

Untersuchung der Austreibereinheit einer Diffusions-Absorptionskältemaschine mit Plattenaustreiber

Johannes Brunder*, Klaus Spindler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart

Tel.: 0049-711-685-63225, Fax: 0049-711-685-53225

Johannes.Brunder@igte.uni-stuttgart.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) werden durch Wärme angetrieben und arbeiten strom- und geräuschlos. Als Hotel- und Campingkühlschränke sind DAKM mit Kälteleistungen bis ca. 100W weit verbreitet.

Eine DAKM im größeren Kälteleistungsbereich hat bei einer Beheizung durch Abwärme, Fern- oder Nahwärme sowie solarer Wärme das Potenzial klimafreundlich Kälte bereit zu stellen.

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Eine der größten Hürden dabei ist eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte der Wärmezufuhr. Um das Ziel zu erreichen wird als Austreiber ein Plattenwärmeübertrager mit nachgeschaltetem vertikalen Thermosiphonrohr eingesetzt. Dies ermöglicht eine kompakte Bauweise und erhöht zusätzlich den Lösungsumlauf durch eine nahezu punktuelle Beheizung am Fußpunkt des Thermosiphonrohres. Zudem werden geringe Temperaturdifferenzen zwischen dem externen Antriebsmedium und der Siedetemperatur des Arbeitsmediums durch dieses Austreiberdesign erreicht.

Es wird die Konzeption des Prüfstands zur Untersuchung des Austreiberdesigns vorgestellt. Das Förderverhalten mit dem Zweistoffgemisch Ammoniak-Wasser wird unter Variation der Ammoniak-Konzentration und des Systemdrucks präsentiert. Dabei wird insbesondere der Einfluss von Strömungswiderständen im Zulauf des Austreibers, wie sie der üblicherweise in DAKMs verwendete Lösungsmittelwärmeübertrager verursacht, analysiert.

Stichwörter:

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Plattenaustreiber, Thermosiphonpumpe, Ammoniak-Wasser, Strömungswiderstand

1 Einleitung

Das Thermosiphonprinzip ist in technischen Anwendungen wie Filterkaffeemaschinen, Naturumlauferdampfern und Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) zu finden. Im Zweiphasenthermosiphon befindet sich in einem Förderrohr nach partieller Verdampfung ein Zweiphasengemisch aus Dampf und Flüssigkeit. Durch die Absenkung der mittleren Dichte und die Auftriebskräfte des Dampfes wird das Zweiphasengemisch nach oben gefördert.

Im Diffusions-Absorptionskälteprozess ist die Thermosiphonpumpe eine zentrale Komponente. Die DAKM ist eine rein thermisch angetriebene Kältemaschine. Die Antriebswärme wird hierbei an der Thermosiphonpumpe zugeführt. In bisher bekannten Anwendungen wird das Förderrohr direkt beheizt, sodass die partielle Verdampfung im Förderrohr selbst stattfindet. In diesem Beitrag wird ein Aufbau untersucht, in dem die Wärmezufuhr und die partielle Verdampfung in einem Plattenwärmeübertrager stattfinden an den ein Förderrohr angeschlossen ist. Plattenwärmeübertrager und Förderrohr werden gemeinsam als Austreibereinheit bezeichnet.

In dieser Arbeit wird ein separater Prüfstand für die Austreibereinheit und den Lösungsmittelkreislauf einer DAKM aufgebaut. Die Messungen werden mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser durchgeführt. Es werden Förderkennlinien über dem Dampfmassenstrom des Kältemittels unter Variation des Systemdrucks und des Ammoniakmassenanteils aufgenommen. Abschließend wird mit dem Arbeitsmittel Wasser der Einfluss verschiedener Lösungsmittelwärmeübertrager auf die Förderkennlinie gezeigt.

2 Stand der Technik

Diffusions-Absorptionskältemaschinen werden als Camping- und Hotelkühlschränke eingesetzt. Dabei sind der geräuscharme Betrieb und eine thermische Beheizung z.B. mittels Gasbrenner Vorteile der DAKM. Einige Forschungsprojekte der letzten Jahre hatten zum Ziel eine DAKM mit einer größeren Kälteleistung beispielsweise für die Gebäudeklimatisierung zu entwickeln [1, 2]. Die Gestaltung der Austreibereinheit war in diesen Forschungsprojekten von besonderem Interesse. Die entwickelten Anlagen waren für die solarthermische Beheizung konzipiert, wofür verschiedene Ansätze verfolgt wurden.

SCHMID entwickelte eine direkt solarthermisch angetriebene DAKM bei welcher der Austreiber in einen Solarkollektor integriert wurde. Somit ist kein Zwischenkreislauf nötig. Nachteilig an diesem Aufbau ist, dass der Solarkollektor in dieser Bauform ein Sonderbauteil darstellt, einen geringen Wirkungsgrad hat als vergleichbare Solarkollektoren ohne integrierten Austreiber und dass der Neigungswinkel des Solarkollektors auf 60° festgelegt ist. Dies ist nötig, damit die Förderung in der Thermosiphonpumpe stattfinden kann, senkt allerdings den Wärmeertrag des Solarkollektors im Vergleich zu einem ideal an den Sonnenstand angepassten Solarkollektor [3].

JAKOB UND EICKER entwickelten eine über einen Zwischenkreislauf beheizte DAKM. Auch in diesem Fall ist die Beheizung solarthermisch, allerdings können auch andere Wärmequellen zur Beheizung des Zwischenkreislaufs verwendet werden. Der Austreiber besteht in diesem Forschungsprojekt aus einem Rohrbündelwärmeübertrager. Der Rohrbündelwärmeübertrager ist vertikal ausgerichtet. Im Mantelraum strömt das Heizmedium. In den Innenrohren strömt das Arbeitsmittel, wird durch die Wärmezufuhr teilweise verdampft und so durch den Thermosiphoneffekt nach oben gefördert. Die Temperatur des Heizmediums betrug zwischen 150°C und 100°C [4]. Es sind keine Messdaten über die Temperaturdifferenzen zwischen dem Arbeitsmedium und dem Heizmedium veröffentlicht.

RATTNER UND GARIMELLA untersuchten mit dem Ziel die externen Antriebstemperaturen zu senken einen vergleichbaren Aufbau. Es wurde ein senkrechter Doppelrohrwärmeübertrager verwendet, von welchem das Innenrohr das Förderrohr darstellt. Das Förderrohr wird über die gesamte Länge von dem Heizmedium umströmt [5]. So kann eine größere Fläche zur Wärmeübertragung genutzt werden, als bei Aufbauten in denen nur ein Teil des Förderrohres beheizt wird. Dies führt zu einer Senkung der nötigen Antriebstemperatur. Die Förderung setzt ab einer Temperaturdifferenz des eintretenden Heizmediums zur Siedetemperatur von 11 K ein.

