

Schlüsselwörter: Wärmeleitfähigkeit · Nanofluide · keramische Partikel

Nanofluide sind eine relative neue Option, den Wärmetransport in thermofluid-mechanischen Apparaturen durch gezielte Steigerung der Wärmeleitfähigkeiten zu verbessern. Hierzu werden Partikel von 20 bis 200 Nanometern einem Basisfluid beigemischt. Im Beitrag wird von Experimenten mit Nanofluiden auf der Basis von Wasser und keramischen Nanopartikeln zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit berichtet. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass in Abhängigkeit von der Menge der beigemischten Partikel und deren Stoffeigenschaften die Wärmeleitfähigkeit teilweise deutlich erhöht werden kann.

Nanofluids – Better than water?

Keywords: thermal conductivity · nanofluids · ceramic particles

Nanofluids are a comparatively new option to enhance heat transfer. Within here we report new experiments to determine thermal conductivity of water based nanofluids with ceramic nanoparticles. It is found that the thermal conductivity can be enhanced sometimes significantly.

Autoren



M. Nikolaus,
HTW-Dresden
Chemieingenieurwesen/
Verfahrenstechnik



Dr. rer. nat. Steffen Feja,



Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Matthias H. Buschmann,
Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden

Nanofluide – Besser als Wasser?

Einleitung

Energie ist in Zeiten knapper werdender Ressourcen ein kostbares Gut. Sollen Transport, Übertragung und Speicherung so effektiv wie möglich erfolgen, so sind innovative Ideen gefragt. Stehen thermofluidmechanische Fragestellungen im Vordergrund, sind es zumeist überströmte Oberflächen bzw. durchströmte Kanäle, die durch Formgebung und Oberflächenstrukturierung optimiert werden (siehe z.B. Pohl et al. [12]). Ziel ist es, den konvektiven Impulsaustausch und mit ihm den Wärme- und Stofftransport anzufachen. Die Fähigkeit des Wärmeträgers Wärme zu leiten, bleibt davon unberührt. Schon seit langem gibt es daher Versuche, zumeist durch Beimengung von Partikeln auch die Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten zu erhöhen (Das et al. [3]). Dies ist jedoch eine Reise zwischen Scylla und Charybdis. Mengt man zum Beispiel Wasser mikro- bis millimetergroße Partikel bei, treten neben den positiven gewünschten Effekten nachteilige Erscheinungen wie Sedimentation und damit Verblockung von Kanal- und Rohrleitungssystemen, abrasiver Verschleiß und damit kürzere Lebensdauern einzelner Komponenten, nichtnewtonsches Fließverhalten sowie überproportional gesteigerte Druckverluste auf.

Ein aktueller Trend der Thermofluidmechanik versucht den genannten negativen Effekten durch Beimengung immer kleinerer Partikel zu begegnen (Kabelac & Kuhnke [7]; Das & Choi [4]; Godson [5]). Die Größenordnung der Partikel von 20 bis 200 Nanometern ist namensgebend für diese neue Klasse von Flüssigkeiten den *Nanofluiden*. Diese *Zwergenflüssigkeiten*, wie die wortgetreue Übertragung des an das Lateinische angelehnten Begriffs Nanofluid (*nanus* lat. der Zwerg und *fluid* lat. die Flüssigkeit) lauter würde, sind natürlich auch nicht problemfrei. Der Untersuchung ihrer stofflichen Eigenschaften und der daraus folgenden Ableitung von Anwendungsgebieten wendet sich ein Forschungsthema der ILK Dresden gGmbH zu.

