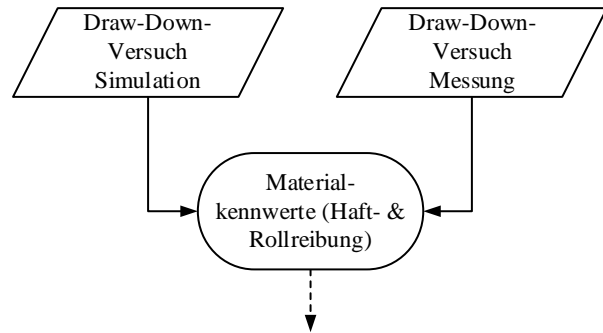


Abbildung 12. Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Materialkennwerte über den Draw-Down-Versuch

Die Ergebnisse der Messung werden in weiterer Folge mit den Ergebnissen der DEM-Simulation verglichen. Dazu wird eine DEM-Simulation des Druckversuchs aufgebaut (siehe Abbildung 13). Wie sich zeigt, weichen die Ergebnisse der DEM-Simulation von den Ergebnissen der Messung zunächst ab, obwohl die vorangegangene Kalibrierung über den Draw-Down-Versuch eine sehr gute Übereinstimmung lieferte. In vielen Simulationen sind Zeitschritt und Elastizitätsmodul nicht entscheidend für die abzubildenden Größen. Oft erfolgt auch eine Reduktion des Elastizitätsmoduls, um Rechenzeiten gering zu halten. In diesem Fall ist sowohl die Wahl des richtigen Zeitschritts, als auch des Elastizitätsmoduls erforderlich.

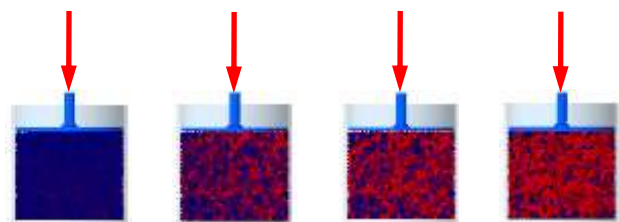


Abbildung 13. Druckversuch mittels DEM-Simulation

### 6.1 ANPASSUNG DES ZEITSCHRITTS

Der für die Simulation des Draw-Down-Versuchs verwendete Zeitschritt von 20% ( $10 \cdot 10^{-7}$  s) war für die korrekte Abbildung des Masseflusses, verbliebenen Masseanteils und des Böschungs- und Scherwinkels gering genug gewählt (siehe Kapitel 5). Dennoch muss an dieser Stelle für die weiteren Simulationen eine Korrektur des Zeitschritts vorgenommen werden. Der Grund dafür liegt im hohen Elastizitätsmodul der verwendeten Schotter-Partikel. Für die richtige Darstellung der Scher- und Böschungswinkel bzw. des Masseanteils und Masseflusses war der Zeitschritt von 20% ausreichend. Hingegen ist er für die korrekte Berechnung der Kontaktkräfte zu groß.

Für den E-Modul war ein Wertebereich der Literatur bekannt. Wie das Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 14 zeigt, weicht die Kurve mit einem Zeitschritt von 20% erheblich von jener der Referenzmessung ab (grau strichlierte Linie). Eine Verringerung des Zeitschritts von den ursprünglichen 20% ( $10 \cdot 10^{-7}$  s) auf 10% ( $5 \cdot 10^{-7}$  s) bringt

eine erwartete Verbesserung, aber noch keine hinreichend genaue Übereinstimmung (blau strichlierte Linie). Zwar hat sich die Kurve besser an die aufgezeichnete Messkurve angenähert, jedoch stimmt der Gradient der Simulation im rechten Teil des Diagramms nicht mit den Werten der Messung zusammen. Eine weitere Verringerung des Zeitschritts auf 5% ( $2,5 \cdot 10^{-7}$  s) verstärkt diesen Effekt und liefert einen noch steileren Gradienten der Kurve (gelb strichlierte Linie). Die zwischen 3 und 3,5 mm auftretenden Schwankungen der Simulations-Kurve sind auf Umordnungsprozesse der Partikel während des Druckversuchs zurückzuführen. Diese zu hohen Gradienten deuten auf einen zu hoch gewählten E-Modul hin. Dessen Korrektur wird in Kapitel 6.2 behandelt.