Zahlreiche weitere Arbeiten haben zum Ziel die nötige Antriebstemperatur für Diffusions-Absorptionskältemaschinen zu senken. Ein häufiger Ansatz ist die Verwendung von Arbeitsstoffpaaren mit niedrigerer Siedetemperatur [6].

BIERLING [7] führte eine umfassende Untersuchung des thermohydraulischen Förderverhaltens einer Thermosiphonpumpe durch. Ein untersuchter Aspekt ist der Einfluss der relativen Heizlänge φ auf die Förderfähigkeit. Die relative Heizlänge φ ist definiert als das Verhältnis der Länge, über dem am Förderrohr Wärme zugeführt wird, zur gesamten Förderrohrlänge. Anhand von theoretischen Betrachtungen und experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt, dass umso mehr Flüssigkeit gefördert wird, je geringer die relative Heizlänge ist. Der Grund dafür ist, dass über eine größere Länge des Förderrohrs der maximale Dampfanteil und somit die geringste mittlere Dichte vorliegt.

Darüber hinaus entwickelte und untersuchte BIERLING eine Verschaltung aus einem Plattenwärmeübertrager und einem daran angeschlossenen Förderrohr. Durch das Konzept kann die wärmeübertragende Fläche unabhängig von den Abmaßen des Förderrohrs gesteigert werden. Die relative Heizlänge φ ist gering woraus eine stärkere Förderwirkung resultiert. Durch die große wärmeübertragende Fläche und den hohen Wärmeübergangskoeffizienten ist nur eine geringe Temperaturdifferenz zum externen Massenstrom nötig. Anhand des Vergleichs mit Messdaten von RATTNER UND GARIMELLA konnte das Potential der Verschaltung gezeigt werden. In einem vergleichbaren Betriebspunkt mit einer Heizleistung von 200 W betrug die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz mit einem Plattenwärmeübertrager lediglich 2,9 K. Damit ist die Temperaturdifferenz bei Verwendung eines Doppelrohrwärmeübertragers 8,3-mal größer.

Das neuartige Austreiberkonzept mit Plattenwärmeübertrager wurde im Hinblick auf verschiedene Strömungsführungen von Arbeits- und Heizmedium, verschiedene Plattenprägungen und Übergänge vom Plattenwärmeübertrager auf das Förderrohr mit dem Arbeitsmittel Wasser sowie dem Zweistoffgemisch Wasser-Ethanol untersucht [8].

Strömungswiderstände im Zulauf des Förderrohrs sind in der Literatur kaum betrachtet worden. Aus der Bernoulli-Gleichung lässt sich ableiten, dass Druckverluste im Zulauf des Förderrohrs den statischen Druck am Fußpunkt der Thermosiphonpumpe senken. Nach dieser Überlegung führen Strömungswiderstände im Zulauf des Förderrohrs zu einer Verringerung des geförderten Flüssigkeitsmassenstroms. Aus Untersuchungen des instationären Strömungsverhaltens ist bekannt, dass abwechselnd zu der Strömung in Förderrichtung auch regelmäßig eine Rückströmung entgegen der Förderrichtung stattfindet [7]. Würden Rückströmungen aus dem Förderrohr gebremst und gleichzeitig die Vorwärtsströmung möglichst wenig beeinflusst, dann kann die Förderfähigkeit der Thermosiphonpumpe gesteigert werden. Mit diesem Ziel wurden Rohreinbauten, deren Strömungswiderstand sich abhängig von der Durchströmungsrichtung unterscheidet, wie Düsen, Venturirohre und Rückschlagventile untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei bestimmten Dampfmassenströmen die Verwendung eines solchen Strömungswiderstands trotz höherer Druckverluste zu mehr geförderter Flüssigkeit führt [7].

Der Einfluss von Strömungswiderständen wie beispielweise in einem Wärmeübertrager, welcher in beide Strömungsrichtungen einen ähnlichen Druckverlust aufweist, wurde bisher nicht untersucht. Damit besteht Forschungsbedarf welcher Druckverlust für die Auslegung solcher Wärmeübertrager im Hinblick auf die Förderfähigkeit der Thermosiphonpumpe tolerierbar ist.

Obwohl Ammoniak-Wasser das am weitesten verbreitete Arbeitsstoffpaar für Diffusions-Absorptionskältemaschinen ist, findet sich in der Literatur keine den Autoren bekannte experimentelle Untersuchung in der eine Thermosiphonpumpe mit diesem Arbeitsstoffpaar auf ihre Förderfähigkeit untersucht wurde. Das neuartige Austreiberkonzept mit Plattenaustreiber sollte ebenso noch weitergehend untersucht werden. Insbesondere die Möglichkeit durch Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche größere Wärmeströme der Austreibereinheit zuzuführen, ist bisher nicht betrachtet worden.

3 Prüfstandskonzept

Eine Diffusions-Absorptionskältemaschine besteht aus drei Teilsystemen, dem Lösungsmittelkreislauf, dem Kältemittelkreislauf und dem Hilfgaskreislauf. Um die Austreibereinheit zu untersuchen ist allerdings nur der Lösungsmittelkreislauf und ein Teil des Kältemittelkreislaufs nötig. Um Störfaktoren zu reduzieren wird die Austreibereinheit an einem Prüfstandsaufbau untersucht, der auf die Bauteile des Lösungsmittelkreislaufs und eines Teils des Kältemittelkreislaufs reduziert ist. Der Prüfstand ist mit Ammoniak/Wasser-Lösung gefüllt. Es wird kein Hilfgas verwendet.