Nanofluide

Nanofluide bestehen aus einem Basisfluid und den sogenannten Nanopartikeln. Zumeist handelt es sich bei dem Basisfluid um Wasser. Es wurden aber bereits auch Un-

tersuchungen mit Ethylen / Glykol, Toluol, diversen Ölen (Özerinç [11]) sowie R-134a (Tetrafluorethan) (Henderson et al. [6]) als Basisfluid bekannt. Nanopartikel können prinzipiell in drei Gruppen eingeteilt werden. Zum ersten sind dies keramische Materialien wie Aluminium-, Kupfer- und Siliziumoxyd, zum zweiten reine Metallpartikel (Kupfer, Silber, Gold u.a.) und zum dritten Nanoröhren (Nanotubes) also langgestreckte Moleküle aus Kohlenstoffatomen. Während Nanoröhren im Basisfluid wahrscheinlich dreidimensionale Netzwerke und damit Wärmebrücken ausbilden (Liao & Liu [8]), liegen keramische und metallische Nanopartikel im Basisfluid eher vereinzelt vor. Die Volumenkonzentrationen der Partikel im Basisfluid sind mit wenigen Zehntel bis zu drei, vier Prozent eher als klein einzuschätzen. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass infolge der vergleichsweise hohen Dichten der Materialien der Nanopartikel die Massenanteile derselben in den Suspensionen mit teilweise bis zu 30% deutlich höher liegen. Nanofluide können daher nicht nur eine gesteigerte Wärmeleitfähigkeit aufweisen, sondern nahezu alle Stoffeigenschaften (eingeschlossen Dichte und Viskosität) sind deutlich verschieden vom Basisfluid. Es kommt nun darauf an Nanofluide zu finden, bei denen der Vorteil einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit nicht durch eine überproportionale Steigerung z.B. der Viskosität konterkariert wird. Dies gilt insbesondere für Anwendungen, bei denen die Pumpleistung bedeutsam ist. Trotz der hohen Aufmerksamkeit, die Nanofluide in der internationalen Fachliteratur in den letzten Jahren erfuhren, bestehen erhebliche Unsicherheiten im Bezug auf die fundamentalen Effekte, welche die beobachteten Steigerungen der Wärmeleitfähigkeit verursachen. Bereits vor 130 Jahren entwickelte J.C. Maxwell (1881) die sogenannte *effective medium theory*. Nach dieser Theorie übersteigt die Wärmeleitfähigkeit eines Nanofluids mit gleichförmig dispergierten sphärischen Partikeln die des Basisfluids entsprechend des zugesetzten Volumenanteils an Nanopartikeln sowie der Wärmeleitfähigkeit des Partikelmaterials. Nach Maxwell gilt

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = \frac{\lambda_p + 2\lambda_{bf} + 2\varphi(\lambda_p - \lambda_{bf})}{\lambda_p + 2\lambda_{bf} - \varphi(\lambda_p - \lambda_{bf})} \quad (1)$$



KI Kälte · Luft ·
Klimatechnik
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante
Artikel und News zum Thema auf
ki-portal.de!

Hier klicken & informieren!



In Gl. (1) steht λ für die Wärmeleitfähigkeit und φ für den Volumenanteil an Partikeln. Die Indizes bedeuten *nf* Nanofluid, *bf* Basisfluid und *p* Nanopartikel.

