

Diffusions-Absorptionskältemaschine mit Plattenaustreiber

Johannes Brunder*, 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 DAKMs mit Kälteleistungen bis ca. 100 W weit verbreitet. Eine DAKM in einem größeren Kälteleistungsbereich hat bei einer Beheizung durch Abwärme, Fern- oder Nahwärme sowie solarer Wärme das Potenzial beispielsweise für die Gebäudekühlung klimafreundlich Kälte bereit zu stellen.

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird im Rahmen eines Promotionsstipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Ammoniak/Wasser wird als Arbeitsstoffpaar verwendet. Zur Einbringung größerer Antriebsleistungen wird eine neuartige Austreibereinheit bestehend aus einem Plattenwärmeübertrager mit angeschlossenem Förderrohr erprobt. Eine solche Austreibereinheit ist zudem kompakt, ermöglicht die Nutzung verschiedener Wärmequellen und senkt die zum Betrieb nötige Antriebstemperatur.

Auf der DKV-Jahrestagungen 2020 und 2021 wurden zwei Entwicklungsstränge dieses Projekts vorgestellt. Zunächst wurde die Erprobung der Austreibereinheit auf einem separaten Prüfstand (2020) und dann die Weiterentwicklung einer elektrisch beheizten DAKM, durch Verbesserung des Hilfsgaskreislaufs und Absorbers (2021), vorgestellt. Durch diese Maßnahmen konnte die Kälteleistung der DAKM deutlich gesteigert werden, sodass nun eine Erhöhung der Antriebsleistung sinnvoll ist. Beide Entwicklungsstränge werden dafür zusammengeführt und die neuartige Austreibereinheit in den Prototypen der DAKM integriert.

Es wird eine iterative Weiterentwicklung der DAKM vorgestellt, für die zunächst ein wassergekühlter Absorber aus Drallrohren und ein Plattenkondensator in der DAKM erprobt werden. Nach der Integration der Austreibereinheit mit Plattenwärmeübertrager steigt die Kälteleistung auf maximal 1038 W.

Stichwörter:

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Ammoniak-Wasser, Plattenaustreiber

1 Einleitung

Die Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) wird ausschließlich durch Wärme angetrieben und arbeitet verschleißfrei und geräuschlos. Dazu wird ein druckausgleichendes Hilfs gas verwendet, sodass Kälte durch Verdunstung entstehen kann ohne mechanisch bewegte Komponenten wie Ventile, Pumpen oder Kompressoren zu benötigen. Die in der DAKM verwendeten Arbeitsstoffe Ammoniak, Wasser und Helium weisen weder ein Ozonabbaupotential noch ein Treibhausgaspotential auf. Somit kann der Diffusions-Absorptionskälteprozess zur nachhaltigen Kälteerzeugung verwendet werden, insbesondere wenn die Antriebswärme aus Solarthermie, Abwärme oder anderweitig nicht genutzten Wärmequellen stammt.

Bisher wird der Diffusions-Absorptionskälteprozess hauptsächlich im kleinen Kälteleistungsbereich in Camping- und Hotelkühlschränken verwendet, wo sich der stromlose und geräuschfreie Betrieb zu Nutze gemacht wird. Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) an der Universität Stuttgart wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses hin zu größeren Kälteleistungen geforscht. Diese Forschung wird durch ein Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ermöglicht. In diesem Forschungsprojekt soll eine DAKM mit Plattenaustreiber und einer Kälteleistung von 1 – 2 kW entwickelt werden. Mit dem Plattenaustreiber können beliebige Wärmequellen zum Antrieb verwendet werden und es wird eine höhere Leistungsdichte der Wärmezufuhr erzielt. Zudem ist eine Weiterentwicklung des Kälteprozesses nötig um die vom Plattenaustreiber bereitgestellte erhöhte Menge an ausgetriebenem Kältemittel zur Erzeugung von Kälteleistung verdunsten zu können.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Prozessbeschreibung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses

In Bild 1 ist das Prozessschema der Diffusions-Absorptionskältemaschine gezeigt. Es sind die Komponenten gezeigt, welche in den abschließenden Messungen für diesen Beitrag verwendet wurden. Die Farbgebung zeigt schematisch die lokale Zusammensetzung der Arbeitsstoffe an. In grün gezeigten Bereichen liegt eine reiche Lösung vor, bestehend aus einem verhältnismäßig hohen Anteil Kältemittel und einem geringeren Anteil des Lösungsmittels. Im Reservoir (1) liegt eine reiche Lösung vor und strömt von dort durch den Lösungsmittelwärmeübertrager (2-3) zum Austreiber. Dieser besteht aus einem Plattenwärmeübertrager (4a) und einem daran angeschlossenen Förderrohr (4b). Im Plattenwärmeübertrager wird durch einen externen Kreislauf die Antriebswärme für den Prozess zugeführt. In einigen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden anstatt des Plattenaustreibers elektrische Heizwendeln verwendet, die um den unteren Bereich des Förderrohrs gewickelt waren. Durch die zugeführte Antriebswärme kommt es zur partiellen Verdampfung der reichen Lösung. Die dampfförmige Phase besteht aus einem hohen Anteil des Kältemittels, die verbleibende flüssige Phase enthält im Vergleich zur reichen Lösung einen geringeren Anteil des Kältemittels und wird daher als arme Lösung bezeichnet und in blauer Farbe dargestellt. Durch den Thermosiphoneffekt wird das Zweiphasengemisch durch das Förderrohr (4b) in den Abscheider (4c) gefördert, in welchem eine Phasentrennung stattfindet. Die gasförmige Phase steigt in den Dephlegmator auf, in dem unter Wärmeabgabe eine Teilkondensation stattfindet (5). Aufgrund des geringeren Dampfdrucks des Lösungsmittels kondensiert dieses überproportional aus, sodass der Kältemittelanteil im Dampf erhöht wird. Das im Dephlegmator entstandene Kondensat rinnt zurück in den Abscheider und vermischt sich mit der flüssigen Phase. Der verbleibende Dampf besteht nahezu ausschließlich aus Kältemittel und wird im Kondensator (9 – 10) verflüssigt. Im Prozessschema ist ein wassergekühlter Plattenkondensator dargestellt, zeitweilig wurden als Kondensator luftgekühlte Rippenrohre, die durch Lüfter angeströmt wurden, verwendet. Das verflüssigte Kältemittel tritt an der Stelle 11 in den Verdunster ein. Ebenfalls tritt das arme Gas an dieser Stelle in den Verdunster ein. Das arme Gas besteht in zulässiger Vereinfachung aus Hilfs gas und gasförmigem Kältemittel, wobei der Partialdruck des Kältemittels im armen Gas geringer ist, als im reichen Gas. Durch den geringen Partialdruck des Kältemittels in der Gasphase beginnt das flüssige Kältemittel zu verdunsten, wobei die nutzbare Kälteleistung entsteht. Diese wird an einen externen Wasserkreislauf abgegeben, der den Verdunster umströmt. Durch die Verdunstung wird der Kältemittelpartialdruck im Gas erhöht und das arme Gas wird zum reichen Gas. Das reiche Gas tritt aus dem Verdunster aus und strömt hinab zum Reservoir (13 – 14). Aus dem Reservoir tritt das reiche Gas von unten in den Absorber ein, in dem es mit der Lösung in Kontakt gebracht wird. Nach der Phasentrennung im Abscheider strömt die arme Lösung durch den

Lösungsmittelwärmeübertrager (6-7) und wird dabei durch Wärmeabgabe an die reiche Lösung abgekühlt. Bevor die arme Lösung von oben in den Absorber eintritt (8) wird diese im Absorbervorkühler durch Wärmeabgabe an den Rückkühlkreis weiter abgekühlt. Im Absorber strömen Gas und Lösung im Gegenstrom, wobei gasförmiges Kältemittel aus der Gasphase in die Lösung übergeht. Dadurch wird die arme Lösung im Absorber zur reichen Lösung und das reiche Gas zum armen Gas. Die bei der Absorption frei werdende Wärme wird an den Rückkühlkreis abgegeben. Das arme Gas strömt aus dem Absorber nach oben in Richtung Verdunster (12), wodurch der Hilfsgaskreislauf geschlossen wird. Neben den dauerhaft durchströmten Bauteilen gibt es eine Ausgleichsleitung zwischen dem Kondensatorauslass und dem Strang des reichens Gases. Über die Ausgleichsleitung kann unkondensiertes Kältemittel abströmen und im Startvorgang Helium verschoben werden.

