

**DER WÄRMEÜBERGANG
IN EINEM GESCHLOSSENEN THERMOSYPHON,
DER FLUID NAHE DEM
THERMODYNAMISCH KRITISCHEN ZUSTAND
ENTHÄLT**

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

vorgelegt von
Ulrich Groß
aus Stuttgart

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der
Universität Stuttgart

1983

KURZFASSUNG

Groß, Ulrich

Der Wärmeübergang in einem geschlossenen Thermosyphon, der Fluid nahe dem thermodynamisch kritischen Zustand enthält.

Der Wärmeübergang in der Heizzone und in der Kühlzone eines geschlossenen Thermosyphons wird in Abhängigkeit von Fluiddruck ($0,8 < p/p_{krit} < 1,1$), Heizleistung ($175W \leq \dot{Q} \leq 1975W$) und Rohrneigung ($0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$) experimentell untersucht. Als Fluid dient das Kältemittel R115. Die Füllmenge ist so bemessen, daß das mittlere spezifische Volumen den kritischen Wert annimmt. Bei unterkritischen Zuständen finden in der Heizzone Verdampfung und in der Kühlzone Kondensation statt. Bei der Verdampfung ergeben sich mit steigendem Druck drei Bereiche: Ungestörtes Blasensieden, Blasensieden in einem Übergangsbereich, Filmsieden. Geringe Rohrneigung, großer Wärmestrom und hoher Druck führen beim Blasensieden zu den höchsten Wärmeübergangskoeffizienten, begünstigen jedoch gleichzeitig den Übergang zum Filmsieden.

Im Thermosyphon tritt teilweise laminare, teilweise turbulente Filmkondensation auf. Bei steigendem Druck verbessert die zunehmende Auflösung der glatten Filmoberfläche den Wärmeübergang, was bei laminarem Film zusammen mit kleinem Wärmestrom und mittlerer Rohrneigung ($\varphi = 20^\circ$ bis 40°) zu den höchsten Wärmeübergangskoeffizienten führt.

Bei überkritischen Zuständen wird die Wärme durch einphasige natürliche Konvektion übertragen. Nahe dem kritischen Zustand ergeben sich die höchsten Wärmeübergangskoeffizienten, insbesondere bei kleinem Wärmestrom und großem Neigungswinkel. Der Wärmeübergang bleibt jedoch in jedem Fall kleiner als in unterkritischen Zuständen.

Beim Übergang zwischen unter- und überkritischen Zuständen tritt eine unstetige Druckänderung auf, die durch die Instabilität der gegenläufigen Dampf- und Flüssigkeitsströmung verursacht wird.

Im Zusammenwirken der Vorgänge in der Heizzone und der Kühlzone ergibt sich ein optimales Gesamtverhalten bei einem Neigungswinkel $\varphi = 40^\circ$, kleinem Wärmestrom und bei Drücken

ABSTRACT

Groß, Ulrich

Heat Transfer in a closed Thermosyphon Tube filled with near critical Fluid.

The heat transfer in the heating and in the cooling zone of a closed thermosyphon tube has been studied experimentally. Fluid pressure ($0.8 < p/p_{crit} < 1.1$), heat flow rate ($175W \leq \dot{Q} \leq 1975W$), and inclination angle ($0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$) of the tube were varied. As working fluid refrigerant R115 was used. The quantity of fluid was taken so that the critical specific volume is obtained.

In subcritical states there exists boiling in the heating zone and condensation in the cooling zone. Depending on pressure there are three regimes of boiling: pure nucleate boiling, nucleate boiling in a transition region, and film boiling. Small tilt, large heat flow rates, and high pressures are best conditions for a large heat transfer coefficient; these, however, also promote transition to film boiling.

In the thermosyphon there exists laminar and turbulent film condensation respectively. Largest heat transfer coefficients are obtained in laminar film conditions at small heat flow rates, with inclination angles between $\varphi=20^\circ$ and $\varphi=40^\circ$, and high pressures, caused by a growing disturbance of smooth film surface with increasing pressure.