Maxwell's Modell liefert keine explizite Aussage über die Abhängigkeit der Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von Temperatur bzw. Partikelgröße und -form. Experimentell wurden solche Abhängigkeiten jedoch in teilweise sehr starker und nichtlinearer Form beobachtet (Buongiorno [1]). Dabei weisen die publizierten Ergebnisse durchaus nicht alle in die gleiche Richtung. Zur Erklärung der beobachteten Effekte werden unterschiedliche physikalische Hypothesen formuliert. So wird zum Beispiel vermutet, dass die Brownsche Bewegung eine die Wärmeleitung verstärkende Mikrokonvektion verursachen könnte oder dass Partikel agglomerieren und größere Wärmebrücken innerhalb des Basisfluids bilden. Allerdings fehlt es bisher an eindeutigen experimentellen Bestätigungen für diese Hypothesen. In Summe muss festgestellt werden, dass die Literatur ein eher heterogenes Bild bzgl. der Wärmeleitfähigkeit von Nanofluiden bietet. Am ILK Dresden wurden daher eigene Messungen mit drei Suspensionen auf wässriger Basis durchgeführt. Bei den ersten beiden Suspensionen handelt es sich um nichtkommerzielle Nanofluid¹ mit Beimengungen von 1 bzw. 3 Vol.-% Aluminiumoxid (Al_2O_3). Das dritte Nanofluid ist ein kommerzieller Zuschlagstoff (LUDOX[®] TM-50, Fa. GRACE Davidson, USA), der u. a. in der Farbenindustrie Verwendung findet. Hier sind ca. 30Vol.-% Siliziumoxid (SiO_2) dem Basisfluid Wasser beigemischt. Bei den Al_2O_3 -Nanofluiden handelt es sich um weiße, nahezu opake geruchlose Flüssigkeiten. LUDOX[®] TM-50 hingegen ist eine eher trübe Flüssigkeit vergleichbar Kokosnussmilch. Die Größe der Partikel liegt bei den Al_2O_3 -Nanofluiden² bei ca. 180 nm und bei LUDOX[®] TM-50 bei ca. 30 nm (Chen et al., 2008). LUDOX[®] TM-50 ist einer der im Rahmen des vom MIT koordinierten Benchmark-Tests (Buongiorno et al. [1]) zur Wärmeleitfähigkeit von Nanofluiden untersuchten Stoffe und eignet sich daher als Referenzfluid. Ein 1%tiges Al_2O_3 -Nanofluid wurde im Rahmen dieses weltweiten Tests ebenfalls untersucht. Allerdings waren in diesem Fall die beigemischten Nanopartikel nicht sphärisch, sondern zylindrisch.

Im Hinblick auf einen Langzeiteinsatz in thermofluidmechanischen Applikationen müssen Nanofluidе gewisse Eigenschaften aufweisen. Zunächst ist dies ihre zeitliche

Stabilität im Hinblick auf Sedimentation und Agglomeration. Beide Effekte hängen von den Kräften, die auf die einzelnen Partikel wirken, ab. Sedimentation kann nur vermieden werden, wenn Gewichtskraft und Auftriebskraft sowie die rückstellende Stokesche Reibungskraft im Gleichgewicht stehen. Vergleichbar gilt für das Vermeiden der Partikelagglomeration, dass abstoßende und anziehende Kräfte zwischen den Nanopartikeln im Gleichgewicht stehen müssen. Das Einstellen dieser Gleichgewichte stellt sich als kompliziert dar. Für LUDOX[®] TM-50 wurden, da es sich um ein *fertiges* kommerzielles Produkt handelt, keine weiteren stabilisierenden Maßnahmen ergriffen. Die Al_2O_3 -Nanofluidе wurden durch Zugabe eines Surfactants stabilisiert. Das verwendete Surfactant ist ein grenzflächenaktiver Stoff, der die einzelnen Nanopartikel umhüllt. Diese Hülle ist Träger negativer Ladungen, welche die Partikel voneinander abstoßende Coulombsche Kräfte verursacht.

