

NEUE ANWENDUNGSGEBIETE FÜR WÄRMEROHRE

NEW APPLICATION AREAS FOR HEAT PIPE TECHNOLOGY

J. Pause, M. Beckmann
Institut für Energietechnik, TU Dresden

Einleitung

Für die Steigerung der Effizienz von thermischen Prozessen sollen neuartige keramische Wärmerohr-Wärmeübertrager entwickelt werden, um diese zukünftig zur Abwärmenutzung aus Industrieprozessen einzusetzen, wo bisher aggressiv oder abrasiv wirkende Atmosphären und Temperaturen über 1000 °C den Einsatz metallischer Wärmeübertrager nicht zulassen. Durch Erhöhung der Eintrittstemperatur in den Wärmeübertrager besteht die Möglichkeit zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen. Weiterhin ist eine Verringerung der Baugröße im Gegensatz zu konventionellen metallischen Wärmeübertragern möglich. Wärmerohre sind aufgrund ihrer kompakten Bauform und der Möglichkeit einer einfachen wärmeelastischen Lagerung besonders für diesen Einsatzzweck geeignet. Für die zu entwickelnden keramischen Wärmerohre wurden Verbrennungs- und Vergasungsatmosphären mit großem Abwärmepotenzial identifiziert: Biomassevergasung, Abwärmenutzung aus der Gichtgasverbrennung (Hochofenprozess), sowie die Anwendung innerhalb eines Schwefelsäurelod-Prozesses zur Generierung von Wasserstoff.

Funktionsprinzip und prinzipieller Aufbau von Wärmerohren

Das Wärmerohr ist ein geschlossenes evakuiertes Rohr mit einer Kapillarstruktur an der Innenwand, welche mit einem flüssigen Arbeitsmedium gesättigt ist. Entsprechend der Funktion unterscheidet man zwischen drei Zonen (Abbildung 1):

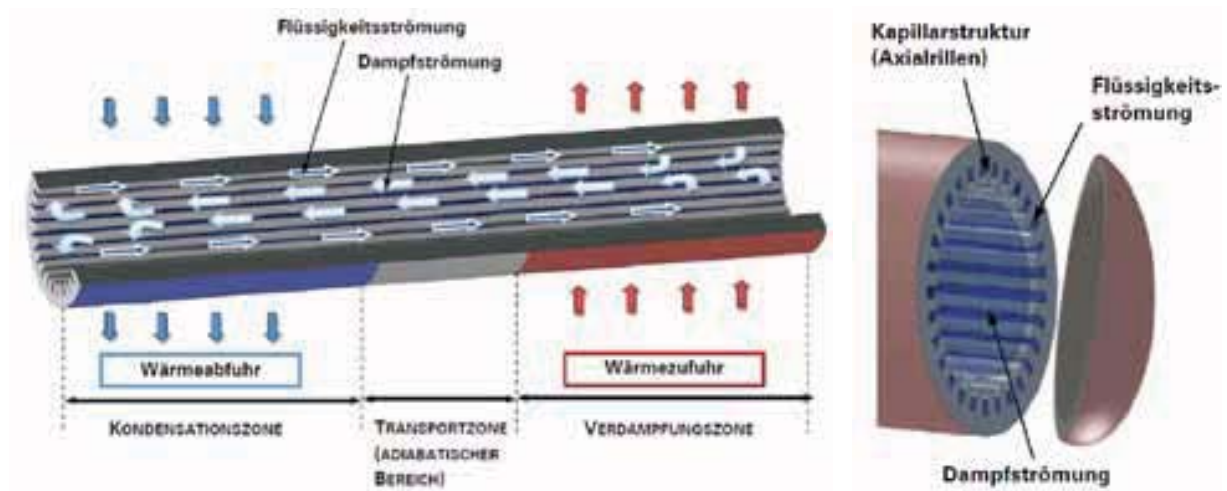


Abbildung 1: Schema eines Wärmerohrs.