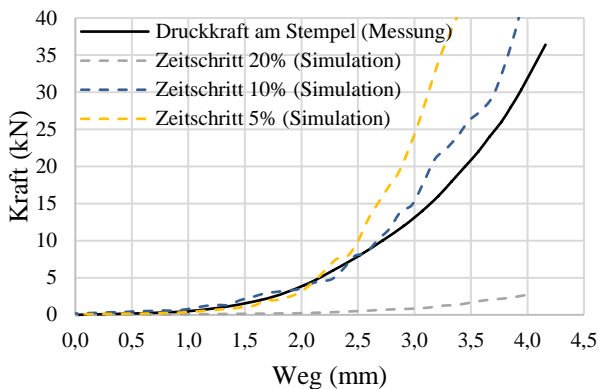


Abbildung 14. Kraft-Weg-Diagramm für unterschiedlich groß gewählte Zeitschritte (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch)

## 6.2 ANPASSUNG DES ELASTIZITÄTSMODULS

Neben dem Zeitschritt musste auch der Elastizitätsmodul der Partikel angepasst werden. Der Gradient der beiden Kurven (Zeitschritt von 10% bzw. 5%) ist wie in Abbildung 14 ersichtlich zu hoch, was – wie bereits in Kapitel 6.1 angemerkt – auf einen zu hohen Elastizitätsmodul hindeutet. Der ursprüngliche Wert des Elastizitätsmoduls wurde daher schrittweise reduziert.

Ausgangspunkt ist der Elastizitätsmodul von 90 GPa (gelb Linie in Abbildung 14 bzw. Abbildung 15). Im Anschluss wird der Elastizitätsmodul auf 50 GPa (grau strichlierte Linie) bzw. 20 GPa (blau strichlierte Linie) reduziert. Vergleicht man diese beiden Kurven mit der Messkurve (schwarze Volllinie) ist zu sehen, dass diese noch immer einen zu hohen Gradienten aufweisen. Legt man den Elastizitätsmodul mit 15 GPa fest, erreicht man eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messkurve (rot strichlierte Linie). Zur Kontrolle wurde auch noch ein Wert von 10 GPa simuliert. Wie erwartet, lieferte diese Kurve einen zu flachen Gradienten (hellgrün strichlierte Linie). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kraft-Weg-Kurve mit einem Elastizitätsmodul von 15 GPa und einem Zeitschritt von 5% ( $6,7 \cdot 10^{-7}$  s) eine gute Übereinstimmung liefert.

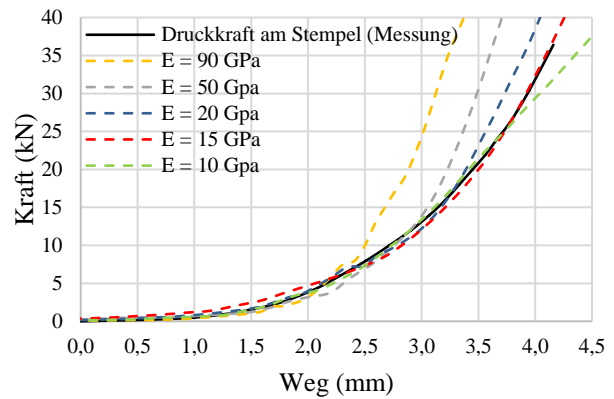


Abbildung 15. Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul (Vergleich Messung/Simulation mittels Druckversuch)

Danach war wiederum zu untersuchen, ob für diesen verringerten Elastizitätsmodul nicht auch ein größer gewählter Zeitschritt richtige Ergebnisse liefert. Deshalb wurde dieselbe Simulation nochmal mit einem Zeitschritt von 10% ( $13,4 \cdot 10^{-7}$  s) und 20% ( $26,8 \cdot 10^{-7}$  s) ausgeführt (siehe Abbildung 16).

