

Dipl.-Ing. Martin R. Bierer, Lindau

Temperaturschwingungen zur Bestimmung von Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringkoeffizient nicht durchströmter Schüttungen

Grundlage des vorgestellten Meßverfahrens ist das instationäre Temperaturverhalten eines einseitig unendlich ausgedehnten Zylinders (der Schüttung), an dessen stirnseitiger Grenzfläche eine periodische Temperaturänderung in Form einer Kosinusschwingung aufgeprägt wird. Sowohl aus der Amplitudenabnahme als auch aus der Phasenverschiebung der sich in der Schüttung fortpflanzenden Schwingung läßt sich die effektive Temperaturleitfähigkeit der Schüttung ermitteln. Als Erweiterung der Meßmethode wird der Schüttung eine Referenzschicht vorgelagert und die zeitliche Änderung der Temperaturen an beiden Seiten dieser Schicht gemessen. Sowohl aus der Amplitudenabnahme als auch aus der Phasenverschiebung an der Referenzschicht kann – bei bekannten thermophysikalischen Eigenschaften der Referenzschicht – der effektive Wärmeeindringkoeffizient der Schüttung bestimmt werden. Aus den beiden ermittelten Größen kann die Wärmeleitfähigkeit und die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität der Schüttung berechnet werden. Außerdem sind Aussagen über den Kontaktwiderstand an der Grenzfläche zwischen Referenzschicht und Schüttung möglich. Die durchgeführten Messungen an einer nicht durchströmten Schüttung aus Quarzsand dienen zur Bestätigung der Eignung des Meßprinzips.

KURZFASSUNG

BIERER, Martin R. :

Temperaturschwingungen zur Bestimmung von Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringkoeffizient nicht durchströmter Schüttungen

Grundlage des hier vorgestellten Meßverfahrens ist das instationäre Temperaturverhalten eines einseitig unendlich ausgedehnten Zylinders (der Schüttung), an dessen stirnseitiger Grenzfläche eine periodische Temperaturänderung in Form einer Kosinusschwingung aufgeprägt wird. Durch Temperaturmessung in definierten Abständen von dieser Grenzfläche kann an jedem Ort in der Schüttung ebenfalls ein kosinusförmiger Temperaturverlauf erfaßt werden. Dieser ist jedoch, abhängig vom Abstand zur Grenzfläche, gedämpft und phasenverschoben zur anregenden Schwingung. Sowohl aus der Amplitudenabnahme als auch aus der Phasenverschiebung läßt sich die effektive Temperaturleitfähigkeit a_s der Schüttung ermitteln.

Als Erweiterung der beschriebenen und seit langem bekannten Meßmethode wird der Schüttung eine Referenzschicht aus Edelstahl vorgelagert und die zeitliche Änderung der Temperaturen an beiden Seiten dieser Schicht gemessen. Die an der Referenzschicht auftretende Amplitudenabnahme und die Phasenverschiebung zwischen den beiden gemessenen Temperaturschwingungen stellen ein Maß für den von der Schüttung aufgenommenen Wärmestrom dar. Folglich kann — bei bekannten thermophysikalischen Eigenschaften der Referenzschicht — zusätzlich der effektive Wärmeeindringkoeffizient b_s der Schüttung bestimmt werden.

Aus den beiden ermittelten Größen a_s und b_s kann überdies sehr einfach die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_s und die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität $(\rho c)_s$ der Schüttung berechnet werden. Zusätzlich ermöglichen die an der Grenzfläche zwischen Referenzschicht und Schüttung auftretenden Effekte eine Aussage über den Kontaktwiderstand R an dieser Stelle.

Inhalt dieser Arbeit ist die detaillierte Beschreibung dieses erweiterten Temperaturschwingungsverfahrens. Aufbauend auf dem mathematischen Hintergrund und den einzuhaltenden Randbedingungen werden die Grundidee und die praktische Ausführung einer Meßapparatur erläutert. Die durchgeführten Messungen an einer nicht durchströmten Schüttung aus Quarzsand dienen zur Bestätigung der Eignung des Meßprinzips. Bei den Messungen wurde die Mitteltemperatur der Temperaturschwingung sowie das Füllgas und dessen Druck variiert. Zur Bewertung des Verfahrens werden die Meßergebnisse mit Literaturwerten, mit Meßwerten eines anderen Meßverfahrens und mit berechneten Werten aus einem theoretischen Modell verglichen. Abschließend werden die wesentlichen Vor- und Nachteile des Meßverfahrens diskutiert. Eine umfassende Fehlerbetrachtung mit der Angabe von erreichten und durch Modifikationen erreichbaren Meßgenauigkeiten runden die Beschreibung ab.