1. In der Verdampfungszone wird dem WR Energie zugeführt. Das Arbeitsmedium verdampft aus den Kapillaren heraus und strömt axial durch
2. die Transportzone, die gegen die Umgebung wärmeisoliert ist, weiter zur
3. Kondensationszone, in der die Wärme abgeführt wird. Das dampfförmige Arbeitsmedium kondensiert und gibt seine latente Verdampfungswärme ab [1]

Je nach Arbeitsmedium können Wärmerohre in einem weiten Temperaturbereich angewendet werden. Für den Hochtemperaturbereich kommen Flüssigmetalle, wie Kalium, Natrium, Lithium oder Silber in Frage. Die Kapillarstruktur innerhalb des Wärmerohres dient zur Rückführung des kondensierten Arbeitsmediums in die Verdampfungszone (Wärmezufuhr). Hierbei kann es sich um verschiedenste Strukturformen, wie z.B. Metallnetze, -filze, gesinterte Metallpulver, Axialrillen, Ringspalte oder Arterien handeln.

Die innere Übertragungsleistung eines Wärmerohres wird durch folgende Leistungsgrenzen beschränkt:

- Kapillarkraftgrenze
- Schallgeschwindigkeitsgrenze
- Siedegrenze
- Wechselwirkungsgrenze und
- Viskositätsgrenze

Beispielhaft sind diese Grenzen für ein Wärmerohr mit folgenden Parametern:

- Material: SiSiC
- Arbeitsmedium: Natrium
- Kapillarstruktur: Ringspalt
- Gesamtlänge: 2,5 m
- Außendurchmesser: 0,05 m
- Lage: vertikal

in der Abbildung 2 aufgezeigt. Begrenzt durch die Wechselwirkungs- und Siedegrenze beträgt die Wärmestromdichte hier ca. 640 kW/m².

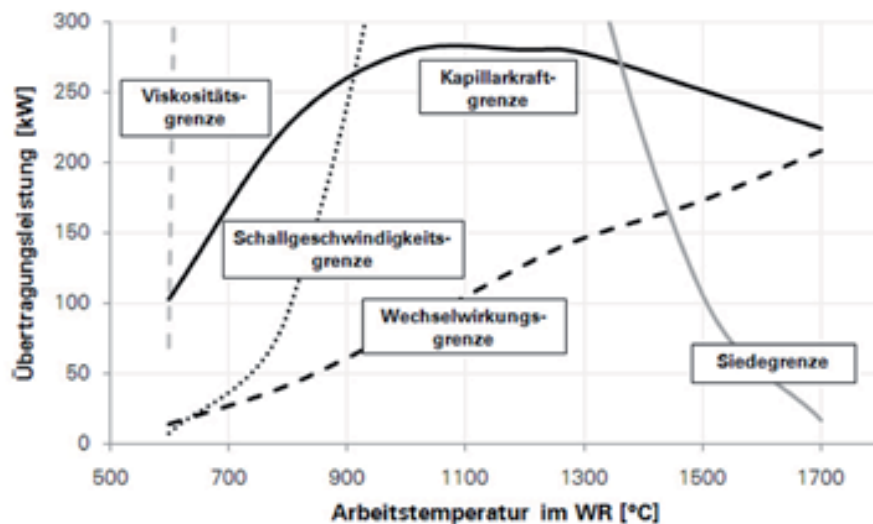


Abbildung 2: Leistungsgrenzen eines SiSiC-Na-Wärmerohrs.