In the supercritical state heat is transferred by single phase natural convection. Heat transfer coefficients are largest near the critical point especially for low heat flow rates, and large inclination angles remaining smaller than subcritical ones.

During transition between subcritical and supercritical states pressure variations are unsteady caused by an instability of the counter-current fluid flow.

Combined heat transfer in the heating and cooling zone renders an overall performance with optimal conditions at an inclination angle of about $\varphi=40^\circ$, a small heat flow rate, and pressures $0.9 < p/p_{crit} < 1.0$ as long as no film boiling occurs.

INHALTSVERZEICHNIS

<u>Kurzfassung</u>	Seite	5
<u>Inhaltsverzeichnis</u>		7
<u>Formelzeichen</u>		9
1 <u>Einleitung</u>		12
2 <u>Literaturübersicht</u>		15
3 <u>Problemstellung</u>		19
4 <u>Experimentelle Untersuchungen</u>		20
4.1 <u>Versuchsanlage</u>		20
4.2 <u>Arbeits-Fluid</u>		23
4.2.1 <u>Art und Füllmenge</u>		23
4.2.2 <u>Befüllen der Anlage</u>		25
4.3 <u>Meßeinrichtungen</u>		26
4.3.1 <u>Temperatur der äußeren Rohrwand</u>		26
4.3.2 <u>Druck im Thermosyphon</u>		26
4.3.3 <u>Heizleistung</u>		26
4.3.4 <u>Datenerfassung</u>		27
4.4 <u>Versuchsauswertung</u>		28
4.4.1 <u>Wärmestrom</u>		28
4.4.2 <u>Temperatur der inneren Rohrwand</u>		28
4.4.3 <u>Druck am oberen Rohrende</u>		29
4.4.4 <u>Wärmeübergangskoeffizienten α_{HZ} und α_{KZ}</u>		30
4.4.5 <u>Fehlerbetrachtung</u>		31
4.5 <u>Versuchsdurchführung</u>		33
5 <u>Darstellung der Versuchsergebnisse</u>		35
5.1 <u>Mittlere Wärmeübergangskoeffizienten</u>		35
5.1.1 <u>Heizzone</u>		35
5.1.2 <u>Kühlzone</u>		42
5.2 <u>Unstetige Druckänderungen</u>		48
6 <u>Diskussion der Versuchsergebnisse</u>		50
6.1 <u>Wärmeübergang bei unterkritischem Druck</u>		50
6.1.1 <u>Heizzone</u>		51
(a) <u>Bereich des ungestörten Blasensiedens</u>		51
(b) <u>Blasensieden im Übergangsbereich</u>		58

(c) Übergang zum Filmsieden	Seite	65
(d) Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur und Korrelation		68
6.1.2 Kühlzone		72
(a) Grundlagen der Filmkondensation		72
(b) Senkrechte Position		74
(c) Geneigte Position		75
(d) Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur und Korrelation		78
6.2 Wärmeübergang bei überkritischem Druck		84
6.2.1 Grundlagen der natürlichen Konvektion		84
6.2.2 Heizzone und Kühlzone		86
6.2.3 Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur		91
6.3 Übergang zwischen unter- und überkritischen Zuständen		93
6.3.1 Zustandsverlauf bei steigendem Druck		93
6.3.2 Zustandsverlauf bei fallendem Druck		97
6.3.3 Einfluß von Wärmestrom und Neigungswinkel		98
7 <u>Ergebnisse für die Anwendung</u>		101
8 <u>Zusammenfassung</u>		106
9 <u>Schrifttum</u>		107
10 <u>Anhang</u>		119
A1 Stoffwerte von R115		119
A2 Temperaturfeld in der Rohrwand		124
A3 Einfluß der statischen Druckhöhe auf den Wärmeübergangskoeffizienten		127
A4 Temperaturverteilung an der Rohrwand		129
A5 Auslegungsbeispiel		133