

# **Entwicklung einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine**

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

Vorgelegt von

**Fabian Schmid**

aus Esslingen

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. K. Spindler

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Schaber

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 14.10.2015

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
der Universität Stuttgart

2016

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die technische Machbarkeit eines direkt durch die Sonne angetriebenen Diffusions-Absorptionskälteprozesses nachgewiesen. Der Ausreiber, der direkt in einen doppelt verglasten Flachkollektor integriert ist, stellt das zentrale Bauteil dieser Kältemaschine dar. Er ist gleichzeitig die Thermosiphonpumpe des Kälteprozesses. Üblicherweise wird diese im unteren Bereich des Rohres von Heizbändern mit einer hohen Wärmestromdichte beheizt. In einem kombinierten Kollektoraustreiber limitieren die Solarstrahlung und der Kollektorwirkungsgrad die maximale Wärmestromdichte. Zusätzlich muss die Thermosiphonpumpe aufgrund der Kollektorneigung entlang einer geneigten Ebene fördern. Diese Randbedingungen erfordern umfangreiche Untersuchungen zum Förderverhalten der Thermosiphonpumpe.

Neben der Thermosiphonpumpe ist der Hilfsgaskreislauf, sowohl für die Kälteleistung als auch für den Wirkungsgrad des Diffusions-Absorptionskälteprozesses, von besonderer Bedeutung. Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die detaillierte Untersuchung des Hilfsgaskreislaufs. Mittels Clamp-On-Ultraschallsensoren gelingt es erstmalig den Ammoniakmolanteil sowie den Gasvolumenstrom kontinuierlich und ohne Eingriffe in den Prozess zu erfassen. Ein magnetgekoppelter Edelstahlpropeller ermöglicht, statt der üblichen Naturzirkulation, eine Zwangsumwälzung des Hilfsgaskreislaufs. Somit kann der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Stoffübertragung im Absorber und Verdunster nachgewiesen und bewertet werden. Mit den Messergebnissen wird ein neu erstelltes Simulationsmodell, welches die Stoffübertragung im Hilfsgaskreislauf abbildet, validiert.

Aufbauend auf den Messergebnissen einer elektrisch beheizten Diffusions-Absorptionskältemaschine, den Förderversuchen der Thermosiphonpumpe und der Vermessung des Kollektoraustreibers im Sonnensimulator wird schlussendlich eine solarthermisch angetriebene Diffusions-Absorptionskältemaschine ausgelegt und aufgebaut. Durch einen anschließenden, erfolgreichen Test in einem Freiluftprüfstand wird die Funktionsfähigkeit des Anlagenkonzepts nachgewiesen.

## Abstract

This work demonstrates that it is possible to operate a diffusion absorption chiller directly heated by a solar collector.

The generator, as the main component of the chiller, is directly integrated into a double glazed flat plate collector. The generator also acts as the bubble pump of the refrigeration process. Normally the bubble pump is heated at the bottom of the tube by a heating tape with a high heat flux. In a combined generator/collector the maximum heat flux is limited by the solar radiation and the efficiency of the solar collector. Due to the inclination angle of the collector the bubble pump has to pump the solution upwards. These boundary conditions require extensive investigations of the performance of the bubble pump.

In addition to the bubble pump the auxiliary gas circuit has a big influence on the coefficient of performance as well as the cooling capacity of the diffusion absorption chiller. A focus of this work is the detailed investigation of the auxiliary gas circuit. By means of clamp on ultrasonic detectors, it is possible for the first time to measure the ammonia molar fraction and the volume flow of the gas circuit continuously without influencing the process. A stainless steel propeller connected with a magnetic clutch offers measuring the influence of forced circulation of the auxiliary gas circuit instead of natural circulation. Thus, the influence of the flow rate on the mass transfer in the absorber and the evaporator can be demonstrated and evaluated. The measurement data are used to validate a new simulation model, which calculates the mass transfer in the auxiliary gas circuit.