Neue Anwendungsgebiete von Wärmerohren

Konventionelle metallische Wärmerohre finden Einsatz in verschiedensten Anwendungsgebieten, wie zum Beispiel zur Kühlung von Bauteilen, für Satellitenanwendungen, zur Stabilisierung des Permafrostbodens an der Alaskapipeline oder zur Wärmerückgewinnung von Abluft- und Abgasströmen. Ein großes Einsatzgebiet für keramische Wärmeübertrager eröffnet sich jedoch hinsichtlich der Auskopplung von Hochtemperaturwärmen aus aggressiven und korrosiven Atmosphären, da metallische Wärmeübertrager diesen Bedingungen nicht standhalten können. Für die Ausführung der keramischen Wärmerohre kommt Siliciumcarbid aufgrund seiner adäquaten Materialeigenschaften zum Einsatz (vgl. *Werkstoffauswahl für den Wärmeübertrager*).

Für den Einsatz der keramischen Wärmerohre wurden konkrete Prozesse aus den Bereichen: regenerative Energieanwendungen, Grundstoffindustrie und

Kernergietechnik ausgewählt. Stellvertretend für diese Bereiche seien folgende drei Prozesse genannt:

- Biomassevergasung
- Winderhitzung für den Hochofenprozess
- Schwefelsäure-Iod-Prozess

Diese Prozesse werden in Tabelle 1 anhand der wesentlichen Parameter charakterisiert und im Folgenden kurz in Verbindung mit der Anwendung eines Wärmerohres beschrieben.

Tabelle 1: Anforderungen an die Einsatzbedingungen der ausgewählten Prozesse.

Parameter	Anforderungen an die Einsatzbedingungen		
	Biomassevergasung	Winderhitzung (Hochofenprozess)	Schwefelsäure-Iod-Prozess
Werkstoff	SiSiC	SiSiC	SSiC
Wärmeübertragung zwischen	Siphon (heißes Rohgas + Sand) und Kühlluft	Abgas aus der Verbrennung von Gichtgas (heiß) und Kühlluft	Helium (heiß) und Schwefelsäure, Iodwasserstoff
Temperaturen	800 – 850 °C	1100 – 1300 °C	950 °C
Atmosphäre	abrasiv, korrosiv	korrosiv	korrosiv
Hauptbestandteile	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , Sand	CO ₂ , NO _x , SO ₂ , H ₂ O, CO	H ₂ SO ₄ , HI
Spurenbestandteile	Alkali-, Halogenverbindungen	Staub, Schwermetalle	

Bei der Anwendung von keramischen Wärmerohren im Zusammenhang mit der Biomassevergasung sei hier beispielhaft die Entkopplung von Wärme aus einem Siphon einer zirkulierenden Wirbelschichtanlage (ZWSA) vorgestellt.

Für die zurzeit im Aufbau befindliche, zirkulierende Wirbelschicht-Versuchsanlage (Abbildung 4) wurde ein Siphon (Abbildung 3) entwickelt [2]. Dieser dient zur Materialförderung von dem Fallrohr der ZWSA zurück in die Brennkammer, sowie zur Vermeidung der Gasleckage von der Brennkammer direkt in den Zyklon. Die Besonderheit des Siphons besteht darin, dass er mit einem Fließbettkühler zur

Entkopplung von Wärme kombiniert ist. Die Wärmeabfuhr wird zunächst über ein wassergekühltes metallisches Rohrbündel realisiert.

In dem Fließbettkühler herrschen aufgrund der Fluidisierung des Bettmaterials stark abrasive und durch die Gasatmosphären auch korrosive Bedingungen. Daher soll auch hier der Einsatz von Wärmerohren anstelle der wassergekühlten metallischen Rohrbündel getestet werden (Abbildung 5). Die Kühlung der Wärmerohre erfolgt über einen Luftstrom zur Luftvorwärmung oder mit Dampf zur weiteren Überhitzung.

