

## Mehr als 30 Jahre Wärmetransporteigenschaften am IKE

Rüdiger Brandt

Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme,  
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, ruediger.brandt@ike.uni-stuttgart.de

Mitte der 60-Jahre arbeitete das IKE im Verbund mit einem Firmenkonsortium an einem Projekt des damaligen Bundesforschungsministeriums, mit dem Ziel, die nukleare Energieversorgung von Satelliten mit Hilfe eines thermionischen Wandlers zu realisieren. Zu dessen Auslegung war die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien bei hohen Temperaturen notwendig, und die gab es in der Literatur nicht. Auch waren keine Apparaturen verfügbar, die bei Temperaturen bis 2000 °C zu messen in der Lage waren.

Daher wurde damit begonnen, Apparaturen zur Messung des Emissionsgrades und der Temperaturleitfähigkeit aufzubauen. Die Messmethode zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit war damals ganz neu, denn erst im Jahre 1960 hatte ein Herr Cowan von den Los Alamos Laboratories dazu eine Theorie vorgeschlagen: Man beheizt eine kleine, scheibenförmige Probe auf einer Stirnfläche mit einem in seiner Intensität modulierten Elektronenstrahl. Misst man dann die Phasenverschiebungen der daraus resultierenden Temperaturschwankungen der Probenvorder- und Rückseite gegenüber der Heizungsmodulation, so kann daraus die Temperaturleitfähigkeit bestimmt werden. Für die am IKE entwickelte Apparatur wurde zur Heizung der Probe jedoch statt Elektronenstrahl das Licht einer Xenon-Bogenlampe (Kinolampe) ausgewählt. Diese Apparatur ist noch heute erfolgreich im Einsatz, wobei im Laufe der Jahre alles - bis auf die Heiztechnik - z.T. mehrmals auf den neuen Stand der Technik gebracht werden musste, was sich - vor allem durch moderne Datenerfassung - auf die Verringerung von Messzeiten und Messunsicherheiten auswirkte. Außerdem konnte der Messbereich durch neue Sensoren zu tieferen Temperaturen erweitert werden [1].

Um auch an größeren und mehrphasigen Proben messen zu können, konnten 1990 aus Investitionsmitteln der Universität zwei kommerzielle Apparaturen zur Messung der Wärmeleitfähigkeit eingerichtet werden: ein Plattengerät (Guarded Hot Plate), das als Absolutverfahren arbeitet und für schlecht leitende Werkstoffe im Temperaturbereich von 0°C bis 650 °C geeignet ist, und eine Apparatur, die nach dem Vergleichsverfahren arbeitet und für mittlere bis gute Wärmeleiter bis zu 1000 °C betrieben werden kann.

Zur Simulation von Giess- und Erstarrungsprozessen in der Giesserei-Industrie wird u.a. die Wärmeleitfähigkeit der Gusswerkstoffe, auch im schmelzflüssigen Zustand benötigt. Die direkte Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schmelzen ist schwierig, da diese dafür in einem Tiegel gehalten werden müssen, und die Messung der Temperaturgradienten der Schmelze im Tiegel außerordentlich schwierig ist. Im Rahmen eines DFG-Vorhabens, bei dem der Einfluss der Zusammensetzung von binären und

ternären AlSi-Legierungen auf deren Wärmeleitfähigkeit untersucht wurde, haben wir daher entschieden, den spezifischen elektrischen Widerstand nach der klassischen 4-Pol-Methode zu messen und daraus mit Hilfe des Wiedemann-Franz-Lorentz-Gesetzes die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Die stabförmige Probe von 5 bis 6 mm Ø und ca. 100 mm Länge ist in ein keramisches Tiegelrohr eingeschlossen (s. Abb.1). Über die beweglichen Stromelektroden wird ein Strom von einigen Ampere durch die Probe geschickt, und mit 2 ebenfalls beweglichen Spannungselektroden wird der Spannungsabfall  $\Delta U$  in der Probe gemessen und daraus der elektrische Widerstand berechnet.