3.1 Prüfstands Aufbau

Im Reservoir befindet sich reiche Lösung, deren Füllstand an einem Schauglas abgelesen werden kann. Die Temperatur der reichen Lösung im Reservoir kann durch Wärmeabfuhr am Absorber-Vorkühler (7 → 8) sowie einer um das Reservoir gewickelten Heizschnur eingestellt werden. Vom Reservoir strömt die reiche Lösung in Richtung des Lösungsmittelwärmeübertragers, in welchem die reiche Lösung vor dem Eintritt in den Austreiber durch die heiße arme Lösung vorgewärmt wird (1 → 2). Im Lösungsmittelwärmeübertrager kann eine Teilverdampfung stattfinden, sodass an Stelle 2 ein Zweiphasengemisch vorliegt. Zwischen Stelle 2 und Stelle 3 wird gegebenenfalls der Dampf abgeschieden und über eine Bypassleitung in den Abscheider geführt. In der Bypassleitung kann es auch zur Förderung von Lösung kommen. An Stelle 3 tritt die reiche Lösung einphasig in den Plattenaustreiber ein. Im Plattenaustreiber wird der Lösung ein Wärmestrom zugeführt, wodurch es zur partiellen Verdampfung kommt. Es entsteht Dampf mit einem hohen Ammoniakmassenanteil und arme Lösung mit einem im Vergleich zur reichen Lösung reduzierten Ammoniakmassenanteil. An der Stelle 4 tritt das Zweiphasengemisch aus dem Plattenaustreiber in das Förderrohr ein. Im Förderrohr werden Dampf und Flüssigkeit durch den Thermosiphoneffekt nach oben in den Abscheider (Stelle 5) gefördert. Im Abscheider findet eine Auftrennung der flüssigen und gasförmigen Phase statt. Die flüssige arme Lösung strömt durch den Lösungsmittelwärmeübertrager (6 → 7), in dem Wärme von der armen auf die reiche Lösung übertragen wird. Zwischen Stelle 7 und Stelle 8 wird in einem weiteren Wärmeübertrager, dem Absorbervorkühler, Wärme an einen externen Kühlkreis (hier nicht dargestellt) abgeführt. Die reiche Lösung strömt durch den Absorbervorkühler (8 → 9) in den Kondensator, in welchem die reiche Lösung durch den Kondensator erwärmt wird. Zwischen Stelle 9 und Stelle 10 wird in einem weiteren Wärmeübertrager, dem Dephlegmator, Wärme an einen externen Kühlkreis abgeführt. Die reiche Lösung strömt durch den Dephlegmator (10 → 11) in den Reservoir. Die gasförmige Phase wird über einen 3-Wege-Ventil in den Kühlkreislauf geleitet. Der Kondensator ist über einen Kondensatorkreislauf mit einem Kühlnetzanschluss verbunden. Der Plattenaustreiber ist über einen Austreiberkreislauf mit einem Heizthermostat verbunden. Die Messstellen sind wie folgt definiert: (p) Druck, (T) Temperatur, (MID) Volumenstrom, (Dichte) Dichte.

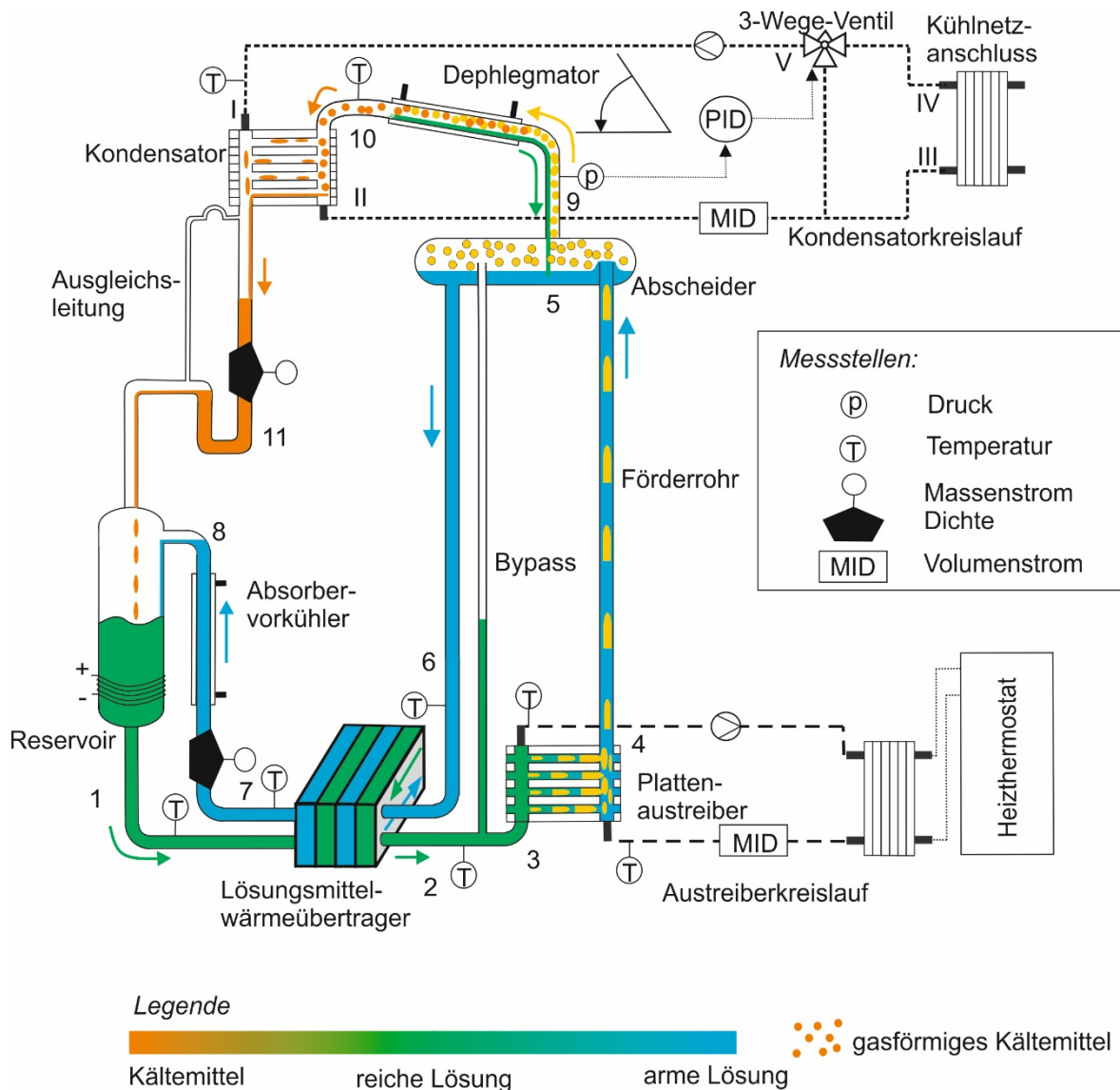


Bild 1: Aufbau des Austreiberprüfstands.

Vom Abscheider steigt der Dampf weiter auf. Im Dephlegmator (9 → 10) wird Wärme abgeführt, sodass eine Teilkondensation stattfindet. Der Ammoniakmassenanteil im verbliebenen Dampf steigt, da überproportional Wasser im Dephlegmator kondensiert. Der Dephlegmator kann in seinem Neigungswinkel verändert werden. Je nach Neigungsrichtung strömt das dort entstandene Kondensat in Richtung des Abscheiders oder in Richtung des Kondensators. In den in diesem Beitrag gezeigten Messungen ist der Dephlegmator in Richtung des Kondensators geneigt und somit zur Aufkonzentration des Kältemittels inaktiv. Im Kondensator wird der verbleibende Dampf verflüssigt und strömt ins Reservoir (10 → 11 → 1).