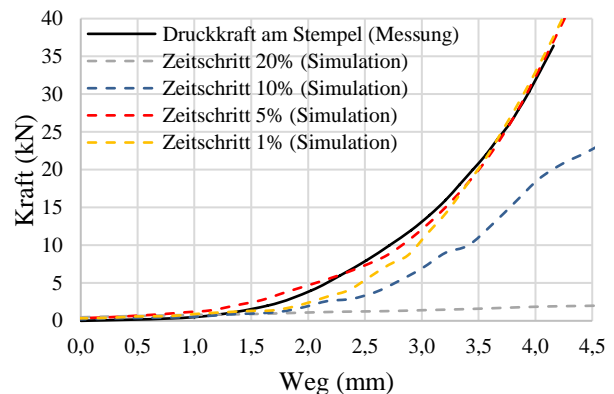


Abbildung 16. Kraft-Weg-Diagramm mit angepasstem E-Modul und Zeitschrittüberprüfung (Vergleich Messung / Simulation mittels Druckversuch)

Die Ergebnisse in Abbildung 16 zeigen, dass diese größer gewählten Zeitschritte mit 20% bzw. 10% wieder zu unzureichend genauen Ergebnissen führen. Auch war es von Interesse wie sich ein geringerer Zeitschritt von 1% ( $1,34 \cdot 10^{-7}$  s) auf die Kraft-Weg-Kurve auswirkt. Wie man sieht, ergibt ein Zeitschritt von 1% (gelb strichlierte Linie) den selben Gradienten wie ein Zeitschritt von 5% (rot strichlierte Linie). Für die weiteren Simulationen wurde daher der Zeitschritt von 5% ( $6,7 \cdot 10^{-7}$  s) gewählt.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Um die geplante Spannungsberechnung in der Schüttung und zwischen Schüttung und Behälterwand durchführen zu können, müssen die Materialkennwerte des Schüttguts bekannt sein. Diese werden aus Erfahrungswerten der Literatur oder experimentellen Versuchen gewonnen. Die

Werte für die Haft- bzw. Rollreibung der Partikel werden mittels Kalibrierung ermittelt. Aktuell gibt es keine Standard-Kalibrieremethode. In diesem Projekt kam der Draw-Down-Versuch zu Anwendung. Dazu wurde eine Kalibriervorrichtung am IKP der TU Wien gefertigt. Die Bestimmung der Reibwerte erfolgte über den Abgleich zwischen DEM-Simulation und Draw-Down-Versuch der Messung. Dazu wurden der Böschungswinkel, der Scherwinkel, der Massefluss und der verbliebene Massenanteil verglichen.

Der E-Modul und der für die Simulation zu verwendende Zeitschritt wurden mittels Druckversuch mit Schüttgut in einem Behälter ermittelt. Bei den meisten DEM-Anwendungen spielt der E-Modul oft eine untergeordnete Rolle. Häufig wird er auch reduziert, um die Rechenzeit zu senken. In diesem konkreten Anwendungsfall muss der korrekte E-Modul in der DEM-Simulation verwendet werden, da er ausschlaggebend für den Spannungsanstieg in der Schüttung bzw. der Behälterwand ist. Eine passende Wahl des Zeitschritts und des Elastizitätsmoduls sind entscheidend für die korrekte Berechnung der Spannungen.

Das Ablaufdiagramm aus Abbildung 12 wird auf folgende Form vervollständigt (Abbildung 17). Zusammenfassend beschreibt dieses erweiterte Ablaufdiagramm einen vollständigen Prozess zur Ermittlung sämtlicher Parameter, die für die Spannungsberechnung erforderlich sind.

