

Untersuchung des thermohydraulischen Förderverhaltens einer Thermosiphonpumpe bei unterschiedlichen Beheizungsarten

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Bernd Bierling
aus Stuttgart

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Starflinger

Tag der mündlichen Prüfung: 22. März 2019

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
der Universität Stuttgart

2019

*Meiner Frau Caren
und meinem Sohn Samuel
gewidmet*

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart.*

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Klaus Spindler gilt für die Betreuung meiner Arbeit sowie die wertvollen fachlichen Diskussionen ein besonderer Dank. Herrn Prof. Jörg Starflinger vom IKE der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme und Anfertigung des Mitberichts. Bei beiden Herren möchte ich mich zudem herzlich für die schnelle Durchsicht und Beurteilung meiner Arbeit bedanken.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts bedanke ich mich für die sehr gute Zusammenarbeit und Arbeitsatmosphäre. Insbesondere bedanke ich mich bei Fabian Schmid für seine ständige Hilfs- und Diskussionsbereitschaft sowie das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ebenfalls danken möchte ich Ursina Oechsle und Nico Mirl für die Durchsicht dieser Arbeit sowie Norbert Flosdorff für die sorgfältige Anfertigung wichtiger Prüfstandskomponenten.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Studierenden, die mich durch Diplom- und Masterarbeiten, Studien- und Bachelorarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt haben. Hervorzuheben sind Johannes Brunder, Joris Nettelstroth und Stefan Winkelmann.

Sehr dankbar bin ich meinen Eltern, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg stets unterstützt und gefördert haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Caren. Ohne das bedingungslose Verständnis, den großen Rückhalt im Alltag und die tolle Unterstützung wäre das Gelingen meiner Promotion nicht möglich gewesen.

Stuttgart, April 2019

Bernd Bierling

* Am 01.07.2018 wurden das Institut für Gebäudeenergetik (IGE), das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) mit seinem Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) sowie das Institut für Energiespeicherung (IES) zum Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) zusammengeführt.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das thermohydraulische Förderverhalten einer zweiphasigen Thermosiphonpumpe bei unterschiedlichen Beheizungsarten untersucht.

Grundlage für die experimentellen Untersuchungen ist ein Prüfstand, der konstante Versuchsbedingungen bietet. Dies wird durch die kontinuierliche Messung des Dampf- bzw. Kondensatmassenstroms, die Vorwärmung des Arbeitsmediums auf nahe Siedetemperatur sowie die strömungsoptimierte Gestaltung des Reservoirs und des Förderrohreinlaufs erreicht. Der Einfluss der relativen Heizlänge auf die Förderfähigkeit der Thermosiphonpumpe wird untersucht, indem ein vertikales Förderrohr punktuell, teilflächig und flächig beheizt wird. Als Arbeitsmedium wird demineralisiertes Wasser verwendet. Der Prüfstand ist zur Umgebung hin offen. Nahezu über den gesamten untersuchten Bereich gilt: Je kleiner die relative Heizlänge, desto höher ist der geförderte Flüssigkeitsmassenstrom. Bei punktueller Beheizung weist die Förderkennlinie einen untypischen Verlauf mit einem lokalen und absoluten Maximum auf.

Das instationäre Förderverhalten der Thermosiphonpumpe bei punktueller Beheizung wird messtechnisch untersucht. Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Messung der Strömungsgeschwindigkeit des flüssigen Arbeitsmediums in der horizontalen Zulaufstrecke zur Quantifizierung des instationären Strömungsverhaltens. Eine Frequenzanalyse des gemessenen statischen Druckes in der horizontalen Zulaufstrecke gibt Aufschluss über die Periodizität des instationären Strömungsverhaltens. Ebenfalls werden durch die Ermittlung der Strömungsform im Förderrohr Rückschlüsse auf das Förderverhalten sowie die Förderfähigkeit gezogen. Durch das instationäre Förderverhalten treten Strömungen entgegen der eigentlichen Förderrichtung auf. Mit dem Ziel der Verminderung bzw. Verhinderung dieser Rückströmungen wird der Einbau diverser Düsen und Venturirohre sowie eines Rückschlagventils in der horizontalen Zulaufstrecke untersucht. Die Messergebnisse zeigen, dass das Förderverhältnis durch diese Rohreinbauten in der Zulaufstrecke gesteigert werden kann.

Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen hinsichtlich der Beheizungsart und der Verminderung der Rückströmungen geht ein neues Beheizungskonzept für Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKMs) in Form eines Plattenwärmeübertragers mit nachgeschaltetem Förderrohr hervor. Dies ermöglicht neben einer kompakten Bauweise sowie der Entkopplung von Wärmeübertragung und Förderung zur Nutzung verschiedener Wärmequellen die Beheizung der Thermosiphonpumpe bei niedrigen Temperaturen. Zudem wird ein hohes Förderverhältnis im Vergleich zu herkömmlich angetriebenen DAKMs erreicht.

Abstract

In this work, the thermohydraulic pumping behavior of a two-phase bubble pump using different heating types is investigated.

The basis is a test rig that offers constant test conditions. This is achieved by continuously measuring the vapor mass flow rate, preheating the working fluid to near boiling temperature and optimizing the design of the reservoir and the lift tube inlet. The influence of the relative heating length on the pumping performance of the bubble pump at spot heating, partial-length heating and full-length heating is investigated using a vertical lift tube. The working fluid is demineralized water. Almost over the entire range, the following applies: the lower the relative heating length, the higher the lifted liquid mass flow rate. However, the characteristic curve of the pumping performance for spot heating is atypical.

The transient pumping behavior of the bubble pump at spot-heating is investigated by measurement. One focus of this work lies in the measurement of the flow velocity of the liquid working fluid in the horizontal preheating section before the lift tube. The aim is to quantify the transient flow behavior. A frequency analysis of the measured static pressure in the horizontal inlet section provides information about the periodicity of the transient flow behavior. By determining the flow regime in the lift tube, conclusions about the pumping behavior and performance can be drawn. Due to the transient pumping behavior, the working fluid flows also against the main pumping direction. With the aim of reducing or preventing this return flow, the installation of various nozzles and Venturi tubes as well as a check valve in the horizontal inlet section is investigated. The measurement results show that the pumping performance can be increased by these tube installations in the horizontal inlet section.

A new heating concept for diffusion absorption chillers is developed on the basis of the measurement results regarding the heating type as well as the reduction of the return flow. The new heating concept consists of a plate heat exchanger and a following vertical lift tube which enables a compact chiller design. The new heating concept also leads to low heating temperatures for the heating of the bubble pump due to the decoupling of the supplied heat transfer area and the lift tube which allows the use of different heat sources. In addition, a high pumping performance is reached in comparison to conventionally driven diffusion absorption chillers.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Nomenklatur	VII
1 Einleitung	1
1.1 Grundprinzip der zweiphasigen Thermosiphonpumpe	2
1.2 Stand des Wissens.....	4
1.2.1 Experimentelle Untersuchungen.....	4
1.2.2 Theoretische Untersuchungen.....	6
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	8
2 Grundlagen der Zweiphasenströmung	11
2.1 Grundgleichungen	11
2.2 Strömungsformen im vertikalen Rohr	13
3 Aufbau des Thermosiphonprüfstands	15
3.1 Optimierung des Thermosiphonprüfstands	18
3.1.1 Kontinuierliche Messung des Kondensatmassenstroms	18
3.1.2 Vorwärmung des Arbeitsmediums	19
3.1.3 Konstruktive Gestaltung des Reservoirs.....	20
3.1.4 Strömungsoptimierte Gestaltung des Förderrohreinlaufs	22
3.2 Messtechnik und –abweichung	23
3.2.1 Temperaturen	23
3.2.2 Drücke	23
3.2.3 Massenströme	24
3.2.4 Heizleistung	24
4 Einfluss der Beheizungsart auf die Förderfähigkeit	25
4.1 Heterogenes Strömungsmodell	27
4.1.1 Impulsbilanz.....	28