Der Kondensator wird extern durch einen temperierten Fluidstrom durchflossen. Die Kondensations-temperatur bestimmt den Systemdruck und wird durch die Eintrittstemperatur des externen Fluidstroms (Stelle I) vorgegeben. Durch die Kondensationswärme wird das Fluid erwärmt. Ein regelbares 3-Wege-Ventil leitet einen Anteil des Fluidstroms durch einen Wärmeübertrager (III → IV), der andersseitig vom Kühlwasser des Institutskühlnetzes durchströmt wird. Durch Mischung wird die Temperatur an der Stelle V bzw. Stelle I geregelt. Die Stellung des 3-Wege-Ventils wird durch einen PID-Regler bestimmt, der einen konstanten Systemdruck einstellt.

Ein externer Temperierkreislauf beheizt den Plattenaustreiber. Der Volumenstrom des Temperierkreislaufs wird durch eine Drossel eingestellt. Er beträgt in allen Messungen $\dot{V}_{Austr,ext} = 400 \text{ l/h}$. Der Temperierkreislauf wird über einen zusätzlichen Wärmeübertrager mit einem Heizthermostat beheizt.

Die für die Austreibereinheit verwendeten Komponenten und Abmessungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Randbedingungen und Komponenten der Austreibereinheit.

| | | | |
|---|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| Plattenaustreiber | TTZ <i>ZD4-10 P2-Platte Z-Form</i> | Förderrohr Innendurchmesser | 0,0102 m |
| Strömungsführung des Heizmediums | Gegenstrom zum Arbeitsmedium | Förderrohlänge | 1,2 m (komplett mit PWÜ) |
| Übergang Plattenaustreiber auf Förderrohr | Swagelok <i>SS-810-R-12</i> | Lösungsmittelwärmeübertrager | Alfa Laval <i>AlfaNova14-32H 4pass</i> |

3.2 Messtechnik

Es werden Temperaturen, der Systemdruck, Volumenströme, Massenströme und Dichten gemessen. In den externen Kreisläufen, welche nicht mit dem Ammoniak/Wasser-Gemisch durchströmt werden, werden zur Temperaturmessung PT100 Sensoren mit der Genauigkeitsklasse 1/10B fluidumströmt eingebaut. Zur Temperaturmessung des Ammoniak/Wasser-Gemischs werden aus Sicherheitsgründen PT100 Rohranlegefühler der Genauigkeitsklasse 1/3B verwendet. Durch Coriolis-Messgeräte können Massenstrom und Dichte der armen Lösung (Endress + Hauser: *Promass 63A – DN4*) sowie des Kältemittels (Siemens: *Sitrans FC Mass 2100-D11.5*) gemessen werden. Um ein Aufstauen der Lösung zu verhindern, durchströmt die arme Lösung im Parallelstrom einen Magnetisch-Induktiven Durchflussmesser (MID) des Typs *MAG110 DN6* der Firma Siemens. Zusammen mit Druck und Temperatur werden die Massenanteile von Ammoniak und Wasser nach [9] berechnet. In den externen Kreisläufen am Austreiber und Kondensator sind MIDs zur Bestimmung der Volumenströme verbaut. Der Absolutdrucksensor des Typs *PXM409-035BAI* der Firma Omega hat eine Genauigkeit von +/- 0,08% v.M.

3.3 Versuchsdurchführung und Auswertung

Für jeden Messpunkt wird die Temperatur des Heizthermostats für 30 Minuten konstant gehalten. Die Auswertung zeigt, dass sich nach wenigen Minuten ein konstanter Betriebspunkt eingestellt hat. Die letzten 20 Minuten der Temperaturstufe werden ausgewertet und der arithmetische Mittelwert verwendet. Alle Kennlinien werden mit schrittweise abgesenkter Heizleistung gemessen. Dabei wird bei einem Kältemittelmassenstrom von etwas über 3 kg/h begonnen. Dabei beträgt die Temperaturdifferenz am Pinchpoint etwa 10 K . Da mit dem Austreiberkonzept geringe Grädigkeiten erreicht werden sollen, werden größere Heizleistungen ohne Steigerung der Wärmeübertragungsfähigkeit kA des Plattenaustreibers nicht als sinnvoll angesehen. Zur Absenkung der Heizleistung wird die Temperatur des Heizthermostats schrittweise abgesenkt bis die Förderung zum Erliegen kommt.

Strömungsinstabilitäten und äußere Einflüsse führen zu zufälligen Schwankungen der Messwerte. Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bewerten zu können, wird jede Messreihe fünfmal wiederholt. Zwischen den Messpunkten wird mit einem Inkrement von $\Delta\dot{M}_{KM} = 0,01 \text{ kg/h}$ mit Splines interpoliert. Aus den Kennlinien der fünf Messreihen wird ein arithmetischer Mittelwert gebildet. Die Vertrauensgrenzen um den Mittelwert werden für eine statistische Sicherheit von $P^* = 95\%$ errechnet.

4 Messergebnisse

4.1 Parametervariation mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser

Das aus [7] bekannte Austreiberkonzept (Bild 2 a), aus vertikal ausgerichtetem Plattenaustreiber und angeschlossenem Förderrohr wurde modifiziert. Es wurde bei Förderversuchen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser festgestellt, dass die Förderung bei Dampfmassenströmen $\dot{M}_{KM} < 1 \text{ kg/h}$ nicht dauerhaft aufrechterhalten werden konnte. Es wird vermutet, dass es zu einer Verarmung der Lösung im Plattenaustreiber kommt. Diese wird in vertikalen Plattenspalten begünstigt, da Plattenspalte in denen mehr Dampf entsteht, eine geringere mittlere Dichte aufweisen und damit nach dem Thermosiphonprinzip stärker durchströmt werden (Bild 2 a').

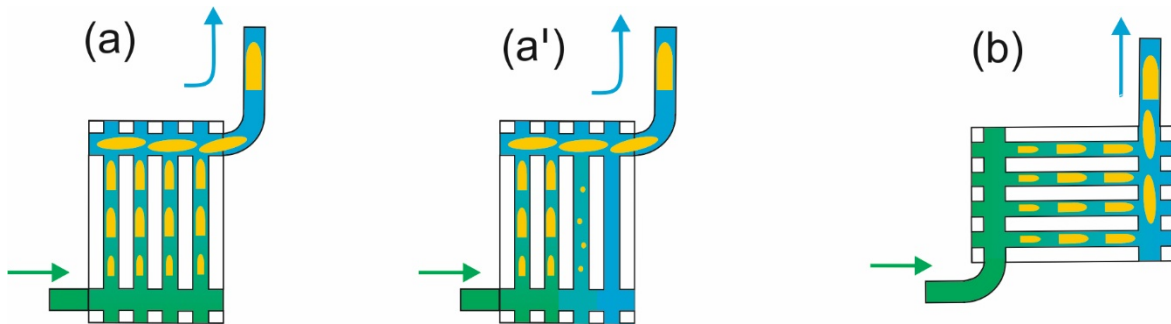


Bild 2: Gegenüberstellung des Plattenaustreibers mit vertikal ausgerichteten Plattenspalten (a), (a') und horizontal ausgerichteten Plattenspalten (b); (a) zeigt eine gleichmäßige Durchströmung, (a') eine ungleichmäßige Durchströmung der Plattenspalte.