Zylinderspaltmethode zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten

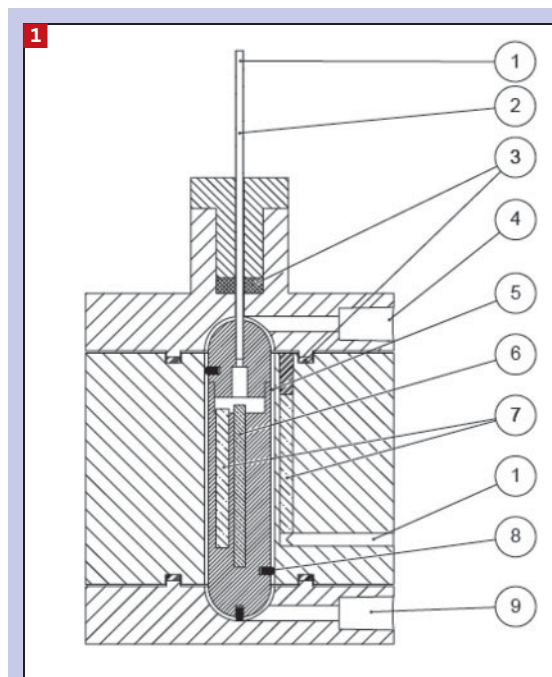
Bei der ILK-Messapparatur für Wärmeleitfähigkeiten von Flüssigkeiten handelt es sich prinzipiell um zwei Zylinder, die einen Ringspalt bilden (Abb. 1). Im Ringspalt befindet sich das zu untersuchende Fluid. Der innere Zylinder wird mit einer konstanten Leistung geheizt. Der äußere Zylinder ist in einen Kupferblock eingepasst, der an seinem Außenrand auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Die sich einstellende Temperaturdifferenz zwischen Innen- und

Außenzylinder ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Fluids. Durch sukzessives Variieren der Temperatur am äußeren Zylinder wird die Wärmeleitfähigkeit der Nanofluidе im Bereich zwischen 20 und 60 °C bestimmt.

Die Kalibrierung der Zylinderspaltapparatur erfolgt gegenüber reinem Wasser (Relativmethode). Problematisch erweisen sich die erwarteten Steigerungen der Wärmeleitfähigkeit über den Kalibrierbereich hinaus. Zur Vermeidung von Extrapolationsfehlern wurden daher umfangreiche numerische Simulationen mit FLUENT, die die Zylinderspaltapparatur nachstellen, durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei linearer Extrapolation der Extrapolationsfehler klein gehalten wird. Auf Basis des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes wird eingeschätzt, dass der Messfehler der Wärmeleitfähigkeit $\pm 2 - 3\%$ nicht überschreitet.

Wärmeleitfähigkeit der Nanofluidе

Die Wärmeleitfähigkeit aller drei betrachteten Nanofluidе wurde im Temperaturbereich von 20 bis 60 °C aller 5 K bestimmt. Die Al_2O_3 -Nanofluidе wurden zudem zweimal im zeitlichen Abstand von ca. einem Monat gemessen (Messung 1 bzw. Messung 2). Hintergrund dieser Untersuchung war die Fragestellung nach dem Alterungsverhalten dieser Fluidе. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 und 3 zusammengefasst. Für LUDOX[®] TM-50 wurde die Messung nicht wiederholt, da der genaue Zeitpunkt der Herstellung nicht bekannt und damit eine Einordnung eventuell beobachteter Alterungsprozesse nicht möglich war.