Zur Heizung in Vakuum oder Schutzgas bis zu 1600 °C wird ein Rohröfen über das Rohr gefahren. Mit dieser Anordnung kann der Widerstand sowohl beim

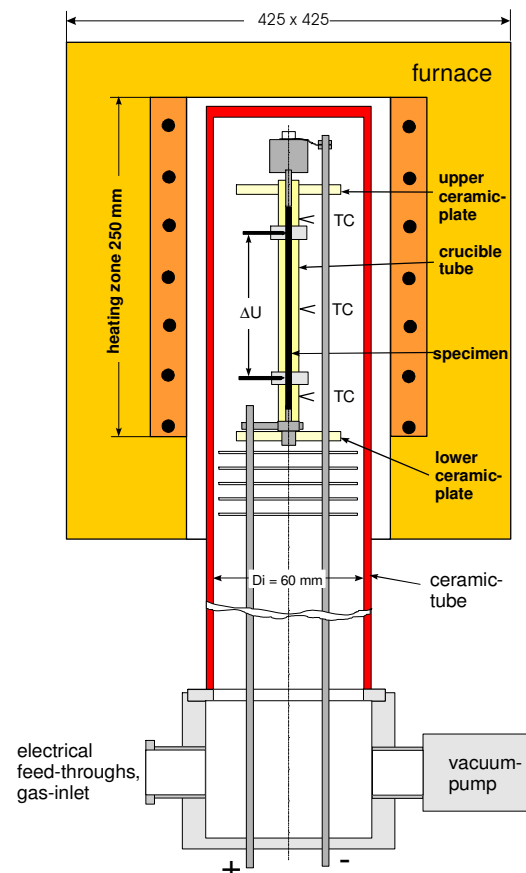


Abb. 1: Schematische Anordnung zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Metallschmelzen nach der 4-Pol-Methode

Aufschmelzen als auch beim Wiedererstarren gemessen werden [2].

Als kerntechnisches Institut standen am IKE natürlich die Wärmetransporteigenschaften von Reaktormaterialien immer im Mittelpunkt. Nach Abschluss der Untersuchungen der Materialien für den nuklearen Thermionikreaktor wurden u.a. folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Wärmeleitfähigkeit und Emissionsgrad von UO<sub>2</sub>. Ausgangspunkt einer Studie war der sog. „Sternenhimmel“ in den „Blue Books“ von Touloukian, der eine Streuung in der Wärmeleitfähigkeit von UO<sub>2</sub> von über 2 Größenordnungen anzeigt. Die Studie wurde 1976 von Prof. Touloukian für eine Publikation von CINDAS ins Englische übersetzt. Die von IKE empfohlene Kurve wurde auf internationalen Konferenzen viel diskutiert [3].
- Auswirkung der Zugabe von Gadoliniumoxid zum Kernbrennstoff UO<sub>2</sub>.
- Einfluss der durch Korrosion verursachten Zirkonoxid-schichtbildung auf den Hüllrohren, die den Wärmetransport vom Brennstoff zum Wasser behindert [4].
- Wärmetransport im Spalt zwischen Brennstoff und Hülle [5].

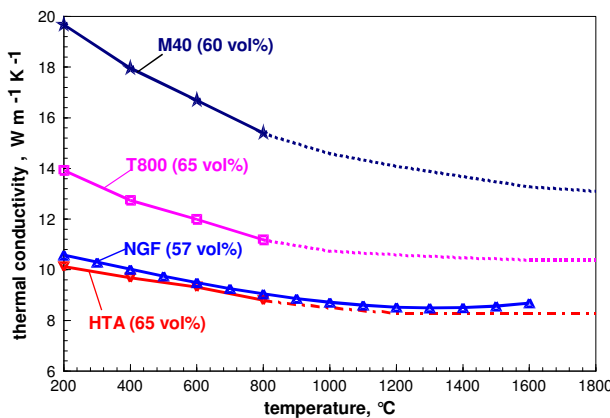


Abb. 2: Einfluss des Fasertyps auf die Wärmeleitfähigkeit von C/C-SiC Verbundwerkstoffen (hergestellt beim DLR Stuttgart)

Ein weiterer Schwerpunkt der letzten Jahre im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs war die Untersuchung der Wärmetransporteigenschaften von Faserverbundwerkstoffen für Hochtemperatur - Anwendungen in der Raumfahrt, die vor allem in Zusammenarbeit mit dem DLR Stuttgart durchgeführt wurden (s. Abb. 2) [6].