## 8 AUSBLICK

Mit den gezeigten Ergebnissen liegen nun alle erforderlichen Eingangsgrößen für die folgende Spannungsberechnung vor. Mit dem in [MKH20], [MKH20] erstellten DEM-Modell und den nun bestimmten Materialkennwerten sollen in weiterer Folge die thermo-mechanischen Spannungen unterschiedlicher Wärmespeicher-Geometrien berechnet werden. Durch den Vergleich dieser thermo-mechanischen Spannungen mit den zulässigen Spannungen von Schüttung und Behälterwand kann in weiterer Folge eine Aussage über eventuelle Schädigungen von Schüttungen bzw. Behälterwänden gemacht werden.

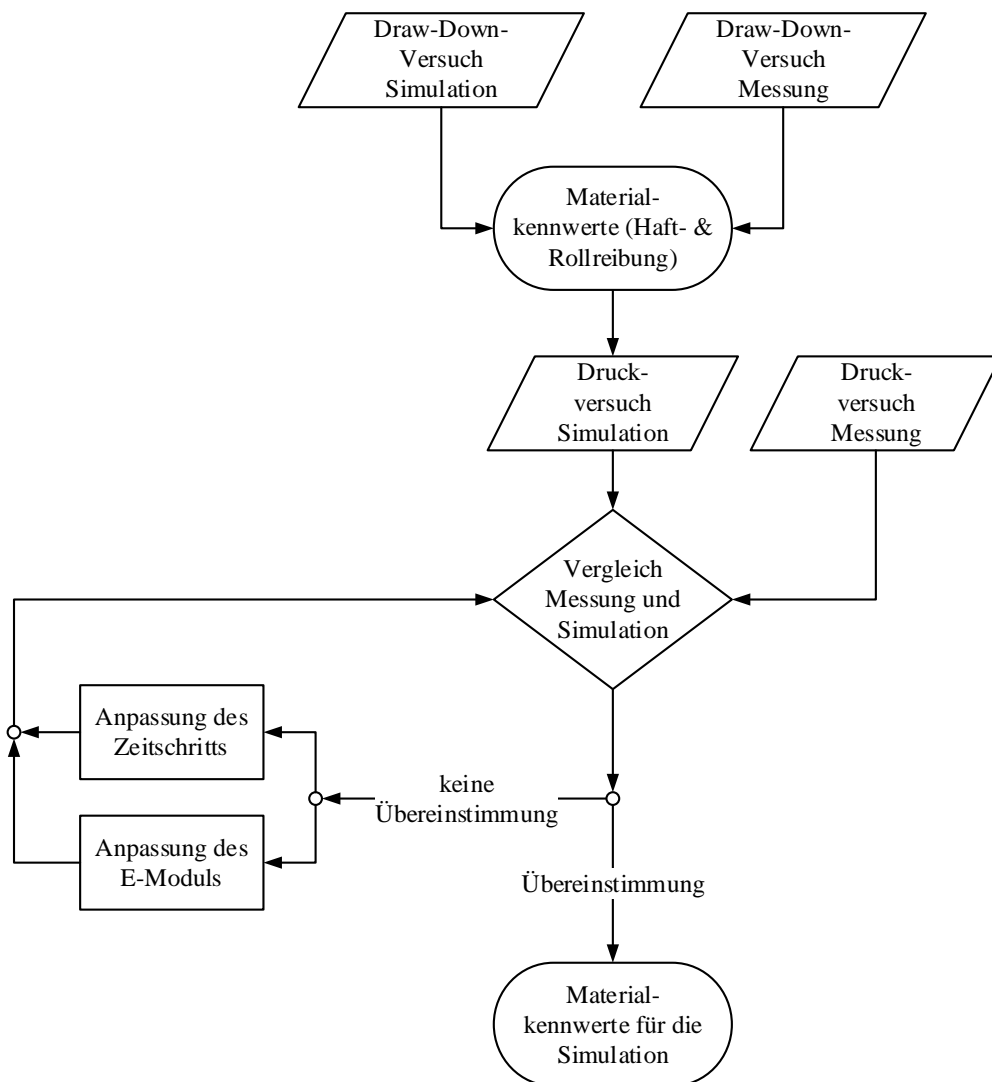


Abbildung 17. Erweitertes Ablaufdiagramm zur Ermittlung sämtlicher Parameter für die Spannungsberechnung