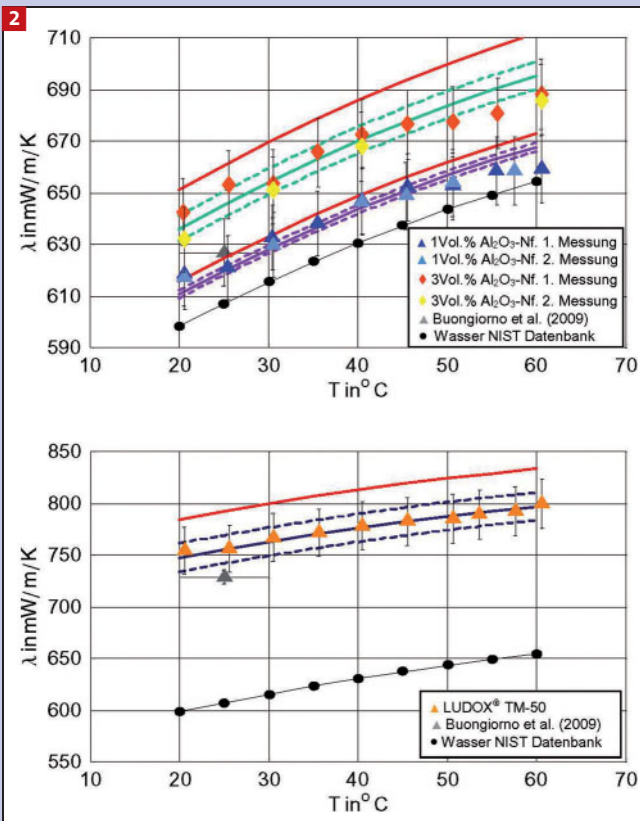


1 Prinzipskizze des Zylinderspaltapparates des ILK-Dresden

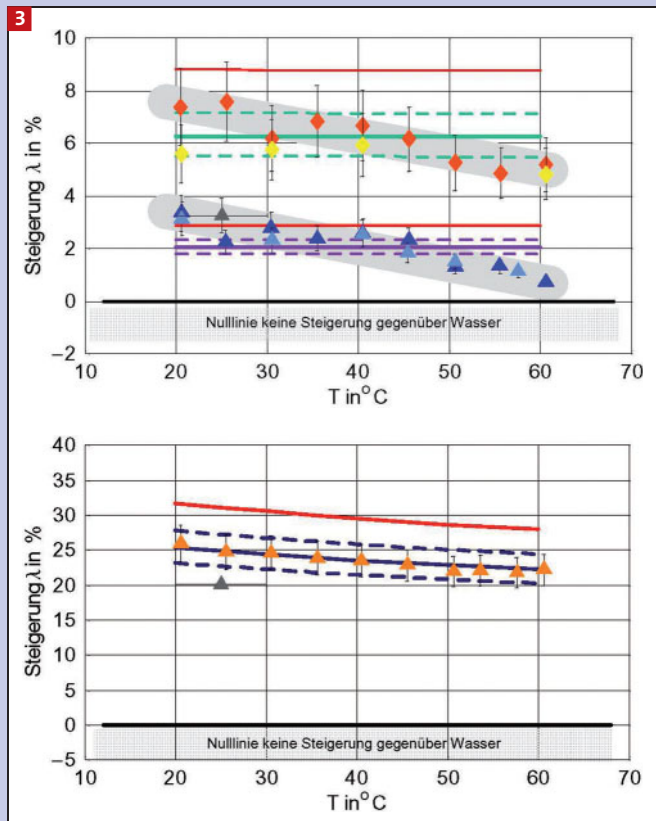
- ① elektrische Zuleitungen
- ② Hülse für obere elektrische Zuleitung
- ③ Dichtungen
- ④ Anschluss Einlassventil Ringspalt
- ⑤ Ringspalt
- ⑥ Heizwiderstand
- ⑦ Thermoelemente
- ⑧ Abstandhalter
- ⑨ Anschluss Drucksensor und Ablassventil

1 Die Al_2O_3 -Nanofluidе wurden vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS Dresden hergestellt.

2 Messung IKTS-Dresden



2 Wärmeleitfähigkeiten der Al₂O₃-Nanofluide (oben) und von LUDOX® TM-50
Rote Volllinie Maxwell-Theorie Gl. (1), violette Volllinie Nan-Theorie Gl. (2) für einen mittleren Wert von α , violette gebrochene Linien entsprechen $\pm 40\%$ dieses mittleren α Wertes von α .