Based on the measurement results of the electrically heated chiller in the lab, the investigations of the bubble pump and the results of the generator/collector measured in the solar simulator, the solar heated diffusion absorption refrigeration system is designed and built up. Finally, the concept of a direct solar driven diffusion absorption chiller is demonstrated in an outdoor test facility.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Stand der Technik.....	2
1.1.1. Solare Kälteerzeugung .....	2
1.1.2. Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) .....	3
1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1. Der Diffusions-Absorptionskälteprozess.....	7
2.2. Funktionsweise der direkt solarthermisch angetriebenen DAKM .....	8
2.3. Der Hilfsgaskreislauf .....	13
2.4. Die Thermosiphonpumpe.....	20
<b>3. Simulation des Hilfsgaskreislaufs einer DAKM</b> .....	<b>25</b>
3.1. Mathematische Beschreibung des Wärme- und Stofftransports .....	25
3.1.1. Stoffübertragung im Absorber .....	25
3.1.2. Stoffübertragung im Verdunster .....	34
3.1.3. Berechnung der Diffusionskoeffizienten.....	34
3.2. Aufbau der Gesamtsimulation .....	36
3.3. Validierung der Simulation .....	39
3.4. Simulationsergebnisse .....	43

<b>4. Prozessoptimierung mit elektrisch beheizter DAKM</b> .....	<b>41</b>
4.1. Versuchsaufbau der elektrisch beheizten DAKM .....	47
4.2. Messtechnik der elektrisch beheizten DAKM .....	48
4.2.1. Temperatur und Druck .....	49
4.2.2. Kälte- und Heizleistung .....	50
4.2.3. Ammoniakmolanteil und Volumenstrom des Hilfsgaskreislaufs .....	52
4.2.4. Ammoniakmassenanteil und Massenstrom des Kondensats .....	58
4.2.5. Ammoniakmassenanteil und Massenstrom der armen Lösung .....	60
4.3. Stabilisierung des Anfahr- und Prozessverhaltens .....	62
4.3.1. Bypassleitung .....	65
4.3.2. Verringerung des Rohrvolumens .....	66
4.4. Untersuchung des zwangsumgewälzten Hilfsgaskreislaufs .....	67
4.5. Optimierung der Wärmeübertrager .....	78
4.5.1. Lösungsmittelwärmeübertrager .....	78
4.5.2. Verdunster, Gaswärmeübertrager und Kondensatvorkühler .....	79
4.5.3. Absorber und Absorbervorkühler .....	80
4.6. Finaler Aufbau der elektrisch beheizten DAKM .....	80
<b>5. Entwicklung des solarbeheizten Kollektoraustreibers</b> .....	<b>83</b>
5.1. Bau und Vermessung des Kollektoraustreibers „Prototyp-1“ .....	84
5.2. Förderverhalten von gequetschten und flächig beheizten Rohren .....	86
5.3. Bau und Vermessung des Kollektoraustreibers „Prototyp-2“ .....	92
<b>6. Die direkt solarthermisch angetriebene DAKM</b> .....	<b>97</b>
6.1. Aufbau der direkt solarthermisch angetriebenen DAKM .....	97
6.2. Leistungsmessung der direkt solarthermisch angetriebenen DAKM .....	98
6.2.1. Messungen im Sonnensimulator .....	98
6.2.2. Messungen im Freiluftprüfstand .....	101
6.3. Der direkt solarthermisch angetriebene, autarke Kühltank .....	104
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>105</b>

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>109</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>119</b>
A.1 Berechnung des Kollisionsintegrals .....	119
A.2 Berechnete Diffusionskoeffizienten .....	120
A.3 Geometrie der Zweiphasenströmung im Absorberrohr .....	121
A.4 Messtechnik der elektrisch beheizten DAKM .....	122
A.5 Antrieb zur Zwangsumwälzung des Hilfsgaskreislaufs .....	124
A.6 Einsatz einer gasdurchlässigen Membran .....	125
A.7 Kollektoraustreiber „ <i>Prototyp-1</i> “ .....	126
A.8 Kollektoraustreiber „ <i>Prototyp-2</i> “ .....	127
A.9 Direkt solarthermisch angetriebener Kühltank .....	128
A.10 Messtechnik des Freiluftprüfstandes .....	129
A.11 Wirkungsgradkennlinie des Vakuumflachkollektors .....	130