<p>Abbildung 4: Zirkulierende Wirbelschicht-Versuchsanlage [2].</p>	<p>Abbildung 3: Fließbettkühler mit Siphon [2].</p>
	<p>Abbildung 5: Integration von keramischen Wärmerohren in den Siphon.</p>

Darüber hinaus werden Wärmerohre bereits in der allothermen Vergasung zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt. Der in [3] beschriebene Heatpipe-Reformer besteht aus einem Wirbelschichtvergaser im oberen und einer Wirbelschichtfeuerung im unteren Teil. Die Natrium-Inconel-Wärmerohre befinden sich vertikal in beiden Bereichen, um Wärme aus der Verbrennung von Koks (Verdamp-

fungszone) in den oberen Teil, der allothermen Vergasung (Kondensationszone) einzutragen. Aufgrund der Entstehung von korrosiv und abrasiv wirkenden Gasatmosphären bei der Wirbelschichtvergasung bzw. -verbrennung von Biomasse ist der Einsatz von Wärmerohren aus SiC-Materialien auch hier vorstellbar.

In einer Hochofenanlage (Abbildung 6) wird aus oxidischen Erzen Roheisen erzeugt. Zunächst wird der Hochofen mit Eisenerz, Koks und Zuschlägen von oben schichtweise beschickt, heiße Luft (Wind) wird eingeblasen, welche mit dem Koks zu CO_2 und CO reagiert. Durch das entstandene Kohlenmonoxid wird das Eisenerz reduziert, wodurch Roheisen entsteht. Die Bereitstellung von Heißwind erfolgt konventionell durch sogenannte Winderhitzer oder auch Cowper, die im Inneren mit feuerfesten Silikatsteinen gitterartig ausgemauert sind. Diese werden abwechselnd von heißem Abgas aus der Verbrennung von Gichtgas und vorzuwärmender Luft durchströmt (Regeneratorprinzip).

Hier eröffnet sich ein neues Anwendungsgebiet hinsichtlich des Einsatzes eines keramischen Wärmerohr-Wärmeübertragers. Dabei können die 2 bis 3 Winderhitzer einer Hochofenanlage durch einen keramischen Wärmerohr-Rekuperator kompensiert werden.

Der Schwefelsäure-Iod-Prozess verfolgt das Ziel Wasser in seine molekularen Teilbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zur Nutzungsbereitstellung zu zerlegen. In 2 Kreisläufen (Abbildung 7) werden parallel aus dem zugeführten Wasser, sowie den Zusatzstoffen Iod und Schwefeldioxid über chemische Reaktionen die Zwischenprodukte Wasserstoffiodid und Schwefelsäure gebildet.

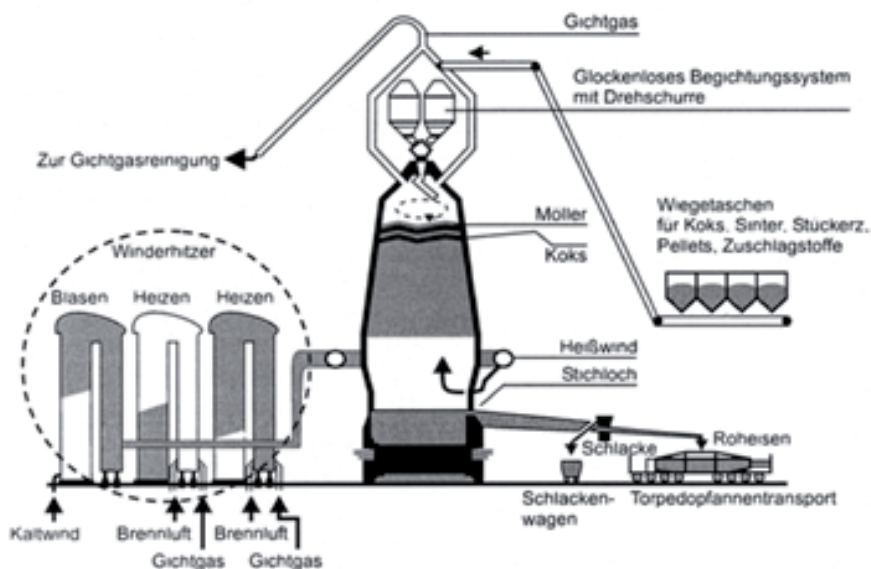


Abbildung 6: Prinzipielle Darstellung einer Hochofenanlage mit Winderhitzern [4].