Daher wird der Plattenaustreiber um 90° gedreht und die Plattenspalte somit horizontal ausgerichtet (Bild 2 b). Diese Anordnung erfordert eine Strömungsführung in Z-Form, bei der der Fluidstrom auf der gegenüberliegenden Seite des Plattenwärmeübertragers austritt als der Fluidstrom eingetreten ist. Bei Verwendung dieser Anordnung wurde eine dauerhafte Förderung bei Dampfmassenströmen $\dot{M}_{KM} > 0,1 \text{ kg/h}$ beobachtet. Weitere Vorteile, die sich von der Modifikation des Austreiberkonzepts erhofft werden, sind:

- Mehr geförderte arme Lösung aufgrund einer kürzeren relativen Heizlänge φ
- Möglichkeit zur Verwendung von Plattenwärmeübertragern mit einer größeren Strömungslänge ohne die relative Heizlänge φ zu vergrößern
- Keine Umlenkung am Austritt aus dem Plattenaustreiber nötig, Verringerung der Entmischung der Zweiphasenströmung

Ziel der in dieser Arbeit durchgeführten Messungen bei verschiedenen Systemdrücken und Ammoniakmassenanteilen ist es die Funktionsweise der Austreibereinheit unter den für die DAKM zu erwartenden Betriebsgrenzen abzusichern. Da der Systemdruck der Anlage von der Rückkühltemperatur des Kondensators abhängt und Rückkühltemperaturen von 25°C bis 37°C als realistisch betrachtet werden, werden Systemdrücke von 10 bar bis 14 bar betrachtet.

Der Ammoniakmassenanteil der Mischung mit der die DAKM befüllt wird, ist maßgeblich abhängig von den Austreibertemperaturen. Für solarthermisch angetriebene DAKMs sind aus der Literatur Ammoniakmassenanteile von größenordnungsmäßig $\xi = 50\%$ bekannt [2, 3]. Auch wenn die in dieser Arbeit untersuchte Austreibereinheit nicht auf solarthermische Wärmequellen beschränkt ist, so soll das Austreibertemperaturniveau als Richtgröße dienen. Daher werden Ammoniakmassenanteile von 40 % bis 60 % betrachtet.

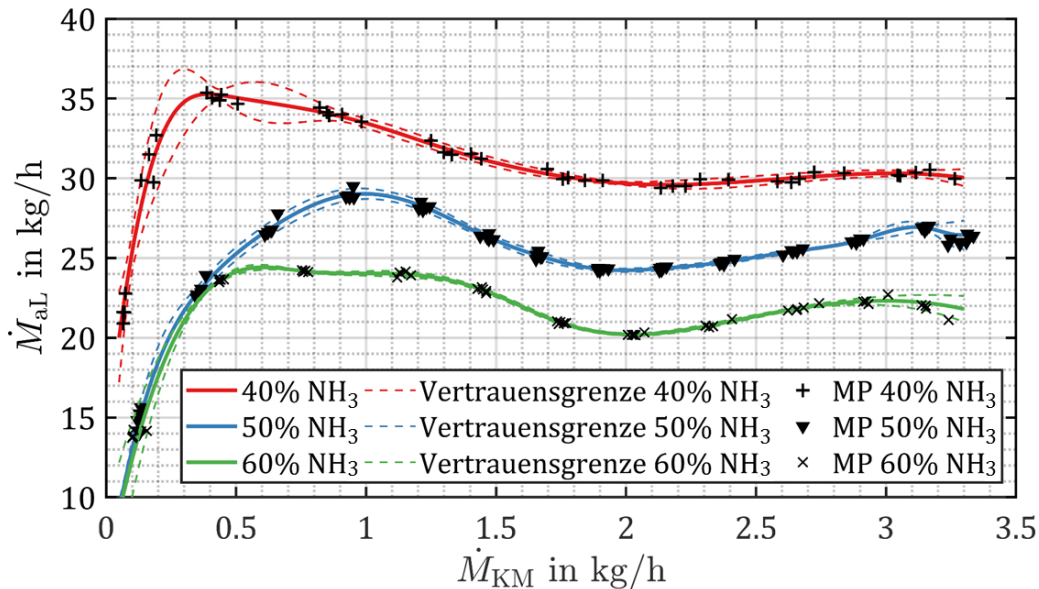


Bild 3: Vergleich der Förderkennlinien für verschiedene Ammoniakmassenanteile bei einem Systemdruck von 10 bar.

In Bild 3 ist die Förderfähigkeit des Austreiberkonzepts in Abhängigkeit des Ammoniakmassenanteils dargestellt. Es werden Ammoniakmassenanteile von $\xi = 40\%$, $\xi = 50\%$ und $\xi = 60\%$ als Befüllkonzentrationen untersucht. Die Befüllkonzentration entspricht in etwa der Konzentration der reichen Lösung. Alle Messungen werden bei einem Systemdruck von $p_{sys} = 10 \text{ bar}$ durchgeführt. In Bild 3 ist der Massenstrom der armen Lösung \dot{M}_{al} über dem Massenstrom des Kältemitteldampfes \dot{M}_{KM} dargestellt. Für jeden Ammoniakmassenanteil sind die einzelnen Messpunkte, der arithmetische Mittelwert der Kennlinien sowie der 95-prozentige Vertrauensbereich gezeigt. Für jeden untersuchten Ammoniakmassenanteil wird im Bereich $0,3 \text{ kg/h} < \dot{M}_{KM} < 1 \text{ kg/h}$ das absolute Maximum der geförderten armen Lösung erreicht. Für höhere Kältemittelmassenströme \dot{M}_{KM} sinkt der Massenstrom der geförderten armen Lösung leicht ab und bleibt ungefähr auf konstanten Niveau. Aus den Messergebnissen geht hervor, dass der Massenstrom der geförderten armen Lösung mit steigendem Ammoniakmassenanteil sinkt. Der Massenstrom der geförderten armen Lösung bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 60\%$ ist um etwa ein Drittel geringer als der Massenstrom der geförderten armen Lösung bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 40\%$.