3 Steigerung der Wärmeleitfähigkeiten der Al₂O₃-Nanofluide (oben) und von LUDOX® TM-50 im Bezug auf das Basisfluid Wasser
Symbole wie Abb. 2

Zunächst ist festzustellen, dass tatsächlich alle drei Nanofluide eine gegenüber dem Basisfluid Wasser erhöhte Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Für die Al₂O₃-Nanofluide erscheint die Wärmeleitfähigkeit bis nahezu 45 °C in etwa proportional zu der von Wasser. Für LUDOX® TM-50 gilt dies für den gesamten Messbereich. Allerdings erreicht die Steigerung in keinem Fall den nach der Maxwell'schen Theorie (Gl. 1) vorhergesagten Wert (roter Kurvenzug in den Diagrammen). Oberhalb von ca. 45 °C ist ein leichter Abfall der Steigerung der Wärmeleitfähigkeit Al₂O₃-Nanofluide zu beobachten. Die Wiederholungsmessungen für die Al₂O₃-Nanofluide zeigen keine signifikanten Änderungen der Wärmeleitfähigkeit. Diese Fluide sind offenbar relativ stabil gegenüber Alterungsprozessen infolge Agglomeration bzw. Sedimentation. Die Übereinstimmung unserer Messung mit dem Referenzwert für das 1%tige Al₂O₃-Nanofluid nach Buongiorno et al. [1] ist gut. Der ILK-Wert für LUDOX® TM-50 liegt leicht oberhalb des entsprechenden Referenzwertes nach Buongiorno et al. [1]. Als Ursache wird die vermutlich höhere Konzentration der Nanopartikel ge-

sehen. Nach eigenen Messungen geben Buongiorno et al. [1] einen Volumenanteil von nur 26 Vol.-% Siliziumoxid, gegenüber den Herstellerangaben der in der vorliegenden Studie verwendeten Probe von 30 Vol. %, an. Diese Beobachtungen verstärken sich, wenn man die Darstellung der relativen Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Nanofluide im Bezug auf das Basisfluid Wasser betrachtet (Abb. 3). Es stellt sich daher die Frage, ob die Maxwellsche Theorie prinzipiell geeignet ist, die Steigerungsraten der Wärmeleitfähigkeit von Nanofluiden zu beschreiben. Offensichtlich gibt es bei allen drei Nanofluiden etwas, was den Wärmestrom durch das Zweiphasenfluid flüssig / fest behindert. Aus der Thermodynamik ist der Wärmedurchgangskoeffizient bekannt. Für eine Hauswand bestimmt er sich zum Beispiel aus den Wärmeübergangskoeffizienten sowie der Wärmeleitfähigkeit derselben. Besteht die Hauswand aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien, so sind die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten im Sinne von in Reihe geschalteten thermischen Widerständen in

den Wärmedurchgangskoeffizienten einzuschreiben. Ähnliches gilt auch für Suspensionen mit Stabilisatoren, die die Nanopartikel umhüllen. Entweder verursachen diese Hüllen zusätzliche Übergangswiderstände, die wie Wärmeübergangskoeffizienten zu interpretieren sind oder sie wirken wie in Reihe geschaltete zusätzliche thermische Widerstände. Die Theorie von Nan et al. (1997) trägt diesem Gedanken Rechnung und erweitert den Maxwellschen Ansatz. Für sphärische Partikel gilt dann

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} = \frac{\lambda_p (1 + 2\alpha) + 2\lambda_{bf} + 2\varphi [\lambda_p (1 - \alpha) - \lambda_{bf}]}{\lambda_p (1 + 2\alpha) + 2\lambda_{bf} - \varphi [\lambda_p (1 - \alpha) - \lambda_{bf}]} \quad (2)$$