Teilreaktionen des Schwefelsäure-Iod-Prozesses [5]:

1. Bunsenreaktion (bei 120 °C)

$$9 \text{I}_2 + \text{SO}_2 + 16 \text{H}_2\text{O} \rightarrow (2 \text{HI} + 10 \text{H}_2\text{O} + 8 \text{I}_2) + (\text{H}_2\text{SO}_4 + 4 \text{H}_2\text{O})$$
2. $2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$ (bei 220 – 450 °C)
3. $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$ (bei 850 – 900 °C)

Um diese Zwischenprodukte aufzuspalten muss den beiden Prozessen jeweils Energie in Form von Wärme zugeführt werden. Für die Bereitstellung dieser Prozesswärme eignen sich zum Beispiel nukleare Kraftwerksprozesse. Die korrosive Schwefelsäure und die gleichzeitig hohen Temperaturen bieten eine vielversprechende Einsatzmöglichkeit für korrosionsresistente keramische Wärmerohr-Wärmeübertrager.

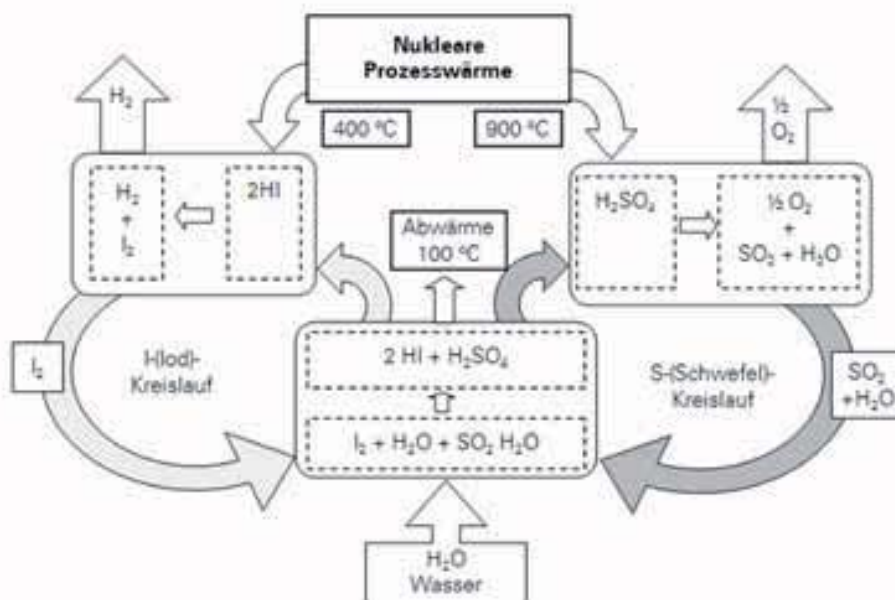


Abbildung 7: Funktionsweise des Schwefelsäure-Iod-Prozess (nach [5]).

Werkstoffauswahl für den Wärmeübertrager

Als Konstruktionsmaterial für die Wärmeröhre eignen sich in Bezug auf die durch die Anwendungsfälle gegebenen Prozessbedingungen insbesondere SiSiC und SiSiC. Diese Siliciumcarbide unterscheiden sich in ihren Materialeigenschaften, gegenübergestellt in Tabelle 2, aufgrund des Herstellungsverfahrens. Während es sich bei SiSiC um drucklos gesintertes Siliciumcarbid handelt, wird beim SiSiC ein Formkörper aus Siliciumcarbid und Kohlenstoff mit metallischem Silicium infiltriert.

Tabelle 2: Materialeigenschaften von SSiC und SiSiC [6].