4.1.2	Förderkennlinienverlauf	32
4.2	Experimentelle Untersuchung der Förderfähigkeit	35
4.2.1	Messergebnisse und Förderkennlinien	37
4.2.2	Reproduzierbarkeit der Förderkennlinie bei punktueller Beheizung	40
4.3	Fazit zum Einfluss der Beheizungsart auf die Förderfähigkeit	42
5	Ermittlung der Strömungsform im Förderrohr	43
5.1	Strömungsformenkarte	43
5.2	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Zweiphasenströmung	46
5.3	Fazit zur Ermittlung der Strömungsform	51
6	Analyse des instationären Strömungsverhaltens	53
6.1	Messung der Strömungsgeschwindigkeit	53
6.1.1	Grundlagen der Geschwindigkeitsmessung mittels Prandtl-Rohr	55
6.1.2	Randbedingungen der Geschwindigkeitsmessung mittels Prandtl-Rohr	57
6.1.3	Kalibrierung des Prandtl-Rohres inklusive Drucksensor	58
6.1.4	Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung	60
6.1.5	Validierung der Geschwindigkeitsmessung	63
6.1.6	Fazit der Geschwindigkeitsmessung	65
6.2	Frequenzanalyse des statischen Druckes	65
6.2.1	Fourier-Transformation	66
6.2.2	Randbedingungen zur Frequenzanalyse des statischen Druckes	66
6.2.3	Ergebnisse der Frequenzanalyse	67
6.2.4	Fazit der Frequenzanalyse	72
7	Einfluss von Rohreinbauten auf die Förderfähigkeit	73
7.1	Auslegung der Rohreinbauten	73
7.1.1	Druckverlustberechnung	74
7.1.2	Eingesetzte Düsen und Venturirohre	76
7.1.3	Eingesetztes Rückschlagventil	78
7.2	Messergebnisse mit Düsen	78
7.2.1	Einfluss des Düsenwinkels und -austrittsdurchmessers	80
7.2.2	Temperaturen in der Zulaufstrecke mit und ohne Düse	81
7.2.3	Strömungsgeschwindigkeit mit und ohne Düse	83
7.3	Messergebnisse mit Venturirohren und Rückschlagventil	86
7.4	Fazit zum Einfluss von Rohreinbauten auf die Förderfähigkeit	88

8	Entwicklung einer Thermosiphonpumpeneinheit für DAKMs	91
8.1	Die DAKM als Gegenstand der Forschung	91
8.1.1	Die direkt solarthermisch beheizte DAKM	91
8.1.2	Über einen externen Heizkreislauf beheizte DAKMs	93
8.2	Beschreibung und Vorteile des neuen Beheizungskonzeptes	93
8.3	Einbindung in den Thermosiphonprüfstand	94
8.3.1	Messtechnik und –abweichung	96
8.3.2	PWÜ-Konfigurationen und Versuchsbedingungen	96
8.4	Messergebnisse	99
8.4.1	Vergleich mit punktueller und flächiger Beheizung	100
8.4.2	Vergleich mit flächiger Beheizung mittels DWÜ	101
8.5	Fazit zum neuen Beheizungskonzept	102
9	Zusammenfassung und Ausblick	103
10	Literaturverzeichnis	107
A	Anhang	113
A.1	Vergleich von Berechnungsmodellen	113
A.2	Laborprüfstand	114
A.3	Berechnung des Reibungsdruckverlustes in der Zulaufstrecke	114
A.4	Reproduzierbarkeit der Messwerte bei punktueller Beheizung	116
A.4.1	Korrekturfaktoren zur Berechnung der Vertrauensgrenzen	116
A.4.2	Interpolation der Messwerte bei punktueller Beheizung	116
A.5	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	117
A.6	Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Zulaufstrecke	118
A.6.1	Auswahl eines geeigneten Messverfahrens	118
A.6.2	Messergebnisse zur Kalibrierung des Prandtl-Rohres	119
A.6.3	Geschwindigkeitsverläufe in der Zulaufstrecke	120
A.7	Frequenzanalyse	121
A.7.1	Zeit und Frequenzbereich von Messpunkt B2.2 _{FFT} und C2 _{FFT}	121
A.7.2	Dauer der Flüssigkeitsförderung am Förderrohr Austritt	122
A.8	Einfluss von Rohreinbauten in der Zulaufstrecke	122
A.8.1	Widerstandsbeiwert bei stetiger Querschnittserweiterung	122
A.8.2	Förderkennlinien und Reproduzierbarkeit bei Düse „Dü-20-5“	123
A.8.3	Variation des Förderrohrinnendurchmessers bei eingebauter Düse	124
A.8.4	Temperaturen in der Zulaufstrecke bei Rohreinbauten	125

A.9	Neue Beheizungskonzept für thermisch angetriebene DAKMs.....	126
A.9.1	Prozessschema der DAKM mit neuem Beheizungskonzept	126
A.9.2	Kollektorkennlinien.....	127
A.9.3	Übergang zwischen PWÜ und Förderrohr.....	128
A.9.4	Förderkennlinien und Reproduzierbarkeit bei verschiedener Plattenstruktur ...	128
A.9.5	Weitere untersuchte PWÜ-Konfigurationen.....	130
A.10	Übersicht aller Messgeräte und -unsicherheiten	131