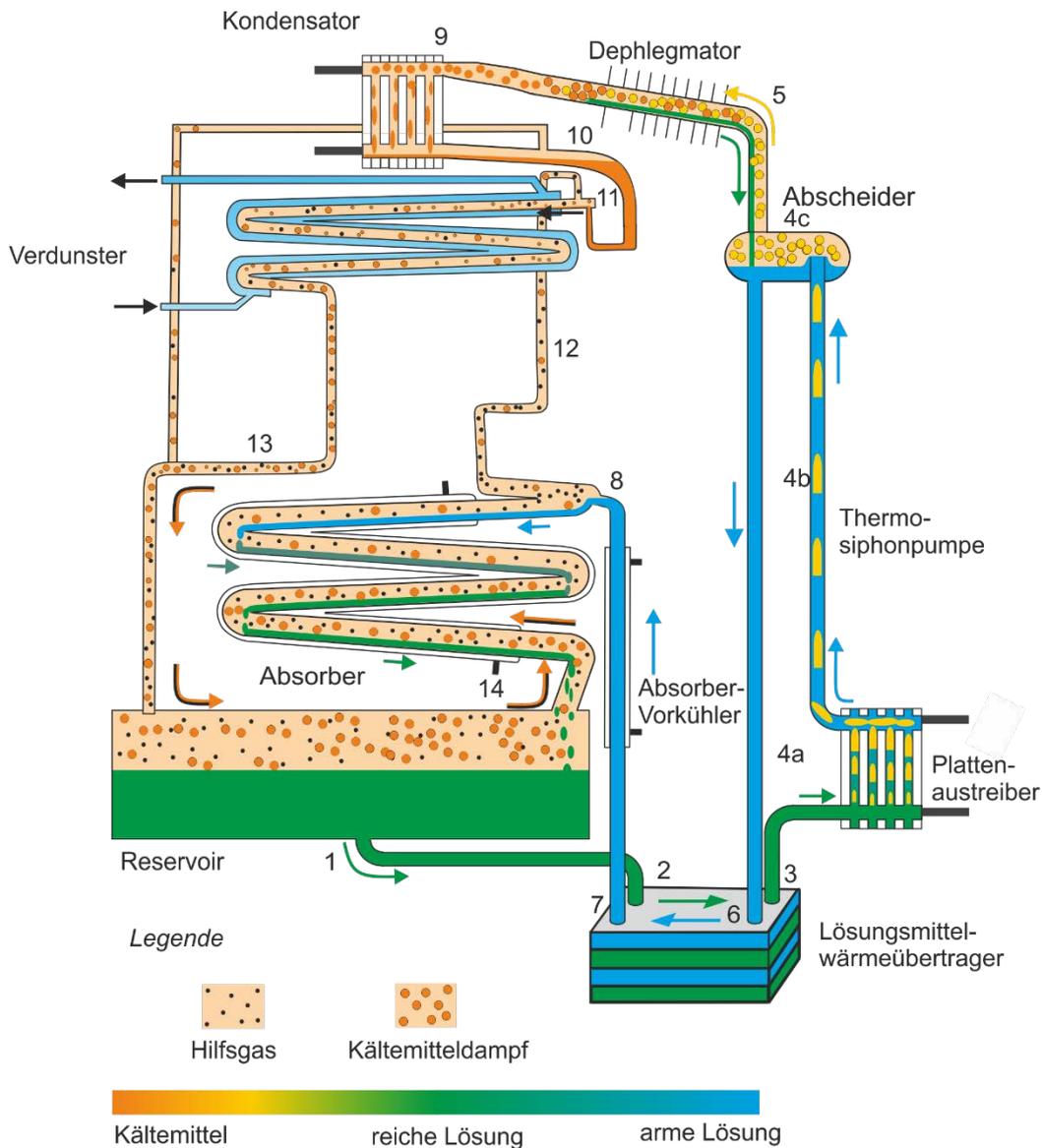


Bild 1: Prozessschema der Diffusions-Absorptionskältemaschine

2.2 Untersuchungen zur Skalierung der Kälteleistung von Diffusions-Absorptionskältemaschinen

Kommerziell verbreitet und erfolgreich sind Diffusions-Absorptionskältemaschinen als Kühlschränke in Hotelzimmern und im Camping-Bereich. Diese Anwendungen weisen üblicherweise geringe Kälteleistungen von weniger als 100 W auf. Die Eigenschaften der DAKM als langlebige Kältemaschine mit ausschließlich thermischem Antrieb machen diesen Anlagentyp interessant für die Kälteerzeugung aus verschiedenen Wärmequellen, insbesondere für die solarthermische Kälteerzeugung.

So entwickelte SCHMID eine direkt solarthermisch angetriebene DAKM bei der der Austreiber in einen Solarkollektor integriert wurde. Damit wurde ein Zwischenkreislauf vermieden, allerdings ist so die maximale Antriebswärme auf den Ertrag des Solarkollektors limitiert. Für die Ausrichtung des Kollektors musste eine Abwägung zwischen der Förderfähigkeit der Thermosiphonpumpe und dem Solarertrag getroffen werden, die die Neigung des Kollektors auf 60° festlegte. Dies limitiert die maximale Antriebswärme zusätzlich. Es wurden umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss des Hilfsgaskreislaufs auf die Kälteleistung durchgeführt. Die Wärmeabgabe erfolgte über Rippenrohre an die Umgebungsluft [1].

Weitere Diffusions-Absorptionskältemaschinen zur solarthermischen Kühlung wurden von EICKER ET AL. [2] entwickelt. Es wurden verschiedene Prototypen einer Anlage entwickelt, die über einen Zwischenkreislauf beheizt wurde, sodass auch andere Wärmequellen als Antrieb nutzbar sind. Der Austreiber ist als Rohrbündelwärmeübertrager konstruiert. Das Wärmeträgerfluid durchströmt dabei den Mantelraum, das Rohrbündel fungiert als parallele Thermosiphonpumpen. Am Kondensator und Absorber wurde Wärme an einen Rückkühlkreis abgegeben. Auch Absorber und Verdunster sind als Rohrbündelapparate ausgelegt. Die letzte Veröffentlichung dieser Entwicklungsreihe stammt von YOUSFI ET AL. [3], die den Einfluss von Heiz-, Rückkühl- und Verdunstertemperaturen untersucht.

Neben dem Einsatz als Kältemaschine wurde auch der Einsatz des Diffusions-Absorptionskälteprozesses als Diffusions-Absorptionswärmepumpe betrachtet [4]. Dafür stellt beispielsweise ein Erdgasbrenner die Antriebswärme zur Verfügung, der Verdunster nimmt Umweltwärme auf, sodass insgesamt mehr Wärme an das Heizungssystem abgegeben wird als der Brennstoff enthält.

Die Senkung der Antriebstemperatur von DAKMs stellt bei den vorausgegangenen Entwicklungen ein Hauptziel dar. Durch eine Absenkung der nötigen Antriebstemperatur können mehr Wärmequellen mit niedrigerem Exergieniveau zum Antrieb der DAKM verwendet werden. Dazu ist insbesondere die Austreibereinheit von Bedeutung. Ein Ansatz ist das Förderrohr ganzflächig mit Heizmedium zu umströmen und so eine möglichst große Wärmeübertragende Fläche für die Wärmezufuhr zu nutzen. Dieser Ansatz wird unter anderem mit den von EICKER ET AL. verwendeten Rohrbündelwärmeübertragern verfolgt. Detailuntersuchungen zu einem ganzflächig umströmten Förderrohr in einem Doppelrohrwärmeübertrager führten RATTNER UND GARIMELLA [5] durch. Sie stellten einen Förderbeginn bei einer Überhitzung des Heizmediums zur Siedetemperatur von 11 K fest. Diese für den Förderbeginn nötige Überhitzung konnte durch eine von SCHMID ET AL. [6] untersuchte Austreibereinheit mit Plattenwärmeübertrager mit angeschlossenem Förderrohr deutlich gesenkt werden. In einem mit den Untersuchungen von RATTNER UND GARIMELLA vergleichbaren Betriebspunkt betrug die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz im Plattenaustreiber lediglich 2,9 K. Zudem kann durch die geringe relative Heizlänge eine deutlich stärkere Förderwirkung erzielt werden, als bei einer Wärmezufuhr über die gesamte Rohrlänge. Die Förderfähigkeit der von SCHMID ET AL. erdachten Austreibereinheit wurde von BRUNDER ET AL. [7] erstmals mit dem Arbeitsstoff Ammoniak/Wasser unter den Betriebsbedingungen der DAKM untersucht.

