

Wärmeübertragungseigenschaften innovativer Porenmaterialien für die solare Kraftwerkstechnik und Spin-Off Anwendungen

Thomas Fend, Oliver Reutter, Jörg Sauerhering, Robert Pitz-Paal

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Technische Thermodynamik, Linder Höhe, 51147 Köln, thomas.fend@dlr.de

Die Durchströmung von erhitzten Porenmaterialien im Hinblick auf eine Anwendung als Luftreceiver in solarthermischen Kraftwerken wird seit ca. 20 Jahren mit steigender Intensität weltweit wissenschaftlich untersucht [1][2]. Ein bedeutender Meilenstein dieser Technologie wird in naher Zukunft mit dem Bau des solaren Versuchskraftwerks Jülich, das die dortigen Stadtwerke betreiben werden, erreicht sein. In der Anwendung „solarer Luftreceiver“ wird ein Porenmaterial durch hochkonzentrierte Solarstrahlung auf Temperaturen bis 1300° erhitzt. Umgebungsluft wird durch das Porenmaterial gesaugt und speist als Heißgas anschließend den Abhitzeessel eines Dampfturbinenprozesses (Abb.1). Der zusätzliche Betrieb eines thermischen Speichers ermöglicht einen ausschließlich solaren Betrieb des Kraftwerks. Das Porenmaterial nimmt in dieser Anwendung eine Doppelfunktion als Absorber und Wärmeübertrager wahr. Je höher die Wärme übertragende Oberfläche bei gleichzeitig hoher Porosität ist, desto effektiver arbeitet der Receiver.

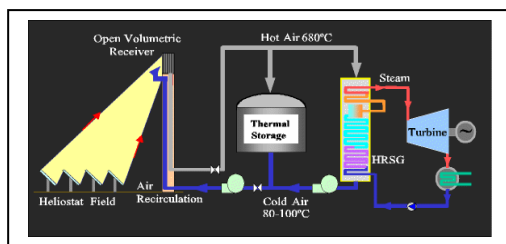


Abb. 1: Prinzip eines solarthermischen Kraftwerks mit Luftreceiver

Ebenfalls von entscheidender Bedeutung für das Betriebsverhalten eines Luftreceivers sind die thermophysikalischen Größen, die Permeabilität und das konvektive Wärmeübertragungsverhalten des verwendeten Porenmaterials. Die Auslegung des Receivers sowie die Berechnung des Wärmeertrages erfordern die Kenntnis der genannten Materialgrößen, die in der Regel nicht vorliegen. Das DLR hat sich daher in der Vergangenheit intensiv mit der experimentellen Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, die in diesem Beitrag eine besondere Rolle spielen, sowie weiterer für den Prozess relevanter Größen wie Permeabilität, Absorptivität und Extinktion beschäftigt. Bei der Berechnung der Wärmeertrages wie auch bei der Messung werden die genannten

Größen als effektive, volumengemittelte Größen aufgefasst. Das bedeutet, dass die bei der Wärmeübertragung beteiligten Einzelmechanismen auf Porenebene wie Wärmetransport durch Strahlung, Wärmeleitung im Festkörpergerüst und Wärmeleitung im unbewegten Fluid zu einer effektiven Wärmeleitfähigkeit zusammengefasst werden, mit der dann wie in einem homogenen Körper gerechnet werden kann. Effektive Ruhewärmeleitfähigkeiten ausgewählter Porenmaterialien sind in der Tabelle zusammengefasst. Sie zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit teilweise - abhängig von der Porenstruktur - erheblich abweicht von dem Wert, den man aufgrund des Festkörperanteils erwarten würde.

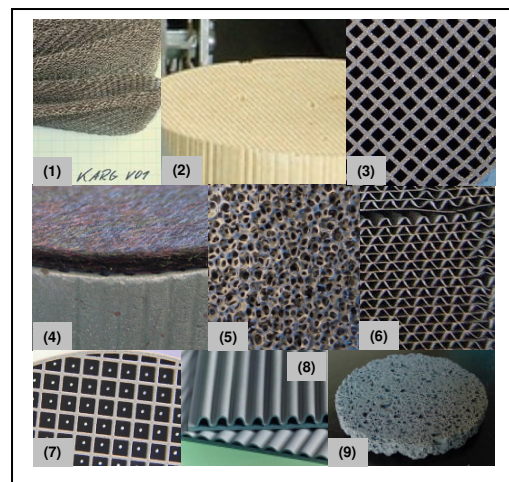


Abb. 2: Als solarer Luftreceiver eingesetzte Porenmaterialien (1-7), Folienkeramik (8) als Partikelfilter und Metallschaum für die poröse Brennkammerwand (9). Im Einzelnen: (1) Draht- bzw. (2) Keramikfasergestrick, Parallelkanalmonolithen aus Cordierit (3) und Siliziumcarbid (4), keramische Schäume (5), metallische Foliensubstrate (6) sowie dreidimensionale mittels Siebdrucktechnik hergestellte keramische Strukturen (7)

Zudem hängt auch die Wärmeleitfähigkeit der dichten keramischen Materialien extrem von den Sinterbedingungen und der genauen chemischen Zusammensetzung ab, so dass kaum auf Literaturwerte zurückgegriffen werden kann.