Der Parameter α selbst ist die Biot-Zahl der Nanopartikel

$$\alpha = \frac{2 R_b \lambda_{bf}}{d_p} \quad (3)$$

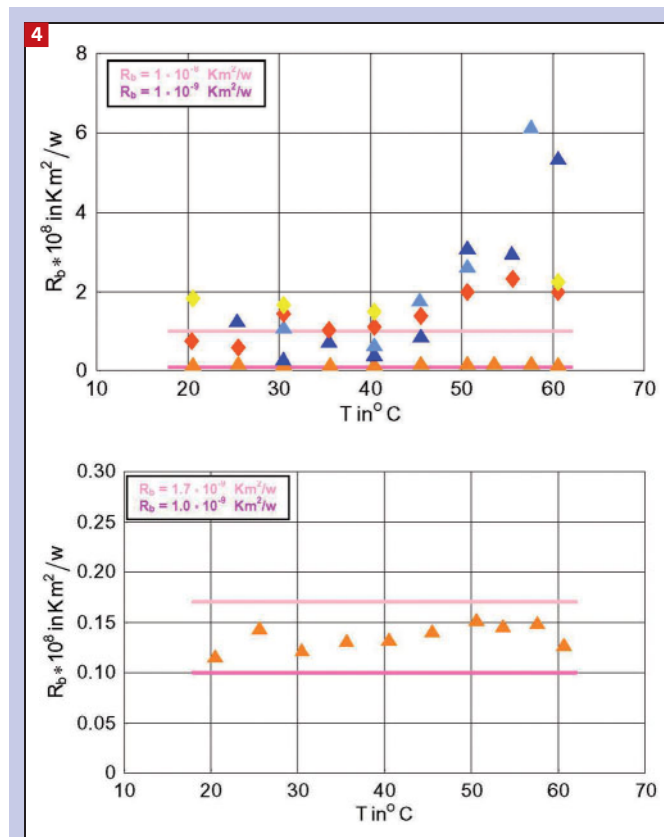
In (3) stellt d_p den Durchmesser der Partikel und R_b den Kapitza Widerstand dar. Letztlich ist es die zweite Größe, die den thermi-

schen Übergangswiderstand zwischen Basisfluid und Nanopartikel erfasst. Für R_b gleich Null, gibt es keinen zusätzlichen Übergangswiderstand und Gl. (2) geht in Gl. (1) über. Ist R_b jedoch ungleich Null so ist die Wärmeleitfähigkeit der Nanofluids geringer als nach der Maxwell'schen Theorie vorhergesagt. Die für die drei Nanofluide erhaltenen Messergebnisse lassen auf einen solchen Sachverhalt schließen.

Abb. 2 bzw. 3 zeigen die Berechnungen entsprechend der Theorie nach Nan et al. [10] für mittlere α -Werte. Im Intervall zwischen 20 und 45 °C folgen die Messwerte der Al_2O_3 -Nanofluide dieser Theorie recht gut. Oberhalb dieses Temperaturintervalls fallen die gemessenen λ -Werte jedoch unter die Vorhersage auch dieses Ansatzes. Für LUDOX® TM-50 wird über das gesamte betrachtete Temperaturintervall eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und der Theorie nach Nan et al. [10] erzielt. Offensichtlich gibt es einen weiteren physikalischen Effekt, der auch von dieser Theorie nicht explizit berücksichtigt wird. Hierzu wird aus Gl. (3) der thermische Übergangswiderstand nach Kapitza R_b ermittelt (Abb. 4). Bis ca. 45 °C beträgt R_b ca. $1.0 \cdot 10^{-8} \text{ Km}^2/\text{W}$. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit Werten wie sie in Buongiorno et al. [1] und anderen Literaturstellen angegeben werden. Oberhalb dieser Temperatur steigt R_b jedoch deutlich an. Für LUDOX® TM-50 stellt sich die Situation deutlich anders dar. Hier liegt R_b im gesamten Temperaturintervall von 20 bis 60 °C nahezu konstant zwischen $1.0 \cdot 10^{-9} \text{ Km}^2/\text{W}$ und $1.7 \cdot 10^{-8} \text{ Km}^2/\text{W}$. Eine Hypothese zur Erklärung dieser Unterschiede kann am Verhalten der Hüllschichten, die das Surfactant an den Al_2O_3 -Nanopartikeln ausbildet, festgemacht werden. In unserem Fall ist das Surfactant eine organische Flüssigkeit, von der hypothetisch vermutet werden kann, dass sie temperatursensitiv ist. Dies würde bedeuten, dass sich die physikalischen Eigenschaften der Hüllschicht mit der Temperatur ändern und damit auch der von ihr verursachte thermische Übergangswiderstand. Diese Hypothese muss allerdings im Rahmen weiterer Untersuchungen geprüft werden.