3 Versuchsanlage und verwendete Messtechnik

In diesen Beitrag wird eine iterative Anlagenentwicklung vorgestellt und die einzelnen Veränderungsschritte analysiert. Um einen Überblick über die verwendeten Komponenten der einzelnen Anlagenkonfigurationen zu erhalten sind diese in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Im Beitrag diskutierte Anlagenkonfigurationen und verwendete Komponenten, grün unterlegt die in der Anlagenkonfiguration erstmals verwendeten Komponenten

Paperübergreifende Nummerierung	V3	V5.4	V6	V7
Name	„Vor Absorberoptimierung“	„Nach Absorberoptimierung“	„Plattenkondensator“	„Plattenaustreiber“
Lösungsmittelwärmübertrager	PWÜ (AlfaNova 14 – 32H, 4pass)			
Austreiber	3x Elektrische Heizwendel	3x Elektrische Heizwendel	3x Elektrische Heizwendel	Plattenaustreiber (TTZ ZD4-10 P2)
Dephlegmator	Rippenrohr	Rippenrohr	Rippenrohr	Rippenrohr
Kondensator	Rippenrohr	Rippenrohr	PWÜ (TTZ ZD42-H60) + Behälter	PWÜ (TTZ ZD42-H60) + Behälter
Verdunster	Koaxialrohr-WÜ	Koaxialrohr-WÜ	Koaxialrohr-WÜ	Koaxialrohr-WÜ
Absorbervorkühler	Rippenrohr	PWÜ (Alfanova HP27-14H)	PWÜ (Alfanova HP27-14H)	PWÜ (Alfanova HP27-14H)
Absorber	Rippenrohr	Koaxialrohr-WÜ aus Drallrohr	Koaxialrohr-WÜ aus Drallrohr	Koaxialrohr-WÜ aus Drallrohr

Während der iterativen Weiterentwicklung der DAKM bleiben einige Komponenten unverändert. Dazu zählt der Lösungsmittelwärmübertrager (LMWÜ), der aus einem Plattenwärmübertrager mit vier Durchgängen besteht. Diese Bauform hat sich bewährt und erzielt Wärmeübertragerwirkungsgrade von über 90%. Der Dephlegmator ist in allen Anlagenkonfigurationen ein Rippenrohr mit einem Innendurchmesser von 22 mm, das Wärme an die Umgebungsluft abführt. Das Labor ist auf ca. 24°C temperiert. Der Verdunster ist als Koaxialrohrwärmübertrager ausgeführt, dessen Mantelspalt von einem externen Wasserkreislauf durchströmt wird. Dieser wird durch ein Heizthermostat temperiert, welches die Kälte last emuliert.

Die wassergekühlten Bauteile werden von einem Rückkühlkreis durchströmt, der die Wärme an das Kühlnetz des Instituts abgibt. Die Temperatur des Rückkühlkreises wird durch ein 3-Wege-Ventil geregelt. Der Rückkühlkreis durchströmt ab der Anlagenversion V5.4 den Absorber sowie den Absorbervorkühler in Reihe, parallel dazu ab der Anlagenversion V6 den Kondensator. Die wassergekühlten Komponenten ersetzen bei diesen Bauteilen die zuvor verwendeten Rippenrohre, die durch PC-Lüfter mit Luft angeströmt wurden. Die Thermosiphonpumpe ist in jeder Anlagenversion ein Förderrohr mit einem Innendurchmesser von 10,2 mm und einer Länge von ca. 1 m. Bis zur Anlagenversion V7 werden drei um das Förderrohr gewickelte Heizwendeln mit einer maximalen Leistung von je 690 W der Firma Mickenhagen für die Wärmezufuhr genutzt. Die Heizwendeln werden in der Anlagenversion V7 durch einen Plattenwärmübertrager in Z-Form ersetzt, der mit horizontaler Ausrichtung der Plattenplatte am Einlass ins Förderrohr angebracht ist und im Gegenstrom durchströmt wird.

Jede Anlagenversion wird unter Variation der Rückkühltemperatur und Verdunstertemperatur untersucht. Bei drei verschiedenen Rückkühltemperaturen (25°C/30°C/35°C) werden jeweils fünf verschiedene Verdunstertemperaturen (5°C/10°C/15°C/20°C/25°C) eingestellt. Die genannten Temperaturen sind dabei jeweils die externen Eintrittstemperaturen. Durch den Wärmeentzug wird das externe Fluid im Verdunster um wenige Kelvin abgekühlt, der Rückkühlkreis durch die Wärmezufuhr erwärmt. Die Heizleistung beträgt zwischen 1000 W und 2400 W wird in jedem Betriebspunkt so angepasst, dass die maximale Kälteleistung erzielt wird.

Die Versuchsanlage ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Die Ein- und Austrittstemperaturen aller Bauteile, die Temperaturverläufe entlang des Verdunsters und Absorbers sowie die Lufttemperatur werden mit Pt-100 Temperaturfühlern erfasst. Aus Sicherheitsgründen werden im Kältekreis Anlegefühler der Genauigkeitsklasse 1/3 B, die zur besseren thermischen Anbindung mit Wärmeleitpads aus Graphen unterlegt sind, verwendet. In den drei externen Wasserkreisläufen, die den Verdunster, den Austreiber und die wärmeabgebenden Bauteile durchströmen, werden Pt-100 Tauchfühler der Genauigkeitsklasse 1/10 B verwendet. Zur Bilanzierung von Kälteleistung und Heizleistung sind in den externen Wasserkreisläufen Magnetisch-Induktive Durchflussmesser verbaut. Der Systemdruck wird mittels eines Drucktransmitters (Omega; PAA21Y-V-25) gemessen. Im Kältekreis sind drei Coriolis Durchflussmesser (Endress + Hauser C300 DN4, Endress + Hauser Promass 63 und Emercon

CMF025) zur Erfassung des Massenstroms und der Dichte des flüssigen Kältemittelkondensats, der armen Lösung sowie der reichen Lösung eingesetzt. Über eine Zustandsgleichung für das Ammoniak/Wasser-Gemisch können aus den Größen Dichte, Temperatur und Druck die Ammoniakmassenanteile von armer Lösung, reicher Lösung und Kältemittelkondensat bestimmt werden. Zur kontinuierlichen und eingriffsfreien messtechnischen Erfassung des Hilfgaskreislaufs wird ein Clamp-On Ultraschall Durchflussmessgerät der Firma Siemens (SITRANS FS 230) verwendet. Die Sensoren sind an dem vom armen Gas durchströmten Rohr angebracht. Mittels Laufzeitverfahren wird die Schallgeschwindigkeit c und mittels Laufzeitdifferenzverfahren die Strömungsgeschwindigkeit w des armen Gases ermittelt. Bei einer ausgebildeten Rohrströmung und bekannten Druck- und Temperaturwerten können daraus der Volumenstrom und die Zusammensetzung des armen Gases berechnet werden. Die Schallgeschwindigkeit des Gasgemischs wird aus der idealen Mischung der Gase Ammoniak und Helium berechnet. Dafür werden die realen Stoffdaten der Reinstoffe verwendet.

4 Anlagenentwicklung der elektrisch beheizten DAKM

In diesem Kapitel wird die Weiterentwicklung der DAKM mit elektrisch beheiztem Förderrohr vorgestellt. Ziel ist es die Kälteleistung zu steigern und dafür die Komponenten der DAKM weiterzuentwickeln, damit eine größere Heizleistung die Kälteleistung steigert. So wird der Einsatz der leistungsstärkeren Austreibereinheit mit Platten-austreiber sinnvoll.

4.1 Entwicklung des Absorbers

Im Absorber wird das Kältemittel, welches im Verdunster in den gasförmigen Zustand übergegangen ist, wieder in die Lösung absorbiert. So entsteht aus einer ammoniakarmen Lösung und einem ammoniakreichen Hilfgas, eine ammoniakreiche Lösung und ein an Ammoniak armes Hilfgas. Ein idealer Absorber kann solange Ammoniak in die Lösung aufnehmen, bis der Ammoniakpartialdruck in der Gasphase dem Siededruck der Lösung entspricht. Der reale Absorber erreicht diesen Idealwert nicht. Die Abweichung vom Idealwert stellt das nicht genutzte Absorberpotential $\Delta p_{NH_3,aG}^{id}$ dar. Das nicht genutzte Absorberpotential wird aus der Differenz zwischen dem realen Ammoniakpartialdruck im armen Gas $p_{NH_3,aG}$ und dem idealen Ammoniakpartialdruck im armen Gas $p_{NH_3,aG}^{id}$ gebildet.

$$\Delta p_{NH_3,aG}^{id} = p_{NH_3,aG} - p_{NH_3,aG}^{id} = f(c_{aG}, \vartheta_{aG}, p_{sys}) - p'(\xi_{aL}, \vartheta_{aL,Abs,ein}) \quad (1)$$

Der Ammoniakpartialdruck des armen Gases wird durch die Schallgeschwindigkeit c_{aG} , die Temperatur ϑ_{aG} und den Systemdruck p_{sys} berechnet. Der Siededruck der armen Lösung am Absorbereintritt ist eine Funktion des Ammoniakmassenanteils ξ_{aL} und der Temperatur der armen Lösung $\vartheta_{aL,Abs,ein}$ am Absorbereintritt. Die Stoffdaten der Ammoniak/Wasser-Lösung werden mit der Zustandsgleichung von TILLNER-ROTH UND FRIEND [8] berechnet, welche im relevanten Bereich die gemessenen Stoffdaten am besten abbildet [9].