## LITERATUR

- [Bli85] BLIGHT, G. E.: *Temperature changes affect pressures in steel bins*. In: International Journal Bulk Solids Storage in Silos Bd. 1 (1985), Nr. 3
- [Coe17] COETZER, C. J.: *Calibration of the discrete element method*. In: Powder Technology Bd. 310 (2017), S. 104–142
- [DZM13] DREISSIGACKER, V. ; ZUNFT, S. ; MÜLLER-STEINHAGEN, H.: *A thermo-mechanical model of packed-bed storage and experimental validation*. In: Applied Energy Bd. 111 (2013), S. 1120–1125
- [LP06] LAPKO, A. ; PRUSIEL, J. A.: *Analysis of thermal effects in grouped silos of grain elevators*. In: International agrophysics Bd. 20 (2006), Nr. 4, S. 301–30
- [MKH20] MITTERLEHNER, THOMAS ; KARTNIG, GEORG ; HAIDER, MARKUS: *Effiziente Festbett-Wärmespeicher - Analyse von thermischen Spannungen mit Hilfe von DEM-Simulationen*. In: Technische Logistik Bd. 1 (2020), Nr. 2, S. 42–44
- [MKH20] MITTERLEHNER, THOMAS ; KARTNIG, GEORG ; HAIDER, MARKUS: *Analysis of the thermal ratcheting phenomenon in packed-bed thermal energy storage using Discrete Element Method*. In: FME Transactions Bd. 48 (2020), Nr. 2, S. 427–431
- [RRK19] ROESSLER, THOMAS ; RICHTER, CHRISTIAN ; KATTERFELD, ANDRÉ ; WILL, FRANK: *Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials—part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations*. In: Powder Technology Bd. 343 (2019), S. 803–812
- [Sas18] SASSINE, NAHIA et al.: *Numerical analysis of granular bed behavior in thermocline storage tank and bed/wall interactions*. In: . Bd. 2033 : AIP Publishing LLC, 2018 — ISBN 978-0-7354-1757-1
- [Sas18] SASSINE, NAHIA ; et al.: *Thermal stress numerical study in granular packed bed storage tank*. In: Granular Matter Bd. 20 (2018), Nr. 3, S. 44
- [SSS10] SINGH, HARMEET ; SAINI, R. P. ; SAINI, J. S.: *A review on packed bed solar energy storage systems*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews Bd. 14 (2010), Nr. 3, S. 1059–1069
- [Yag09] YAGIZ, SAFFET: *Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer*. In: Bulletin of engineering geology and the environment Bd. 68 (2009), Nr. 1, S. 55–63
- [ZBL93] ZHANG, Q. ; BRITTON, M. G. ; LEITGEB, J. M.: *Thermally induced pressures in an on-farm grain storage bin*. In: Canadian Agricultural Engineering Bd. 35 (1993), Nr. 1, S. 51–56
- [Zha11] ZHANG, XIAO-PING et al.: *Engineering properties of quartz mica schist*. In: Engineering geology Bd. 121 (2011), Nr. 3–4, S. 135–149
- [Zhu10] ZHU, TIEYUAN: *Some useful numbers on the engineering properties of materials (geologic and otherwise)*. In: Retrieved July Bd. 23 (2010), S. 2012

---

**Dipl.- Ing. Thomas Mitterlehner**, Universitätsassistent am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung an der Technischen Universität Wien

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Georg Kartnig**, Professor am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Leiter des Instituts Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung an der Technischen Universität Wien

Adresse: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/307, 1060 Wien, Österreich  
Telefon: +43-1-58801-30754  
E-Mail: thomas.mitterlehner@tuwien.ac.at, georg.kartnig@tuwien.ac.at

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Markus Haider**, Professor am Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Leiter des Instituts Energietechnik und Thermodynamik an der Technischen Universität Wien

Adresse: Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien, Österreich  
Telefon: +43-1-58801-30208  
E-Mail: markus.haider@tuwien.ac.at