Dem Test von Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Apparatur dienten erfolgreiche Teilnahmen an mehreren internationalen und nationalen Ringversuchen, auch an den Ringversuchen des Arbeitskreises [7]. Wichtig war die Teilnahme an einem EU-Projekt, das die Zertifizierung von Pyroceram 9606 als Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsstandard zum Ziel hatte. Abb. 3 zeigt das Ergebnis der Temperaturleitfähigkeitsmessungen, die sehr gut übereinstimmen. Bei den Wärmeleitfähigkeitsergebnissen sind die Diskrepanzen etwas größer. Der Zertifizierungsbericht ist bei

der EU noch in Bearbeitung und wird ebenso wie die Referenzproben hoffentlich bald verfügbar sein.

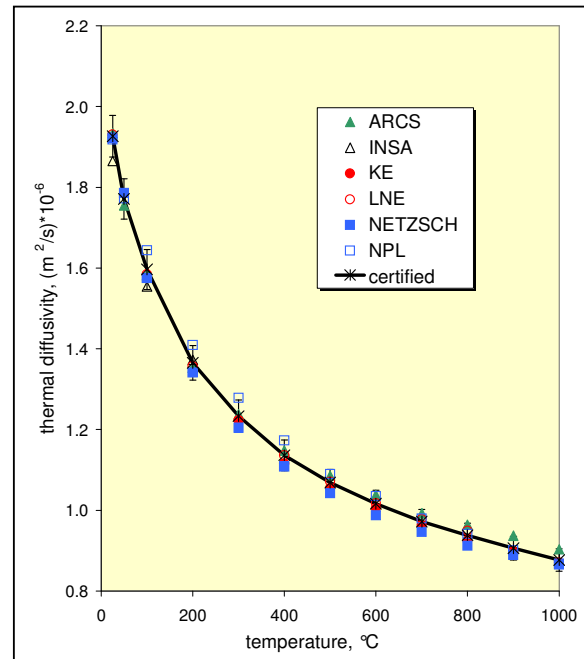


Abb.3: Temperaturleitfähigkeit von Pyroceram 9606, gemessen von den Teilnehmern des EU- Zertifizierungsprojektes (KE = eigene Messungen, ARCS = Österreichisches Forschungszentrum, Seibersdorf, INSA = Centre de Thermique de Lyon, LNE = Laboratoire National d'Essais, Trappes, NETZSCH = Netzsch Gerätebau, Selb, NPL = National Physical Laboratory, Teddington)

## Literatur

- [1] Brandt, R. und G. Neuer: The Thermal Diffusivity of Solids - Analysis of a Modulated Heating-Beam Technique. *High Temp.-High Pressures* **11** (1979), 59-68
- [2] Brandt R., G. Neuer: Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Pure Aluminum and Aluminum Alloys up to and above the Melting Temperature, *International Journal of Thermophysics*, **27**, 2007, ISSN 0195-928X (Print) 1572-9567 (Online)
- [3] Brandt, R., G. Haufner und G. Neuer: Thermal Conductivity and Emittance of Solid UO<sub>2</sub>. - A Critical Review Analysis of the Literature. Translation Editor: Y.S. Touloukian, Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis (CINDAS), West Lafayette, USA, 1976
- [4] Brandt, R. und G. Neuer: Messung von Wärmetransporteigenschaften mit Hilfe eines instationären Verfahrens. *Brennstoff-Wärme-Kraft* **33** (1981), 108-112
- [5] Neuer, G. und R. Brandt: Wärmetransporteigenschaften von Brennstäben in Leichtwasserreaktoren. In: Kraftwerke 1985. VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. Essen (1985), 592-597
- [6] Brandt R., M. Frieß, G. Neuer: Thermal conductivity, specific heat capacity, and emissivity of ceramic matrix composites at high temperatures. *High Temp.-High Pressures* **35/36** (2003/2004) 169-177
- [7] Brandt, R. und G. Neuer: Standard Reference Materials to Test Thermal Diffusivity Measurement Equipments. *Measurement* **2** (1984), 114-120