Ein deutlich ansteigendes nicht genutztes Absorberpotential deutet darauf hin, dass die Leistungsfähigkeit des Absorbers überschritten wurde. SCHMID UND SPINDLER [10] steigerten den Hilfgasumlauf mit einem elektrisch angetriebenen Propeller. Dabei konnten der Hilfgasumlauf und die Kälteleistung schrittweise erhöht werden und der limitierenden Faktoren untersucht werden. So beobachteten sie ab einer bestimmten Kälteleistung und einem bestimmten Hilfgasumlauf einen ansteigenden Ammoniakpartialdruck im armen Gas. Sie interpretierten daraus, dass die Leistungsfähigkeit des Absorbers überschritten wurde und die Phasengrenzfläche eine weitere Steigerung der Kälteleistung begrenzt. BRUNDER UND STERGIAROPOULOS [11] konnten durch konstruktive Veränderungen ohne den Einsatz von Hilfsenergie den Hilfgasvolumenstrom mehr als verdoppeln und dabei die Kälteleistung steigern. Dabei wurde ein stark ansteigendes verbleibendes Absorberpotential verzeichnet, das nicht alleine mit der Wärmeabfuhr, der Phasengrenzfläche oder die zu absorbierende Stoffmenge erklärt werden konnte. Die durch den gestiegenen Hilfgasumlauf verringerte Verweildauer des Gases im Absorber und damit eine limitierende Diffusion durch die Gasphase wurden als Grund vermutet.

Es wurde ein neuer Absorber entwickelt um größere Ammoniakstoffströme absorbieren zu können. In Voruntersuchungen wurden die Größe und Turbulenz der Phasengrenze in Glattrohren sowie Drallrohren untersucht [12, 13]. Es wurde festgestellt, dass bei der Verwendung von Drallrohren eine deutlich höhere Turbulenz der Phasengrenzfläche erreicht werden kann und die Strömung im relevanten Bereich im schießenden Zustand vorliegt. Auch die Phasengrenzfläche ist selbst bei Annahme einer flachen Phasengrenze vergrößert. Daher wurde der

Absorber aus Doppelrohrwärmeübertragern mit einem Drallrohr als Innenrohr aufgebaut. Im Mantelspalt strömt Kühlwasser. Die Wärmeabfuhr an Kühlwasser anstatt an die Umgebungsluft erhöht die Kompaktheit und ermöglicht den Einsatz von Drallrohren. Aufgrund der unebenen Oberfläche können auf Drallrohre keine gewöhnlichen Rippen aufgebracht werden, was die Wärmeabfuhr an Luft erschwert.

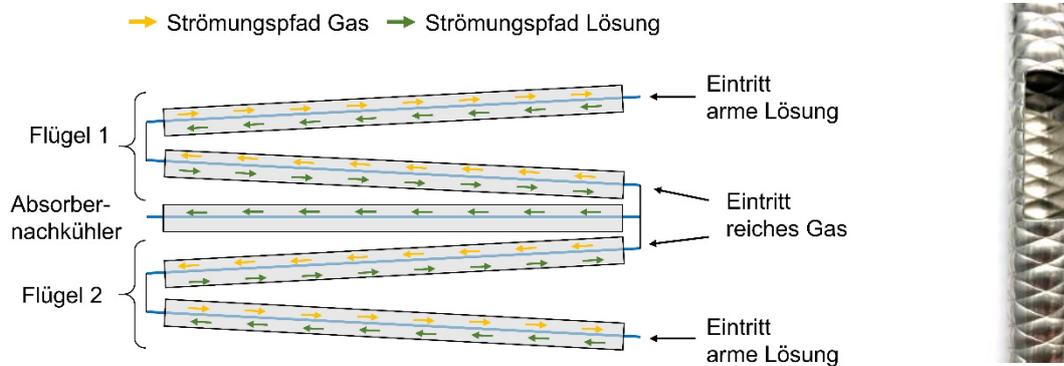


Bild 2: Fließschema des verwendeten Absorbers in der Draufsicht (links), Drallrohr mit Sichtfenster rechts

Der Absorber besteht aus fünf ca. 1,20 m langen Drallrohren (dreifach kreuzgedrallt, ca. 19° Drallwinkel, Dralltiefe 0,6 – 1 mm), die im Mantelspalt von Kühlwasser umströmt werden. Der Absorber ist in drei Teile aufgeteilt: Ein Rohr wird nur von der nun reichen Lösung durchströmt über der sich eine nicht bewegte Gasatmosphäre aus Hilfsgas und Ammoniak befindet. Dieser Teil wird als Absorberrückkühler bezeichnet und ist eine Reaktion auf die gemessene starke Überhitzung der reichen Lösung am Austritt aus dem Absorber [13]. Der übrige Absorber besteht aus zwei parallel durchströmten Flügeln, die jeweils aus zwei Absorberröhren bestehen. Das reiche Gas und die arme Lösung werden zu gleichen Teilen auf die beiden Flügel verteilt. Gelingt die Aufteilung nicht ideal, reduziert das die Absorbereffizienz erheblich. Daher wird die arme Lösung mittels zweier Nadelventile aufgeteilt. Voruntersuchungen legen eine sehr gleichmäßige Aufteilung nahe. Das reiche Gas wird durch zwei Stränge gleicher Länge und gleichen Durchmessers geführt. Aufgrund der geringen akzeptierbaren Druckverluste des Hilfsgaskreislaufs ist hier der Einsatz eines Drosselorgans mit der nötigen Ventilautorität nicht möglich. Die Aufteilung in zwei Absorberflügel bietet mehrere Vorteile. Zum einen vergrößert diese Absorberbauform die wirksame Höhendifferenz im Hilfsgaskreislaufs. Jedes Absorberrrohr muss ein Gefälle aufweisen, damit die Lösung hindurchrinnen kann ohne aufgestaut zu werden. Daher kann der Absorber flacher gebaut werden, wenn nur zwei Rohre anstatt vier Rohre in Reihe durchströmt werden. Zum anderen wird die Strömungsgeschwindigkeit des Hilfsgases aufgrund der doppelten Querschnittsfläche halbiert und damit die Verweildauer im Absorber erhöht. Darüber hinaus werden so die Druckverluste in Hilfsgaskreislauf gesenkt.

Neben der Weiterentwicklung des Absorbers wurde der Absorbervorkühler ebenfalls durch einen wassergekühlten Plattenwärmeübertrager ersetzt. Der Einfluss des Absorbervorkühlers auf die Kälteleistung wurde in [11] aufgezeigt.

In Bild 3 ist das nicht genutzte Absorberpotential für drei Anlagenversionen über der Kälteleistung gezeigt. In grün sind die Werte dargestellt, die in [11] vor der Überarbeitung des Absorbers veröffentlicht wurden. In Rot sind Messwerte nach der Absorberrückkühlung mit einem wie zuvor beschriebenen Absorber zu sehen. In schwarzer Farbe sind zusätzlich Messwerte zu sehen, die zuletzt für diesen Beitrag mit dem optimierten Absorber und einem Plattenaustreiber aufgezeichnet wurden. Die Messpunkte agglomerieren je Anlagenversion in fünf Gruppen, in welchen die gleiche Verdunstertemperatur vorliegt. Vor der Absorberrückkühlung (grün) erreicht das nicht genutzte Absorberpotential deutlich größere Werte. Mit ansteigender Kälteleistung steigt das nicht genutzte Absorberpotential stark an. Nach der Absorberrückkühlung (rot) ist das nicht genutzte Absorberpotential insgesamt geringer und das nicht genutzte Absorberpotential steigt mit ansteigender Kälteleistung nicht an. Dies deutet darauf hin, dass der Absorber einen zusätzlichen Ammoniakstoffstrom absorbieren könnte. Das wird bestätigt nachdem durch den Einsatz eines Plattenaustreibers (schwarze Messpunkte) eine deutliche Steigerung der Kälteleistung gelungen ist. Auch hier steigt das nicht genutzte Absorberpotential mit steigender Kälteleistung nicht an. Über alle Agglomerationen ist das nicht genutzte Absorberpotential gesunken. Mögliche Gründe werden in Kapitel 5 diskutiert.