Zusammenfassung

Nanofluide sind eine relative junge Option, den Wärmetransport in thermofluidmechanischen Apparaturen durch gezielte Steigerung der Wärmeleitfähigkeiten zu verbessern. Bisher ist es allerdings noch nicht gelungen eine schlüssige Theorie zu entwickeln, die es gestatten würde Nanofluide maßgeschneidert herzustellen. Experimente mit Nanofluiden auf der Basis von



4 Thermischer Übergangswiderstand nach Kapitza für alle Nanofluide (oben) sowie von LUDOX® TM-50 allein (unten) Symbole wie Abb. 2

Wasser und keramischen Nanopartikeln lassen jedoch erkennen, dass in Abhängigkeit von der Menge der beigemengten Partikel und deren Stoffeigenschaften die Wärmeleitfähigkeit teilweise deutlich erhöht werden kann. Weitere Versuche, die insbesondere das Verhalten dieser neuen Fluide in Apparaten der Wärmetechnik untersuchen, sind erforderlich um eine endgültige Aussage über die Praktikabilität zu erhalten.

Danksagung

Die im Beitrag vorgestellten experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsthemas "Optimierung des Wärmeübergangs in strukturierten Rohren mittels Nanofluiden" (EuroNorm MF090026) durchgeführt. Unser spezieller Dank geht an Fr. A. Ehle vom ILK Dresden für die Durchführung der im Beitrag erwähnten numerischen Simulationen.

Literatur

[1] Buongiorno J. et al.: (2009) A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *J Appl Phys* 106:094312
 [2] Chen G., Yu W., Singh D. Cookson D., Routbort J. (2008) Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids. *J Nanopart Res* 10:1109-1114
 [3] Das S.K. (2006) Nanofluids - The Cooling Medium of the Future. *Heat Transfer Engineering*, 27(10):1-2

[4] Das S.K., Choi S.U.S. (2009) A review of heat transfer in nanofluids. *Advances in Heat Transfer* 41:81-197
 [5] Godson L., Raja B., Mohan Lal D., Wongwises S. (2010) Enhancement of heat transfer using nanofluids - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:629-641
 [6] Henderson K., Park Y.-G., Liu, L., Jacobi A.M. (2010) Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube. *Int J Heat and Mass Transfer* 53:944-951
 [7] Kabelac K., Kuhnke J.F. (2006) Heat transfer mechanisms in nanofluids – experimental and theory. In *Proceedings of 13th International Heat Transfer Conference* (Graham de Vahl Davis and Eddie Leonardi eds.), 110-111, Sydney, Australia
 [8] Liao L., Liu Z.-H. (2009) Forced convective flow drag and heat transfer characteristics of carbon nanotube suspensions in a horizontal small tube. *Heat Mass Transfer* 45:1129-1136
 [9] [Maxwell J.C. A (1881) *Treatise on Electricity and Magnetism 2nd ed. Clarendon, Oxford.*
 [10] Nan, C.-W., Birringer, R., Clarke D.R., Gleiter H. (1997) Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. *J Appl Phys* 81:6692-6699
 [11] Özerinç S., Kakaç S., Yazıcıoğlu A. G. (2010) Enhanced thermal conductivity of nanofluids: A state-of-the-art review. *Microfluid Nanofluid* 8:145-170
 [12] Pohl St., Friebe Ch., Buschmann M.H.: Dellen und Noppen im Wärmeübertrager. *KI Kälte Luft Klimatechnik*, 46 (2010) 7/8, S.1-5