Materialeigenschaften	Siliciumcarbid	
	SSiC	SiSiC
Wärmeleitfähigkeit (30 - 100 °C) [W/(mK)]	40 - 120	110 – 160 40 bei 1000 °C
Temperaturwechselbeständigkeit	$\Delta T=350K$	$\Delta T=550K$
Spezif. Wärmekapazität (30 - 600 °C) [J/(kgK)]	600 - 1000	650 - 1000
Max. Einsatztemperatur [°C]	1400-1600	1380
Thermischer Ausdehnungskoeffizient (30 – 600 °C) [$10^{-6} K^{-1}$]	4 - 4,8	4,3 - 4,8
Biegefestigkeit [MPa]	300 – 600 450 bei 1400 °C	180 – 450 200 bei 1400 °C
E-Modul [GPa]	370 - 450	270 - 350

SSiC besitzt durch seinen speziellen mineralogischen Aufbau hervorragende Hochtemperatur-Eigenschaften und ist in sauerstoffreicher Umgebung bis 1600 °C einsetzbar. Das Material ist ebenfalls in reduzierender Atmosphäre anwendbar, solange die SiO₂ Schutzschicht nicht zerstört wird. SiSiC hingegen kann durch das zusätzliche elementare Silicium nur bis Temperaturen von 1380 °C eingesetzt werden, bietet dafür wiederum eine minimale Porosität und niedrige Leckraten. Infolge der hohen Dichtigkeit ist das Material noch korrosionsbeständiger als SSiC selbst. Nach [7] bietet SiSiC zusätzlich hohe Abrasionsbeständigkeit, hohe mechanische Festigkeit und sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit sowie eine hohe Schlackeresistenz und die höchste Wärmeleitfähigkeit der SiC-Systeme.

Fertigung von Heat Pipes

Wie in [8] beschrieben kann die Befüllung und das Verschließen von konventionellen Wärmerohren aus metallischen Werkstoffen entsprechend dem Fließschema der Abbildung anhand der ersten Schritte durchgeführt werden.

Der wesentliche Unterschied und die Herausforderung bei keramischen Werkstoffen besteht darin, eine geeignete Verschlusstechnik für die Wärmerohre einzusetzen. Mit einem speziellen Lotsystem werden die SiC-Bauteile – Rohr und Verschlusskappe – mittels Laserfügeverfahrens (siehe Abbildung 9) miteinander verbunden [9].