Der Füllstand im Reservoir ist bei allen Messreihen gleich. Durch den unterschiedlichen Ammoniakmassenanteil ändert sich die Dichte der Flüssigkeit im Reservoir. So beträgt die Dichte der Lösung bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 40\%$, einem Systemdruck von 10 bar sowie einer Temperatur von 40°C $\rho_{40\%,10\text{bar},40^\circ\text{C}} = 845,7 \text{ kg/m}^3$. Die Dichte der Lösung bei 50 % Ammoniakmassenanteil und gleichen Bedingungen beträgt $\rho_{50\%,10\text{bar},40^\circ\text{C}} = 808,8 \text{ kg/m}^3$ und die Dichte der Lösung bei 60 % Ammoniakmassenanteil und gleichen Bedingungen $\rho_{60\%,10\text{bar},40^\circ\text{C}} = 768,4 \text{ kg/m}^3$. Durch eine sinkende Dichte im Reservoir sinkt auch der Vorlagedruck. Somit beträgt der statische Überdruck zum Systemdruck im Stillstand am Fußpunkt der Thermosiphonpumpe $\Delta p_{Res,40\%} = 4148 \text{ Pa}$, $\Delta p_{Res,50\%} = 3967 \text{ Pa}$, bzw. $\Delta p_{Res,60\%} = 3769 \text{ Pa}$. Der Vorlagedruck bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 60\%$ ist um ca. 10 % geringer als der Vorlagedruck bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 40\%$. Der Massenstrom der geförderten armen Lösung sinkt folglich deutlich überproportional zur Reduktion des Vorlagedrucks.

Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Förderfähigkeit vom Systemdruck. Es wurden Systemdrücke von $p_{sys} = 10 \text{ bar}$, $p_{sys} = 12 \text{ bar}$ und $p_{sys} = 14 \text{ bar}$ untersucht. Alle Messungen wurden bei einem Ammoniakmassenanteil von $\xi = 50\%$ durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen, dass der maximale geförderte Massenstrom der armen Lösung \dot{M}_{aL} bei einem Systemdruck von $p_{sys} = 10 \text{ bar}$ am höchsten ist und umso geringer ist, desto höher der Systemdruck ist. Dies ist plausibel, da die mittlere Dichte des

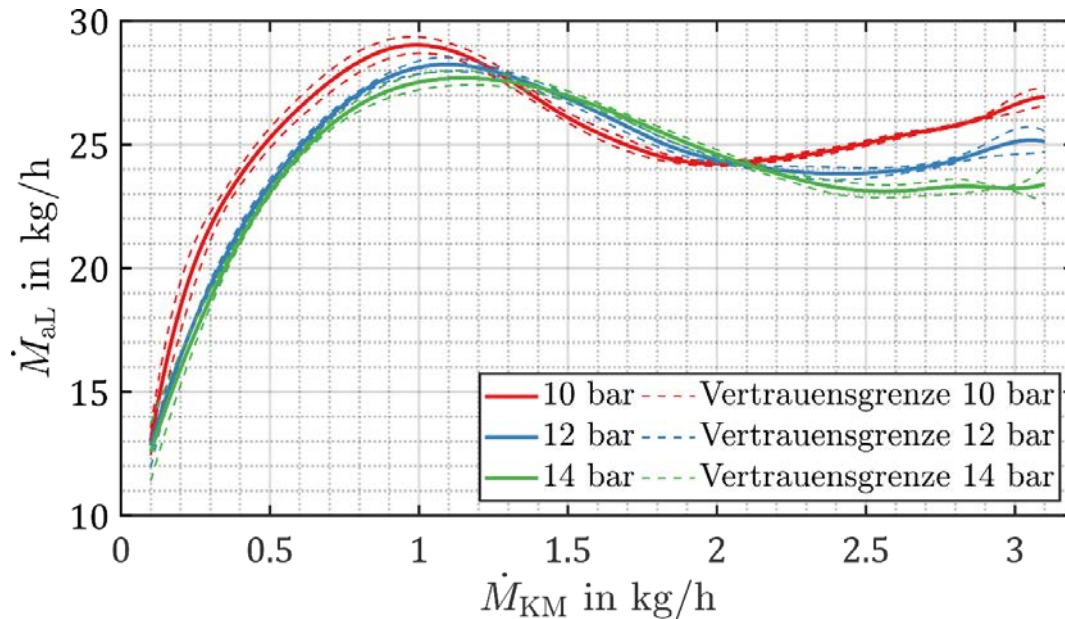


Bild 4: Vergleich der Förderkennlinien für verschiedene Systemdrücke bei einem Ammoniakmassenanteil von 50%.

Zweiphasengemisches im Förderrohr umso größer ist, je höher der Systemdruck ist. Der maximale geförderte Massenstrom der armen Lösung wird bei höheren Systemdrücken bei größeren Kältemittelmassenströmen \dot{M}_{KM} erreicht.

In Bild 5 ist die zuvor gezeigte Variation des Systemdrucks über der Leerrohrgeschwindigkeit des Dampfes dargestellt.

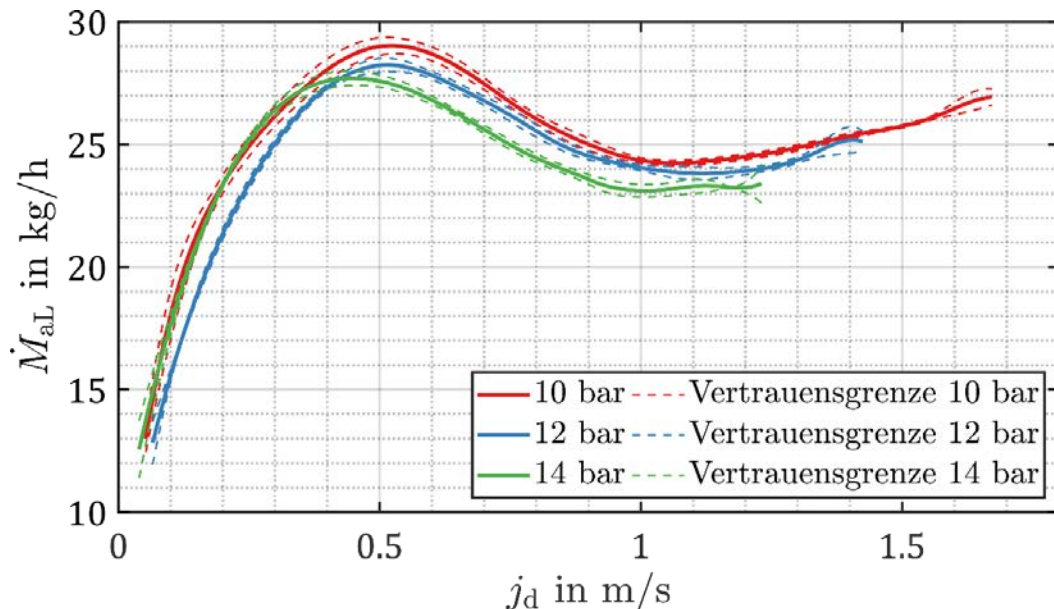


Bild 5: Vergleich der Förderkennlinien für verschiedene Systemdrücke über der Leerrohrgeschwindigkeit des Dampfes bei einem Ammoniakmassenanteil von 50%.

