

Institut für Thermodynamik
und Wärmetechnik
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
7000 Stuttgart 80, Pfaffenwaldring 6

ZUR WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH FREIE KONVEKTION
IM KRITISCHEN GEBIET VON KOHLENDIOXID

Von der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Ing.-Civ. Rodolfo Neumann
geboren zu Chillán/Chile

Hauptberichter: Professor Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Professor Dr.-Ing. K. Stephan
Tag der Einreichung: 15.11.1978
Tag der mündlichen Prüfung: 19. 3.1979

Zusammenfassung

Es wurde der Wärmeübergang durch freie Konvektion von waagrecht eingespannten, elektrisch beheizten Platindrähten mit Durchmessern von $d = 0.05, 0.1$ und 0.3 mm und einem ebenfalls waagrecht eingespannten, 5 mm hohen und 0.0125 mm dicken Platinband an Kohlendioxid untersucht. Der Druckbereich p/p_k erstreckte sich von 1.002 bis 1.29 . Die normierte Temperatur T/T_k des Kohlendioxids wurde auf Isobaren stufenweise von 0.93 bis 1.06 variiert, wobei die Temperatur der Heizdrähte bei jedem Fluidzustand bis etwa 250 K über die Fluidtemperatur erhöht wurde.

Die Messergebnisse zeigen, dass der Wärmeübergang durch "normale" freie Konvektion in der Nähe der pseudokritischen Temperaturen⁽¹⁾ sehr gross werden kann: Es wurden Wärmeübergangskoeffizienten gemessen, die Werte bis zu 13000 W/m^2K aufwiesen. Es wird untersucht, von welchen Parametern der Wärmeübergang massgebend beeinflusst wird. Die Messergebnisse werden dimensionslos in der Form von Nu, Ra -Diagrammen dargestellt. Mit Ausnahme bestimmter Temperaturbereiche können die Messergebnisse mit einer in der Literatur bekannten Nusselt-Beziehung,

$$Nu = 0.35 + 0.25 Ra^{1/8} + 0.45 Ra^{1/4}$$

bestimmt werden, wobei die Stoffwerte in den dimensionslosen Kennzahlen bei einer mittleren Temperatur eingesetzt werden können. Die extreme Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte im Bereich der pseudokritischen Temperaturen bewirkt, dass sich aussergewöhnliche Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen an der beheizten Wand einstellen. Die Messergebnisse können dennoch mit der angeführten Gleichung wiedergegeben

(1) Die Bezeichnung "pseudokritische Temperatur" wird in der Literatur oft angegeben und bezeichnet die Temperatur, bei der die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck ein relatives Maximum hat.

werden, wenn modifizierte Kennzahlen verwendet werden, welche die Temperaturabhängigkeit der Stoffgrößen sowie die anomale Wärmeleitfähigkeit in der Nähe des kritischen Punktes berücksichtigen. Trotzdem entstehen systematische Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Nusselt-Zahlen, die bis zu 30 % betragen. Dies gilt vor allem bei sehr dünnen Drähten, bei denen Wärmeleitvorgänge gegenüber konvektiven Transportmechanismen überwiegen. Hierfür wird versucht, eine physikalische Erklärung zu geben. Für dünne Drähte wurde zusätzlich eine Korrekturfunktion ermittelt, die den hier verstärkten Einfluss der Maxima der spezifischen isobaren Wärmekapazität c_p , des Volumenausdehnungskoeffizienten β und der Wärmeleitfähigkeit λ auf den Wärmeübergang ausgleicht, sofern diese Maxima in der Grenzschicht um den Draht liegen. Alle gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten können mit Hilfe der angegebenen Gleichung, unter Berücksichtigung der Korrekturfunktion für dünne Drähte, mit Abweichungen von $\pm 10\%$ bestimmt werden. Die Auswertungen ergaben, dass der anomale Teil der Wärmeleitfähigkeit unter bestimmten Bedingungen nicht vernachlässigt werden kann.