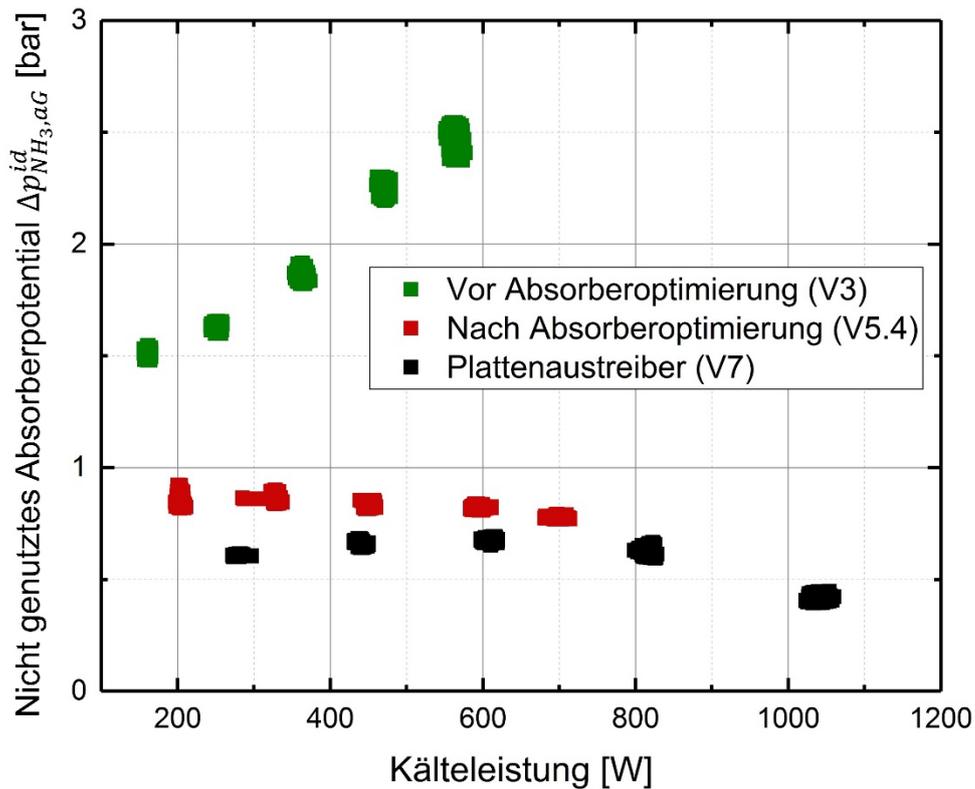


Bild 3: Darstellung des nicht genutzten Absorberpotentials über der Kälteleistung bei einer Rückkühltemperatur von 25°C für verschiedene Anlagenversionen.

4.2 Einsatz eines Plattenkondensators

In den bisherigen Anlagenversionen ist ein luftgekühlter Kondensator aus Rippenrohren mit einigen Lüftern verwendet worden. Eine Erwärmung der Ausgleichsleitung deutet darauf hin, dass nicht kondensiertes, gasförmiges Kältemittel aus dem Kondensator strömt. Dies kommt durch einen zu niedrigen Anlagendruck oder eine begrenzte Wärmeübertragungsfähigkeit des Kondensators zustande.

Werden im Bild 7 die in Rot gezeigten Kälteleistungen bei verschiedenen Verdunstertemperaturen betrachtet, so ist zunächst bei steigender Verdunstertemperatur ein linearer Anstieg der Kälteleistung zu erkennen. Bei einer Verdunstertemperatur von 25°C und der maximalen Kälteleistung ist allerdings nur ein verringerter Anstieg der Kälteleistung zu erkennen. Zusammen mit einer erwärmten Ausgleichsleitung ist dies ein deutlicher Hinweis darauf, dass ab einer Kälteleistung von 700 W der bisher verwendete luftgekühlte Kondensator nicht mehr ausreichend Kältemittel kondensieren kann. Der maximale kondensierte Kältemittelmassenstrom beträgt ca. 2,4 kg/h (vgl. Bild 5).

Daher wurde anstatt der luftgekühlten Rippenrohre ein durch den Rückkühlkreis gekühlter Plattenwärmeübertrager als Kondensator eingesetzt. Die Anschlüsse des Plattenwärmeübertragers sind in Z-Form. Dieser wurde zunächst mit horizontaler Ausrichtung der Plattenspalte eingebaut, dann allerdings aufgrund starker Schwankungen des gemessenen Kältemittelmassenstroms gedreht. Seitdem ist der Plattenkondensator mit vertikaler Ausrichtung der Plattenspalte eingebaut. Das Kondensat strömt darauf in einen 0,2 Liter fassenden Behälter, dessen Füllstand an einem Schauglas abgelesen werden kann. Vom Behälter gelangt das Kondensat in den Verdunster.

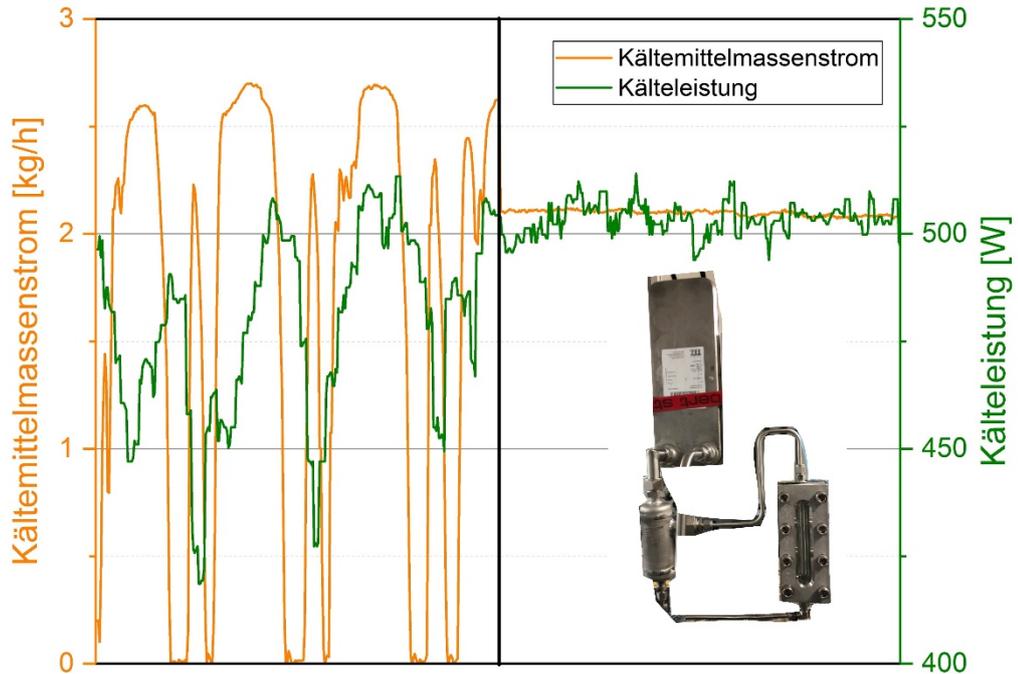


Bild 4: Vergleich des Kondensatmassenstroms und der Kälteleistung für einen Plattenkondensator mit horizontal ausgerichteten Plattenspalten (links) und vertikal ausgerichteten Plattenspalten mit Abscheidebehälter (rechts)

In Bild 4 sind Kältemittelmassenstrom und Kälteleistung über der Zeit gezeigt. Auf der linken Seite ist der Zustand mit horizontalen Plattenspalten zu sehen, die rechte Seite zeigt die beschriebene Anordnung aus vertikal ausgerichtetem Kondensator und nachgeschaltetem Behälter. Der Kältemittelmassenstrom unterliegt auf der linken Seite schwallartigen Schwankungen. Durch die Veränderung der Ausrichtung und den Behälter konnte der Kondensatmassenstrom stabilisiert werden. In Folge dessen liegt auch eine konstantere Kälteleistung vor.