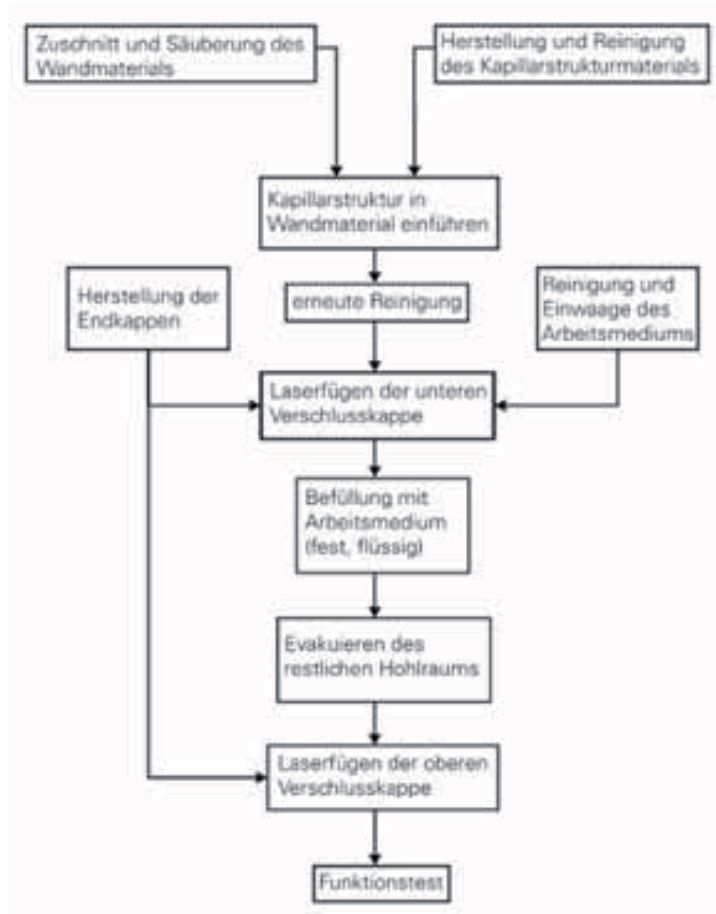


Abbildung 8: Fließschema zur Herstellung von Wärmerohren.

Das Lotmaterial sollte dabei folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Realisierung einer dauerhaft, mechanisch und thermisch belastbaren Verbindung von SiC-Bauteilen
- möglichst geringer Energieeintrag (Laser), um das Lot in eine fließfähige Form zu überführen
- Benetzungsfähigkeit des Lots zur Konstruktionskeramik
- Resistenz gegenüber hohen Temperaturen, schnellen Lastwechseln und korrosiven Medien
- Kompatibilität mit dem entsprechenden SiC-Werkstoff

Nach dem Verschließen der unteren SiC-Endkappe mittels Laserfügeverfahrens, wird das Arbeitsmedium (in fester oder auch in flüssiger Form) eingefüllt. Der Vorgang des Befüllens ist einer Handschuhbox unter inerter Atmosphäre durchzuführen, dabei muss das Arbeitsmedium möglichst kontaminationsfrei eingebracht werden, um nichtkondensierbare Gase zu vermeiden. Nach dem Befüllen



Abbildung 9: Versuchsstand zum Laserfügen (Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik, TU Dresden).

erfolgt das Evakuieren des Rohres, sowie das Verschließen der oberen SiC-Endkappe mit dem lotbasieren Laserfügeverfahren.

Literatur

4. Groll, M. und Zimmermann, P. Das stationäre und instationäre Betriebsverhalten von Wärmerohren. Stuttgart : Wärme- und Stoffübertragung, Bd. 4 (1971) S. 39-47; Springer-Verlag, 1971.
5. Čech, M. Entwicklung einer zirkulierenden Wirbelschicht-Versuchsanlage mit einem neuartigen Siphon. TU Dresden : s.n., wird demnächst veröffentlicht.
6. Karl, J., Schmitz, W. und Hein, D. Allotherme Wirbelschichtvergasung - Möglichkeiten zur Realisierung des Wärmeeintrags in Wirbelschichten. Lehrstuhl für Thermische Kraftanlagen, Technische Universität München : s.n.
7. Bosse, P. Mathematisches Hochofenmodell zur Untersuchung der Austauschbarkeit von Koks durch ersatzreduktionsmittel. Technische Universität Clausthal : s.n., 2003.
8. Schulenberg, T., et al. Was ist Generation IV? FZ Karlsruhe. Karlsruhe : s.n., 2004.
9. Industrie, Verband der Keramischen. Brevier Technische Keramik. s.l. : Fahner Verlag, 1999.
10. Morgenstern, U. Feuerfeste Spezialmassen für Ersatzbrennstoff- und Biomasse-Verbrennungsanlagen - das Dünnschicht SiSiC-Plattensystem. s.l. : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010.
11. Chi, S.W. Heat Pipe Theorie and Practice - a Sourcebook. s.l. : Hemisphere Publishing Corporation, 1976.

12. Lippmann, W., et al. Laser Beam Joining of Non Oxidic Ceramics for Ultra High Temperature Resistant Joints. 45th Annual Meeting INMM, Orlando, USA : s.n., 2004.



**Dieses Projekt wird finanziert
aus Mitteln der Europäischen
Union und des Freistaates Sachsen**

Europa fördert Sachsen.