ABSTRACT

BIERER, Martin R. :

Temperature-oscillations for the determination of thermal diffusivity and heat-absorption coefficient of porous media

The presented measurement technique is based on applying a periodic (sinusoidal) temperature oscillation to the front side of a semi-infinite cylinder. The thermophysical properties of the cylinder (for example a packed bed of porous medium) are obtained by monitoring the non-stationary response within the cylinder. The temperature variations measured in fixed distances from the front side are sinusoidal oscillations as well. Depending on the distance from the boundary the amplitude of the measured oscillation decreases and the phase shift increases. Both the amplitude decrement and the phase shift permit to calculate the effective thermal diffusivity a_S of the porous medium.

By adding a reference layer (for example a stainless steel plate) underneath the porous medium an expansion of the described and well established measurement technique is suggested. The amplitude decrement and the phase difference between the measured temperature oscillations on both sides of the reference layer indicate the heat flux entering the porous medium placed above. Thus, if the thermophysical properties of the reference layer are known, the heat-absorption coefficient b_S of the porous medium can be determined.

Based on the evaluated properties a_S and b_S the thermal conductivity λ_S and the volumetric heat capacity $(\rho c)_S$ can easily be obtained. A least squares fit of the amplitudes at several measurement points leads to an exponential decrement-curve. By extrapolating this decrement curve, the boundary temperature can be calculated and compared to the measured one. From the existing temperature leap at the boundary and the contemporary appearing phase leap the contact resistance R between reference layer and porous medium can be estimated.

The contents of this work is the detailed description of this extended measurement technique. Based on the mathematical background and the required boundary conditions the conception and the realisation of a measurement apparatus is described. The practical experiments with a packed bed of fine quartz sand show the suitability of the proposed method. During the measurements the mean temperature of the oscillations, the applied gas and the pressure of the gas phase are varied. To verify the measurement results the resulting data are compared to experimental results reported by other authors, to the results of an alternative measurement method (testing the same medium) and with calculations based on a theoretical model. Finally the main advantages and disadvantages of the suggested method are discussed. A comprehensive discussion of the measurement errors including information on the achieved accuracy and the possible improvements by means of different modifications complete the presentation.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Inhaltsverzeichnis	V
Nomenklatur	VII
Kurzfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
2 Verfahren zur Bestimmung thermophysikalischer Stoffgrößen	3
3 Temperaturschwingungen zur Ermittlung thermophys. Stoffgrößen	6
3.1 Grundlagen und Definitionen	6
3.2 Untersuchungen von Ängström	10
3.3 Grundprinzip des vorgeschlagenen Versuchsaufbaus	11
4 Theoretische Grundlagen des vorgestellten Meßverfahrens	14
4.1 Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit	14
4.2 Bestimmung des Kontaktwiderstandes	18
4.3 Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten	23
4.4 Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität	28
4.5 Überblick	28
5 Sinnvolle Grenzen zur Einhaltung der theoretischen Randbedingungen	30
5.1 Vom einseitig unendlich ausgedehnten Körper zur endlichen Schütthöhe	30
5.2 Vom Einschwingvorgang zum quasistationären Zustand	34
5.3 Von der ebenen Platte zum Zylinder	36
6 Versuchsaufbau	42
6.1 Konstruktive Ausführung des Versuchsbehälters	42
6.2 Erzeugung der Erregerschwingung	44
6.3 Regelung von Temperierwasserkreislauf und Schutzheizung	48
6.4 Meßanordnung	50
6.5 Anlagendruck und Sicherheitseinrichtungen	51
6.6 Eigenschaften des Referenzmaterials	51
7 Durchführung und Auswertung der Versuche	54

	Seite
8 Versuchsergebnisse mit Quarzsand	65
8.1 Eigenschaften des Meßgutes	65
8.2 Gemessene Stoffgrößen (Temperaturleitfähigkeit, Wärmeeindringkoeffizient und Kontaktwiderstand)	67
8.3 Berechnete Stoffgrößen (Wärmeleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität)	74
9 Bewertung der Versuchsergebnisse mit Quarzsand	76
9.1 Vergleich mit Literaturangaben	76
9.2 Berechnung	77
9.3 Vergleich mit einer anderen Meßmethode	78
10 Fehlerbetrachtung	81
10.1 Randbedingungen	81
10.2 Meßfehler	81
10.3 Unsicherheit in der Temperaturleitfähigkeit	85
10.4 Unsicherheit im Kontaktwiderstand	87
10.5 Unsicherheit im Wärmeeindringkoeffizient	90
10.6 Unsicherheit in der Wärmeleitfähigkeit und der vol. Wärmekapazität	94
10.7 Unsicherheiten - Überblick	95
11 Bewertung des Meßverfahrens	96
11.1 Anwendungsgebiete, Vorteile, Nachteile	96
11.2 Möglichkeiten zur Verbesserung und Vereinfachung	97
12 Zusammenfassung	98
Anhang	101
- A - Schema zur Lösung homogener Differentialgleichungen mit Hilfe komplexer Temperaturen	102
- B - Ermittlung der Integrationskonstanten	106
- C - Quasistationäre Lösungen für ebene Platten	110
- D - Quasistationäre Lösungen für Zylinder	112
- E - Theoretisches Berechnungsmodell; Eigenschaften der Füllgase	114
Literaturverzeichnis	116