Die Leerrohrgeschwindigkeit des Dampfes wird nach

$$j_d = \frac{4 \cdot \dot{M}_{KM}}{\rho_{KM,FR} \cdot D_{FR}^2 \cdot \pi} \quad 4-1$$

berechnet. Sie gibt die Geschwindigkeit an mit der sich der Dampf im Rohr bewegen würde, wäre der gesamte Rohrquerschnitt mit Dampf gefüllt. Da tatsächlich ein Anteil des Rohrquerschnitts mit Flüssigkeit gefüllt ist, ist die tatsächliche Geschwindigkeit des Dampfes größer als dessen Leerrohrgeschwindigkeit. Mit dieser können Aussagen über die Strömungsform der Zweiphasenströmung getroffen werden. Über der Leerrohrgeschwindigkeit des Dampfes zeigen die Kennlinien für die verschiedenen Systemdrücke einen sehr ähnlichen Verlauf. Das Maximum der geförderten Massenlösung wird bei einer Leerrohrgeschwindigkeit $0,4 \text{ m/s} < j_d < 0,6 \text{ m/s}$ erreicht. Aus der Betrachtung lässt sich folgern, dass die selbe Strömungsform, vorrangig eine Kolbenströmung, vorliegen muss.

4.2 Einfluss des Lösungsmittelwärmeübertragers auf die Förderfähigkeit

Es soll der Einfluss des Lösungsmittelwärmeübertragers (LMWÜ) auf die Förderfähigkeit der Austreiber-einheit untersucht werden. Dazu werden zwei verschiedene Wärmeübertrager eingebaut sowie eine Messreihe ohne LMWÜ durchgeführt. So unterscheidet sich die Wärmeübertragungsfähigkeit des LMWÜs zwischen den Messreihen deutlich. Um die Vergleichbarkeit der Messreihen sicherzustellen, wird der LMWÜ zwar durchströmt, aber soll keine Wärme übertragen. Dazu wird die Flüssigkeit im Reservoir auf nahezu Siedetemperatur vorgewärmt, sodass die Eintritts- und Austrittstemperatur des LMWÜs ähnlich sind. Dies ist nur möglich, wenn ein Einstoffsystem ohne Temperaturleit beim Verdampfen verwendet wird. Daher werden die Messungen zum Einfluss des LMWÜs auf die Förderfähigkeit der Austreibereinheit mit dem Arbeitsmittel Wasser und offen zur Umgebung durchgeführt. Das Arbeitsmittel Wasser hat eine höhere Dichte als die in Kapitel 4.1 verwendeten Ammoniak/Wasser-Gemische. Der Reservoirfüllstand wird in dieser Versuchsreihe auf 40 cm abgesenkt. Damit liegt der Vorlagedruck im Bereich der Messreihen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser.

Die verwendeten LMWÜ sind fusionsgeschweißte Plattenwärmeübertrager aus Edelstahl des Herstellers ALFA LAVAL. Aus der gleichen Baureihe werden der *AlfaNova14-50H 3pass* mit einer Plattenanzahl von 50 und drei Durchgängen sowie der *AlfaNova14-32H 4pass* mit einer Plattenanzahl von 32 und vier Durchgängen untersucht. Laut Auslegungsprogramm des Herstellers ist der Druckverlust des *AlfaNova14-32H 4pass* bei einem Durchfluss von 50 kg/h etwa sechsmal höher als der Druckverlust des *AlfaNova14-50H 3pass*.

Bild 6 zeigt den Massenstrom der geförderten Flüssigkeit über dem Dampfmassenstrom für alle drei untersuchten Aufbauten. Die Förderkennlinie ohne LMWÜ weist den höchsten maximal geförderten Massenstrom der geförderten Flüssigkeit auf. Auch für Dampfmassenströme $\dot{M}_d > 0,25 \text{ kg/h}$ ist dieser größer als bei Verwendung eines LMWÜs. Die Versuchsreihen mit LMWÜ zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf der Förderkennlinie. Sie unterscheiden sich insofern, dass der Massenstrom der geförderten Flüssigkeit bei Verwendung des *AlfaNova14-50H 3pass* stets etwas höher ist.

Für Dampfmassenströme $\dot{M}_d > 0,25 \text{ kg/h}$ kann festgestellt werden, dass der Massenstrom der geförderten Flüssigkeit umso höher ist je niedriger der Druckverlust des LMWÜs ist. Der Massenstrom der geförderten Flüssigkeit ist bei Verwendung des LMWÜ mit dem größten Druckverlust *AlfaNova14-32H 4pass* allerdings um maximal 15 % geringer als ohne verbautem LMWÜ. Daraus kann gefolgert werden, dass der Druckverlust des LMWÜs aktuell nicht der dominante Druckverlust zu sein scheint. Nach Veränderungen am Förderrohr und dem Plattenaustreiber kann diese Betrachtung zu anderen Ergebnissen führen und sollte gegebenenfalls wiederholt werden.

Für Dampfmassenströme $\dot{M}_d < 0,25 \text{ kg/h}$ wird mit LMWÜ mehr Flüssigkeit gefördert als ohne LMWÜ. Es scheint, dass in diesem Bereich der LMWÜ trotz höherem Druckverlust die Förderung verbessert.