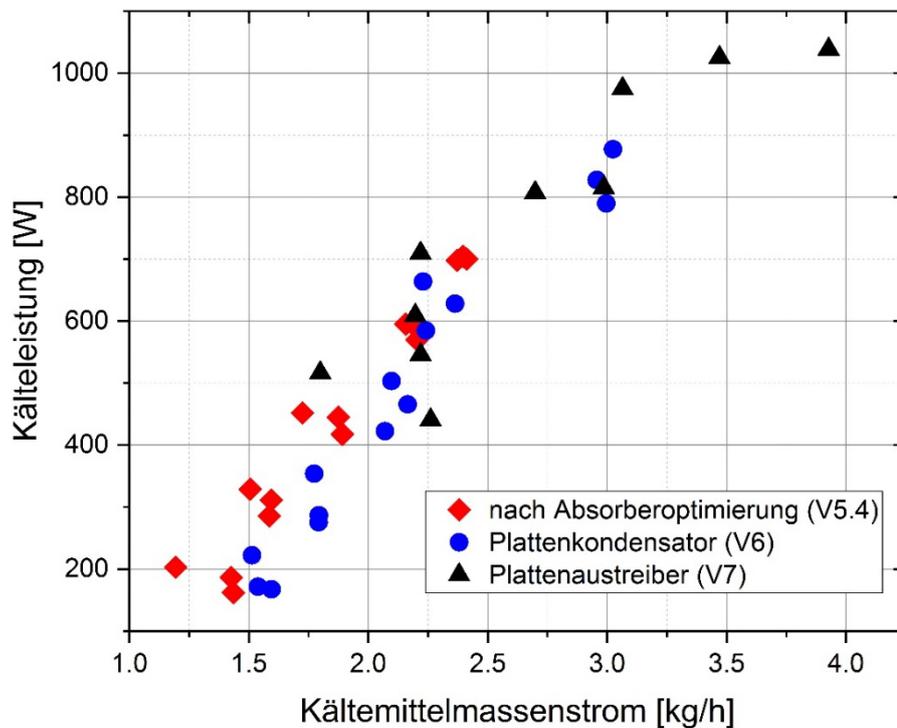


Bild 5: Kälteleistung über dem Kältemittelmassenstrom für verschiedene Anlagenkonfigurationen

In Bild 5 ist die Kälteleistung und der Kältemittelmassenstrom für verschiedene Anlagenkonfigurationen gezeigt. In Blau ist die Anlagenkonfiguration nach Einbau des Plattenkondensators gezeigt. Der maximale Kältemittelmassenstrom wurde auf ca. 3 kg/h erhöht, wodurch die maximale Kälteleistung bis auf 877 W anstieg. Für das Bereitstellen dieses Kältemittelmassenstroms ist die maximale Heizleistung der elektrischen Heizwendeln erreicht. Somit ist eine Veränderung des Austreibers nötig, um einen größeren Kältemittelmassenstrom zu erreichen. Die in schwarz gezeigten Messwerte in Bild 5 zeigen, dass der Plattenkondensator auch größere Kältemittelmassenströme kondensieren kann.

5 DAKM mit Plattenaustreiber

Als Austreibereinheit wird die in [7] untersuchte Kombination aus Plattenaustreiber (TTZ ZD4-10 P2-Platte Z-Form) und einem Förderrohr mit 10,2 mm Innendurchmesser verwendet. Die Länge des Förderrohrs ist aufgrund der Einbausituation geringfügig geringer als in der in [7] vorgestellten Untersuchung. Zur Charakterisierung der nach dem Thermosiphon-Prinzip arbeitenden Austreibereinheit kann das Verhältnis der geförderten armen Lösung zum verdampften Kältemittelmassenstrom betrachtet werden. Dafür ist in Bild 6 der Massenstrom der armen Lösung über dem Kältemittelmassenstrom für den bisher verwendeten elektrisch beheizten Austreiber (bis V6) und die neue Austreibereinheit aus Plattenwärmeübertrager mit angeschlossenen Förderrohr (V7) dargestellt. Das Bild zeigt für den elektrisch beheizten Austreiber einen ungefähr linearen Anstieg der geförderten armen Lösung bei einem steigenden Kältemittelmassenstrom. Im Gegensatz dazu bleibt der geförderte Massenstrom der armen Lösung bei der Austreibereinheit mit Plattenaustreiber unabhängig vom Kältemittelmassenstrom auf höherem Niveau konstant. Der Massenstrom der geförderten armen Lösung beträgt bei Verwendung des Plattenaustreibers ca. 25 – 26 kg/h, während der Massenstrom der geförderten armen Lösung bei Verwendung des elektrisch beheizten Austreibers zwischen 13 kg/h und 23 kg/h beträgt.

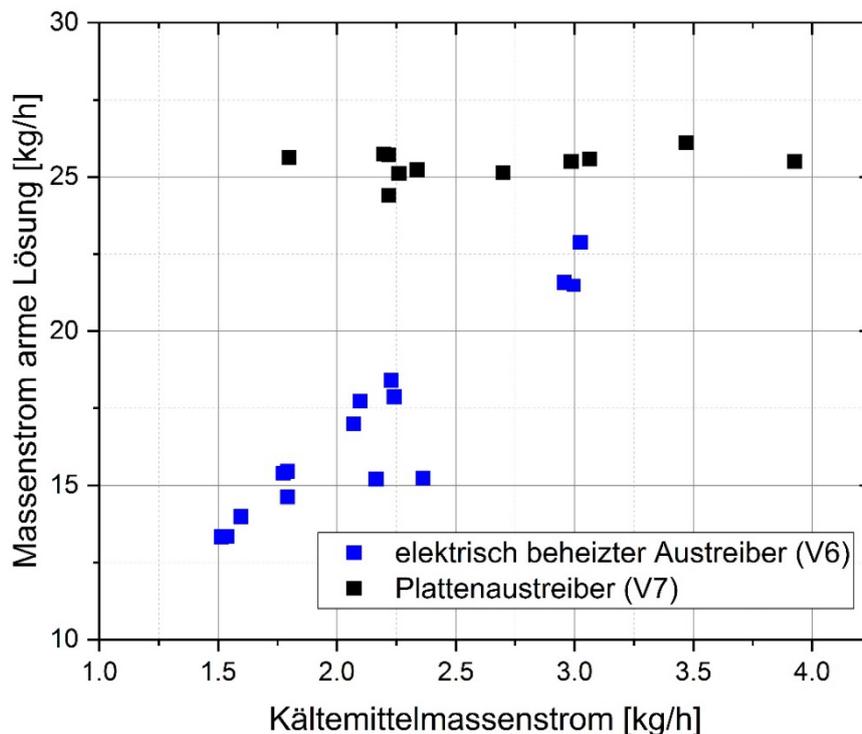


Bild 6: Vergleich der Förderkennlinien des elektrisch beheizten Austreibers mit dem Plattenaustreiber

Der mit dem Plattenaustreiber erhöhte Massenstrom der geförderten armen Lösung lässt sich durch die von BIERLING [14] definierte verringerte relative Heizlänge erklären. Die relative Heizlänge ist definiert als der Anteil der Förderrohrlänge über die Antriebswärme zugeführt wird. Die relative Heizlänge beträgt bei der Verwendung der Heizwendeln $\varphi \approx 60\%$ und bei Verwendung des Plattenaustreibers nur $\varphi \approx 5\%$.

Das Verhalten der Austreibereinheit mit Plattenaustreiber in der DAKM zeigt eine gute Übereinstimmung mit den an einem separaten Austreiberprüfstand erzielten Ergebnissen. Somit kann von einer guten Übertragbarkeit der in [7, 15] veröffentlichten Ergebnissen ausgegangen werden.

Durch den Einsatz des Plattenaustreibers konnte die Kälteleistung weiter gesteigert werden. Im Maximum, bei minimalem Temperaturhub und einer externen Verdunstereintrittstemperatur von 25°C, beträgt die Kälteleistung ca. 1038 W. Der COP, definiert als das Verhältnis aus Kälteleistung zur zugeführten Heizleistung, beträgt zwischen 0,18 und 0,516. Diese Steigerung der maximalen Kälteleistung lässt sich durch den erhöhten Kältemittelmassenstrom erklären, der durch den Plattenaustreiber bereitgestellt wird. Allerdings ist die Kälteleistung, wie in Bild 7 zu sehen, auch bei niedrigeren Verdunstertemperaturen und niedrigeren absoluten Kälteleistungen gestiegen. Der vom elektrisch beheizten Austreiber bereitgestellte Kältemittelmassenstrom von ca. 3 kg/h reicht aus um eine Kälteleistung von ca. 900 W zu erbringen, sodass der erhöhte maximale Kältemittelmassenstrom keine plausible Erklärung für die bei den Verdunstertemperaturen 5 °C bis 20 °C gestiegene Kälteleistung ist.