Die (effektive) Wärmeleitfähigkeit spielt bei Wärmeübertragungsvorgängen in Porenmaterialien eine besondere Rolle, weil sich ein hoher Wärmetransport senkrecht zur Hauptströmungsrichtung stabilisierend auf die Strömung auswirkt. Das Auftreten von Strömungsinstabilitäten, das eine Zeit lang ein nicht unbedeutendes Problem in der konzentrierenden Solartechnik war, kann so durch die Auswahl von Materialien mit geeigneten thermophysikalischen Eigenschaften vermieden werden [3]. Insbesondere begünstigt eine dreidimensionale innere Geometrie, wie man sie beispielsweise in keramischen Schäumen findet, einen Wärmetransport senkrecht zur Strömungsrichtung (Quervermischung). Aufgrund dieses Mischeffektes betrachtet man die effektive Wärmeleitfähigkeit als strömungsabhängige Größe, die eine axiale und eine radiale Komponente besitzt. Die Messung dieser strömungsabhängigen Beiträge erfolgt in Anlehnung an bei Schüttungen angewendeten Techniken [4].

Als Luftreceiver sind bislang eine ganze Reihe von Porenmaterialien zum Einsatz gekommen (vgl. Abb. 2.), mehrheitlich sind dies Materialien, die für andere Anwendungen optimiert wurden. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes SOLPOR sind auch Materialien speziell für die Anwendung Solarreceiver entwickelt worden, beispielsweise eine Mehrschichtanordnung aus einem feinzelligen (80 ppi) Material kombiniert mit einem grobzelligen (20 ppi). Für das genannte Demonstrationskraftwerk in Jülich kommt ein aus der Katalysatortechnik bekanntes extrudiertes Siliciumcarbid zum Einsatz, das hinsichtlich Betriebssicherheit und Langlebigkeit sicherlich optimiert ist, bezüglich Wirkungsgrad hingegen deutliches Optimierungspotential besitzt.

Porenmaterialien haben auch jenseits der Anwendung als Receiver/Wärmeübertrager ihre Bedeutung in einer Reihe von innovativen technischen Anwendungen, bei denen ähnliche physikalische Vorgänge eine Rolle spielen. Als Beispiele seien die poröse Brennkammerschindel, mit der Kühlluft in die Brennkammer eingeleitet wird, und der Dieselpartikelfilter genannt [5][6][7]. Im ersten Fall wird der Einsatz eines auf der Basis des Schlicker-Schaum-Sinter-Verfahrens hergestellten Metallschaums diskutiert, der die Vorteile einer offenporigen Struktur mit günstigen Wärmeübertragungseigenschaften vereint. Zusätzlich lässt er sich gut durch Schweißen mit den übrigen Elementen der Brennkammerwand verbinden. Kombiniert mit einer Wärmedämmschicht, die mit feinen Kühlluftbohrungen versehen ist, lässt er deutlich höhere Gastemperaturen in der Brennkammer zu, so dass der Wärme-Kraft-Prozess effektiver gefahren werden kann. Die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften des Schaums ermöglicht es, den Kühlprozess genauer zu berechnen und damit die Brennkammerschindel gezielter hinsichtlich äußerer und innerer (Poren-) Geometrie auszulegen.

Innovative Dieselpartikelfilter werden in einem weiteren laufenden Projekt untersucht. Hier sollen dünnwandige Platten auf der Basis der keramischen Folietechnik zum Einsatz kommen. Insbesondere die Berechnung der Wärmetransportvorgänge während der Regeneration, bei der das Problem der Strömungsinstabilitäten auch auftreten kann, erfordern auch hier eine genaue Kenntnis der thermophysikalischen und Permeabilitätseigenschaften des Materials.

Weitere aktuelle Anwendungen im Bereich der Abgastechnik wie beispielsweise die Mischung des Abgases vor Eintritt in den Katalysator werden diskutiert. Der Einsatz keramischer Schäume oder anderer Porenmaterialien, die eine Durchströmung in alle Richtungen ermöglichen, verspricht eine bessere Ausnutzung des Katalysatorvolumens [8].

Tabelle 1: effektive Ruhewärmeleitfähigkeit (Raumtemperatur) ausgewählter Porenmaterialien im Vergleich mit den Werten des analogen dichten Materials

Material	ϵ %	T_{max} °C	λ_{eff} W/mK	λ_{dicht} W/mK
Cordierit-Kat.	69	1100	0.2	≈ 1
SiSiC-Kat.	51	1300	35	≈ 140
Hast.-Schaum	82.5	950	0.31	11.3
SSiC-Schaum	76	1600	0.5	≈ 100
CBSiC-Schaum	76	1300	0.2	≈ 10

Literatur

[1] Fricker, H., Bull. SEV/VSE, 76, pp. 10-16
 [2] Fend, Th. et al., *Solar Radiation Conversion*, in: Scheffler, M. and Colombo, P. (Eds.): *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005
 [3] Becker, M. et al. *Solar Energy* Vol. 80 Issue 10 pp. 1241-1248, 2006
 [4] Decker, S. et al., *Detailed Experimental Characterization and Numerical Modelling of Heat and Mass Transport Properties of Highly Porous Media for Solar Receivers and Porous Burners*, Sixth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment (Clean Air VI), Vol. 2, Paper 22.2, Porto, Portugal, 9-12 July 2001.
 [5] Sauerhering et al., *Temperature Dependency of the Effective Thermal Conductivity of Nickel Based Metal Foams*, Proceedings of ASME ICNMM2006, Paper No. ICNMM2006-96136, 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, June 19-21, 2006, Limerick, Ireland
 [6] Fend et al., *Gas Flow in Hot Porous Materials: The Solar Air Receiver and Spin-Off Applications*, Proceedings of ASME ICNMM2006, Paper No. ICNMM2006-96173, 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, June 19-21, 2006, Limerick, Ireland
 [7] Reutter et al., *Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop in Porous Metal Foams*, Proceedings of ASME ICNMM2006, Paper No. ICNMM2006-96135, 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, June 19-21, 2006, Limerick, Ireland
 [8] Brück and Maus, *Die Zukunft der heterogenen Katalyse im Automobil: Turbulente Katalysatoren für Otto- und Dieselanwendungen*, 26. Int. Motorensymposium, Wien