Für die Untersuchung des "anormalen" Wärmeübergangs, das heißt, des Wärmeübergangs mit siedeeähnlichen Erscheinungen und Drahtschwingungen, wurden systematische Messungen mit fünf Drähten unterschiedlicher Materialeigenschaften und Durchmesser durchgeführt. Alle Versuche wurden schlierenoptisch beobachtet und ausgewertet. Die Messergebnisse zeigen, dass einige in der Literatur aufgestellte Vermutungen und Theorien zur Ursache der siedeeähnlichen Erscheinungen nicht zutreffen. Es wird belegt, dass die siedeeähnlichen Erscheinungen nicht durch chemische Reaktion entstehen können. Auch die Einflüsse des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes und der Drahtoberfläche können den Messergebnissen nach keine Ursache für diese hochturbulente Wärmeabgabe sein. Die Mess-

siedeähnlichen Erscheinungen: Mit zunehmender Temperaturleitfähigkeit ist das Auftreten siedeähnlicher Erscheinungen immer unwahrscheinlicher. Sie treten bei umso grösseren Temperaturdifferenzen auf, je grösser die Temperaturleitfähigkeit des Heizmaterials ist. Es wird ein physikalisches Modell vorgeschlagen, mit dem die Entstehung der siedeähnlichen Erscheinungen und der Drahtschwingungen erklärt wird.

Inhaltsverzeichnis

<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Versuchsapparatur und Durchführung der Messungen</u>	15
2.1 Aufbau der Versuchsanlage	15
2.2 Heizflächen und Versuchsflüssigkeit	21
2.2.1 Heizflächen	21
2.2.2 Versuchsflüssigkeit	22
2.3 Versuchsablauf	23
2.3.1 Reinigung und Füllung der Anlage	23
2.3.2 Durchführung der Versuche	25
2.4 Messungen	26
2.4.1 Bestimmung der Messgrößen	26
2.4.2 Auswertung der Messungen	29
2.4.3 Abschätzung der Messgenauigkeit	31
2.5 Messprogramm	35
2.5.1 Messungen mit Platindrähten	35
2.5.2 Messungen mit Drähten aus Nickellegierungen	35
<u>3. Versuchsergebnisse und Diskussion der Messungen mit Platindrähten</u>	39
3.1 Messergebnisse	39
3.2 Korrelationen	48
3.2.1 Dimensionslose Darstellung der freien Konvektion im kritischen Gebiet	48
3.2.2 Korrekturfunktion für dünne Drähte	65
3.3 Diskussion	80
<u>4. Versuchsergebnisse und Diskussion der Messungen mit Drähten aus Nickellegierungen</u>	89
4.1 Messergebnisse	89
4.1.1 Heizdraht Hawe 107, $d = 0.1$ mm	89
4.1.2 Heizdraht Hawe 107, $d = 0.3$ mm	100
4.1.3 Heizdraht Hawe 50, $d = 0.1$ mm	104

4.1.4	Heizdraht Hawe 25, $d = 0.18$ mm	107
4.1.5	Heizdraht Hawe 9, $d = 0.1$ mm	110
4.2	Diskussion	113
4.2.1	Mögliche Ursachen für die siedeähnlichen Erscheinungen	113
4.2.2	Modellvorstellung für den Wärmeübergang an Drähten mit niedriger Temperaturleitfähigkeit	121
<u>5. Anhang</u>		
5.1	Stoffwerte	131
5.1.1	Kohlendioxid	131
5.1.2	Heizdrähte	144
5.2	Thermosonde zur Bestimmung der Fluidtemperatur	146
5.3	Berechnung des Temperaturverlaufs an den Oberflächen von zwei Drähten	147
5.4	Berechnung der Wärmestromdichten während der Drahtschwingungen	150
<u>6. Schrifttum</u>		
		153