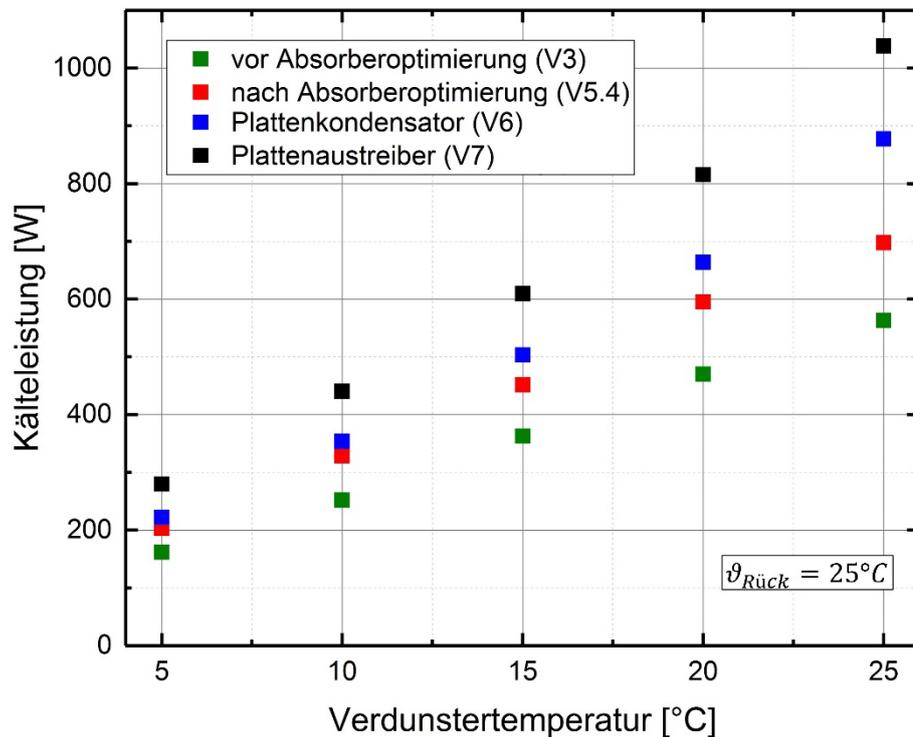


Bild 7: Kälteleistung über der Verdunstereintrittstemperatur für verschiedene Anlagenversionen bei einer Rückkühltemperatur von 25°C

Als Erklärungsansätze können ein gesteigener Volumenstrom des armen Gases als auch eine verbesserte Absorbereffizienz dienen. In einem zwischen den einzelnen Anlagenversionen vergleichbaren Betriebspunkt mit einer Verdunstertemperatur von 15 °C und einer Rückkühltemperatur von 25 °C ist der Volumenstrom des armen Gases von $\dot{V}_{ag,V3} = 0,197 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $\dot{V}_{ag,V7} = 0,301 \text{ m}^3/\text{h}$ und damit um über 50% gestiegen. Auch zwischen den Anlagenversionen V6 und V7 konnte eine Steigerung des Volumenstroms des armen Gases um ca. 4 % verzeichnet werden. Der Hilfgasvolumenstrom steigt durch die Senkung von Druckverlusten, bspw. durch die parallele Durchströmung zweier Absorberflügel, und durch die Erhöhung der Antriebskräfte z.B. durch eine Vergrößerung der Dichtedifferenz zwischen armen und reichem Gas. Durch eine verbesserte Absorption sinken Ammoniakanteil und Dichte des armen Gases, wodurch die Antriebskräfte erhöht werden. Wie in Bild 3 zu sehen ist, ist das nicht genutzte Absorberpotential in der Anlagenkonfiguration mit Plattenaustreiber am geringsten. Dies wirkt sich positiv auf den Hilfgasumlauf aus. Darüber hinaus kann ein ärmeres armes Gas bezogen auf die umgewälzte Hilfgasmenge mehr Ammoniak aufnehmen, wodurch bei gleichem Hilfgasumlauf eine größere Kälteleistung erzeugt werden kann. Für die verbesserte Absorbereffizienz sind eine vergrößerte und turbulenter Phasenrenzfläche durch den gestiegenen Lösungsmittelmassenstrom (vgl. Bild 6) eine plausible Hypothese.

Nach Einsatz des Plattenaustreibers limitiert der verfügbare Kältemittelmassenstrom nicht mehr die Kälteleistung. In Bild 5 ist zu sehen, dass zwischen Kältemittelmassenstrom und Kälteleistung bis zu einem Kältemittelmassenstrom von ca. 3 kg/h ein nahezu linearer Zusammenhang besteht. Bei einer weiteren Steigerung des Kältemittelmassenstroms steigt die Kälteleistung nur noch leicht an. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf einen neuen die Kälteleistung limitierenden Faktor.

5.1 Analyse des Desorptionspotentials im Plattenaustreiber

Mit der neuen Austreibereinheit mit Plattenwärmeübertrager wird die DAKM durch einen Fluidstrom mit höherer Temperatur angetrieben, der dabei durch Wärmeentzug abgekühlt wird. Im Gegensatz zur elektrischen Beheizung wird dadurch die Wärmeübertragung im Austreiber sowie eine möglichst effiziente Nutzung des zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus relevant.

Zur Analyse von Desorption und Absorption einer Absorptionswärmepumpe hat MURL [16] eine Methodik zur Bestimmung von Desorptions- und Absorptionswirkungsgraden entwickelt, die im Folgenden auf den Plattenaustreiber der DAKM angewendet werden soll. Dazu wird die reale Entgasungsbreite $\Delta\xi_E$, ein Potential idealer Stoffübertragung $\Delta\xi_{Des}^{idS}$ und ein Potential für eine ideale Wärme- und Stoffübertragung betrachtet. Die Entgasungsbreite $\Delta\xi_E$ ist die Differenz des Ammoniakmassenanteils der reichen Lösung ξ_{rL} und der armen Lösung ξ_{aL} .

$$\Delta\xi_E = \xi_{rL} - \xi_{aL} = f(\rho_{rL}, \vartheta_{rL}, p_{sys}) - f(\rho_{aL}, \vartheta_{aL}, p_{sys}) \quad (2)$$

Der bei stofflichem Gleichgewicht erreichte Ammoniakmassenanteil $\xi_{aL}^{X=0, \vartheta_{FR}, p_{sys}}$ wird durch die am Förderrohr gemessene Temperatur ϑ_{FR} und den Systemdruck p_{sys} bestimmt. Die Lösung liegt dabei im gerade siedenden Zustand ($X = 0$) vor. Das zusätzliche Desorptionspotential bei idealer Stoffübertragung beträgt also:

$$\Delta\xi_{Des}^{idS} = \xi_{aL} - \xi_{aL}^{X=0, \vartheta_{FR}, p_{sys}} \quad (3)$$

Abweichungen vom stofflichen Gleichgewicht kommen durch lokale Ungleichgewichte des Zweiphasengemischs im Förderrohr und durch das der armen Lösung zugeführte Kondensat aus dem Dephlegmator zustande.

Ist zusätzlich zur Stoffübertragung auch die Wärmeübertragung ideal, so beträgt die Temperaturdifferenz am Pinchpoint 0 K. Somit ist es für die Annahme einer idealen Wärmeübertragung nötig die Lage des Pinchpoints, zu kennen, wofür üblicherweise die internen Temperaturverläufe berechnet werden müssen. Im Fall der betrachteten Austreibereinheit ist der Volumenstrom des externe Fluids immer so hoch, dass der Pinchpoint am Eintritt des externen Fluids liegt. Somit kann für eine ideale Wärmeübertragung angenommen werden, dass die Temperatur der armen Lösung im Förderrohr, der externen Eintrittstemperatur entspricht. Das Desorptionspotential einer zusätzlich zur Stoffübertragung auch idealen Wärmeübertragung $\Delta\xi_{Des}^{idWS}$ wird wie folgt bestimmt.

$$\Delta\xi_{Des}^{idWS} = \xi_{aL}^{X=0, \vartheta_{FR}, p_{sys}} - \xi_{aL}^{X=0, \vartheta_{ext, ein}, p_{sys}} \quad (4)$$

Aus der realen Entgasungsbreite und den Desorptionspotentialen für ideale Stoff- und Wärmeübertragung kann ein Desorptionswirkungsgrad gebildet werden, der den Anteil der erreichten Entgasungsbreite zur maximal möglichen Entgasungsbreite beschreibt.

$$\eta_{\xi, Des} = \frac{\Delta\xi_E}{\Delta\xi_E + \Delta\xi_{Des}^{idS} + \Delta\xi_{Des}^{idWS}} \quad (5)$$

Im Bild 8 ist diese Methode auf den Plattenaustreiber der DAKM angewandt. Es sind fünf Betriebspunkte mit verschiedenen Verdunstertemperaturen und einer Rückkühltemperatur von 25 °C analysiert. Auf der Ordinate ist der Ammoniakmassenanteil aufgetragen. Der grüne Anteil der Balken zeigt die erreichte Entgasungsbreite an. Am oberen Ende kann der Ammoniakmassenanteil der reichen Lösung ξ_{rL} ablesen werden, am unteren Ende der Ammoniakmassenanteil der armen Lösung ξ_{aL} . An die reale Entgasungsbreite schließen sich Balkenabschnitte in gelber und roter Farbe an, die die zusätzlichen Desorptionspotentiale einer idealen Stoffübertragung sowie einer idealen Wärme- und Stoffübertragung anzeigen.