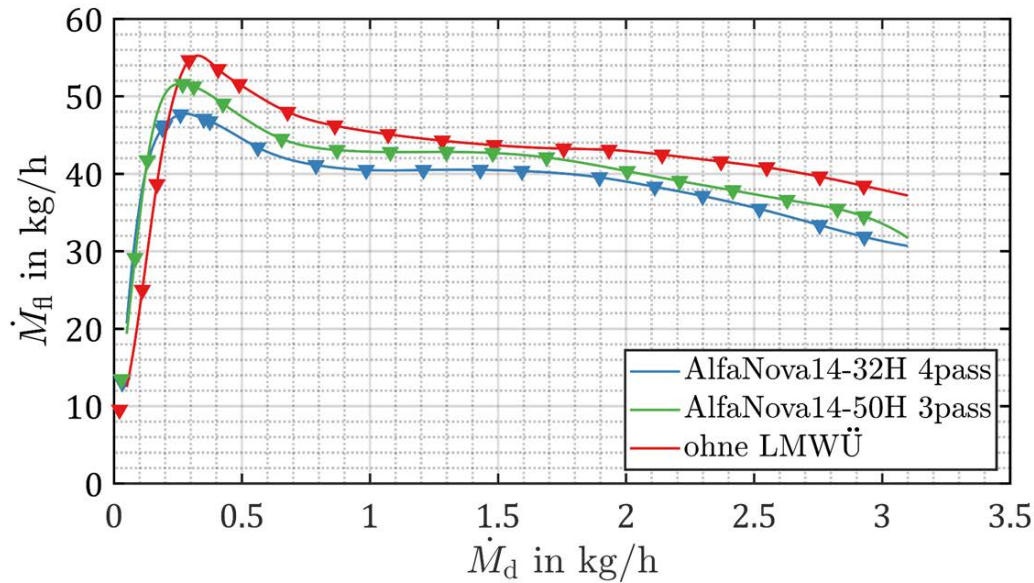


Bild 6: Vergleich der Förderkennlinien für verschiedene Strömungswiderstände (Lösungsmittelwärmeübertrager) im Zulauf dem Arbeitsmittel Wasser.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Austreiberkonzept, bestehend aus Plattenwärmeübertrager und Förderrohr, für Diffusions-Absorptionskältemaschinen untersucht. Erstmals wurde dieses Austreiberkonzept mit dem für Diffusions-Absorptionskältemaschinen weit verbreitetem Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser erprobt. Es wurden Messungen zum Einfluss des Ammoniakmassenanteils sowie des Systemdrucks auf die Förderfähigkeit des Austreiberkonzepts durchgeführt. Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss des Ammoniakmassenanteils auf die Förderfähigkeit. So sinkt der Massenstrom der geförderten armen Lösung um etwa ein Drittel, wenn der Ammoniakmassenanteil von 40% auf 60% erhöht wird. Der Einfluss des Systemdrucks auf die Förderfähigkeit stellte sich als geringfügiger heraus. Darüber hinaus wurde mit dem Arbeitsstoff Wasser der Einfluss von verschiedenen großen Strömungswiderständen, wie sie durch einem Lösungsmittelwärmeübertrager verursacht werden, im Zulauf zur Austreibereinheit untersucht.

Nach der Erprobung des Austreiberkonzepts und Untersuchung auf die im Betrieb zu erwartenden Systemdrücke und Ammoniakmassenanteile, soll die Austreibereinheit hin zu größeren zugeführten Wärmeströmen entwickelt werden. Dazu werden schrittweise Veränderungen an Plattenaustreiber und Förderrohr durchgeführt. Darüber hinaus soll der Dephlegmator zur Aufkonzentration des Kältemittels mit in die Untersuchungen einbezogen werden. Nach der Entwicklung einer kompakten Austreibereinheit für Heizleistungen von 4 – 6 kW soll diese in eine Diffusions-Absorptionskältemaschine integriert werden, mit dem Ziel eine Kälteleistung von 1 – 2 kW zu erreichen.

6 Nomenklatur

Formelzeichen

| | |
|----------------------|---------------------------------------|
| kA | Wärmeübertragungsfähigkeit |
| D | Durchmesser |
| φ | relative Heizlänge |
| \dot{M} | Massenstrom |
| $\Delta\dot{M}_{KM}$ | Inkrement des Kältemittelmassenstroms |
| p | Druck |

Indizes

| | | |
|-------------------------------|-------|-------------|
| $\text{kW}\cdot\text{K}^{-1}$ | aL | arme Lösung |
| m | Austr | Austreiber |
| - | d | dampfförmig |
| $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ | ext | extern |
| $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ | fl | flüssig |
| bar | FR | Förderrohr |
| | KM | Kältemittel |

| | | | | |
|-------------|-------------------------|--------------------------------|-----|---------------|
| Δp | Druckdifferenz | bar | Res | Reservoir |
| P^* | statistische Sicherheit | - | rL | reiche Lösung |
| j | Leerrohrgeschwindigkeit | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | sys | System |
| \dot{V} | Volumenstrom | $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ | | |
| ϑ | Temperatur | $^{\circ}\text{C}$ | | |
| ρ | Dichte | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | | |
| ξ | Ammoniakmassenanteil | $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | |

Abkürzungen

| | |
|------|---|
| IGTE | Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung |
| KM | Kältemittel |
| LMWÜ | Lösungsmittelwärmeübertrager |
| MID | Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser |
| MP | Messpunkt |
| PWÜ | Plattenwärmeübertrager |

7 Danksagung

Diese Arbeit wird im Rahmen eines Promotionsstipendiums (FZ: 200019/630-45) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich ganz herzlich für die Unterstützung.

8 Literaturverzeichnis

- SCHMID, F. *Entwicklung einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine*. Dissertation. Stuttgart, 2016.
- JAKOB, U., U. EICKER, D. SCHNEIDER, A.H. TAKI und M.J. COOK. Simulation and experimental investigation into diffusion absorption cooling machines for air-conditioning applications [online]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(10), 1138-1150. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.08.007
- SCHMID, F., B. BIERLING und K. SPINDLER. Development of a solar-driven diffusion absorption chiller [online]. *Solar Energy*, 2019, 177, 483-493. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.solener.2018.11.040
- JAKOB, U., U. EICKER, D. SCHNEIDER und A. TEUßER. Experimental investigation of bubble pump and system performance for a solar driven 2,5 kW diffusion absorption cooling machine. In: *Heat SET 2007 - Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies*, 2007.
- RATTNER, A.S. und S. GARIMELLA. Coupling-fluid heated bubble pump generators: Experiments and model development [online]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2015, 21(3), 332-347. ISSN 2374-4731. Verfügbar unter: doi:10.1080/10789669.2015.1004978
- RODRÍGUEZ-MUNOZ, J.L. und J.M. BELMAN-FLORES. Review of diffusion-absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30, 145-153.
- BIERLING, B. *Untersuchung des thermohydraulischen Förderverhaltens einer Thermosiphonpumpe bei unterschiedlichen Beheizungsarten*. Dissertation. Stuttgart, 2019.
- BIERLING, B., F. SCHMID und K. SPINDLER. Förderverhalten eines Plattenaustreibers mit nachgeschaltetem Förderrohr für thermisch angetriebene Kälteanlagen. In: *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins*, 2017, AA.II.1.11.
- TILLNER-ROTH, R. und D.G. FRIEND. Survey and Assessment of Available Measurements on Thermodynamic Properties of the Mixture Ammonia/Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 27(1), 45-61.