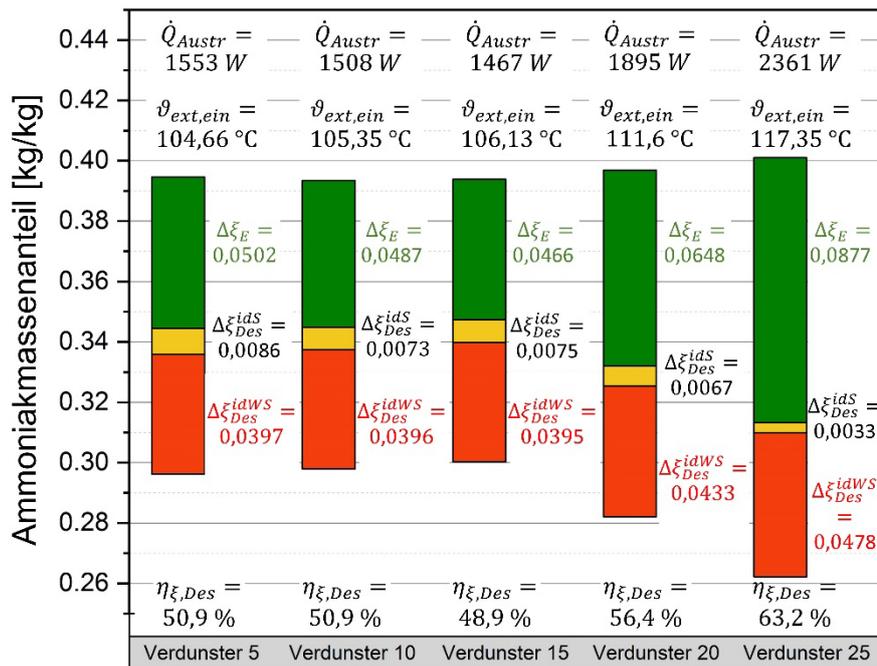


Bild 8: Desorptionspotentiale im Plattenaustreiber für verschiedene Verdunstertemperaturen bei einer Rückkühltemperatur von 25°C

Zusätzlich ist der Desorptionswirkungsgrad angegeben, der Werte zwischen 48,9% und 63,2% erreicht. Somit wird größenordnungsmäßig nur die Hälfte des theoretisch möglichen Desorptionspotentials genutzt. Das größte Verbesserungspotential ist dabei die Wärmeübertragung im Plattenaustreiber. Ein verbesserter Desorptionswirkungsgrad kann entweder die nötige Antriebstemperatur senken oder bei gleicher Antriebstemperatur durch eine ammoniakärmere arme Lösung und damit ein potentiell ammoniakärmeres armes Gas die Kälteleistung steigern.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurden mehrere iterative Entwicklungsschritte zur Steigerung der Kälteleistung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine vorgestellt. In vorangegangenen Untersuchungen konnte der Hilfgasumlauf und damit die Kälteleistung deutlich gesteigert werden. Dies führte zu einer verschlechterten Performance des Absorbers, was sich durch einen erhöhten Ammoniakpartialdruck im armen Gas zeigt, da dieses gasförmige Ammoniak im Absorber nicht mehr absorbiert werden kann. Es wurde ein verbesserter Absorber aus kühlwasserumströmten Drallrohren entwickelt. Gas und Lösung durchströmen dabei zwei parallele Absorberflügel. Im Ergebnis konnte das nicht genutzte Absorberpotential deutlich gesenkt werden und auch bei gesteigerter Kälteleistung steigt der Ammoniakpartialdruck des armen Gases nicht an. Dies deutet darauf hin, dass auch ein größerer Ammoniakstoffstrom absorbiert werden könnte. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass der für eine weitere Steigerung der Kälteleistung nötige Kältemittelmassenstrom nicht in dem zuvor verwendeten luftgekühlten Kondensator aus Rippenrohren verflüssigt werden kann. Deshalb wurde der Kondensator aus Rippenrohren durch einen Plattenwärmeübertrager ersetzt, der die Wärme an einen Rückkühlkreis abführt. Durch eine senkrechte Ausrichtung der Plattenspalte und einen nachgeschalteten Behälter kann das Betriebsverhalten stabilisiert werden. Durch den erhöhten Kältemittelmassenstrom kann die Kälteleistung gesteigert werden. Nach diesen Entwicklungsschritten kann im Diffusions-Absorptionskälteprozess ein erhöhter Ammoniakstoffstrom kondensiert, verdunstet und absorbiert werden, sodass die zuvor entwickelte Austreibereinheit mit Plattenwärmeübertrager zur Steigerung der Heizleistung sinnvoll eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz des Plattenaustreibers wird der maximale Kältemittelmassenstrom auf ca. 3,9 kg/h gesteigert und eine maximale Kälteleistung von 1038 W erreicht. Auch bei niedrigeren Verdunstertemperaturen kann die Kälteleistung gesteigert werden, was auf einen erhöhten Hilfgasumlauf und eine verbesserte Absorbereffizienz zurückzuführen ist. Verbesserungspotentiale des Plattenaustreibers wurden im Hinblick auf eine ideale Stoffübertragung sowie eine ideale Wärme- und Stoffübertragung untersucht.

Insbesondere durch eine verbesserte Wärmeübertragung könnte ein erhebliches zusätzliches Desorptionspotential gehoben werden. So kann nicht nur die nötige Antriebtemperatur gesenkt werden, sondern auch durch die Kopplung der armen Lösung mit dem armen Gas die Kälteleistung gesteigert werden. Dafür könnte ein Plattenwärmeübertrager mit einer erhöhten Wärmeübertragungsfähigkeit eingesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Desorptionswirkungsgrades ist die Abscheidung des im Dephlegmator entstehenden Kondensats. Zur weiteren Steigerung der Kälteleistung muss der limitierende Faktor, der einen weiteren linearen Anstieg der Kälteleistung mit dem Kältemittelmassenstrom behindert, identifiziert und behoben werden.

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 Nomenklatur

Formelzeichen

c	Schallgeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
p	Druck	bar
Δp	Patialdruckdifferenz	bar
\dot{Q}	Wärmestrom	W
w	Strömungsgeschwindigkeit	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
ϑ	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
ρ	Dichte	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ξ	Ammoniakmassenanteil	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\Delta\xi_{Abs}^{id}$	nicht genutztes Absorberpotential	bar
φ	relative Heizlänge	-
η	Wirkungsgrad	-
X	Dampfgehalt	-

Abkürzungen

DAKM	Diffusions-Absorptionskältemaschine
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
LMWÜ	Lösungsmittelwärmeübertrager
MID	Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser
PWÜ	Plattenwärmeübertrager

Indizes

Abs	Absorber
Austr	Austreiber
aG	armes Gas
aL	arme Lösung
Des	Desorption
E	Entgasungsbreite
ein	Eintritt
ext	extern
FR	Förderrohr
i	innen
idS	ideale Stoffübertragung
idWS	ideale Wärme- und Stoffübertragung
id	Idealzustand
Kälte	Kälteleistung
NH_3	Ammoniak
real	realer Zustand
rL	reiche Lösung
Rück	Rückkühlkreis
sys	System
V3	Anlagenversion „V3“
V5.4	Anlagenversion „V5.4“
V6	Anlagenversion „V6“
V7	Anlagenversion „V7“

9 Literatur

- SCHMID, F. *Entwicklung einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine*. Dissertation. Stuttgart, 2016.
- EICKER, U., D. SCHNEIDER, A. TEUßER, A. BIESINGER und T. PÄBLER. *Optimierung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine mittlerer Leistung. Abschlussbericht*, 2007.

3. YOUSFI, M.L., M. SAIGHI, A. DALIBARD, D. SCHNEIDER und U. EICKER. Performance of a 5 kW hot water driven diffusion absorption chiller [online]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **127**(11), 789-799. ISSN 13594311. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.08.035
4. VLOEN, P. und P. KUHL. Gas-Wärmepumpen in den Startlöchern. *SBZ*, 2010, (03/10), 36-38.
5. 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
6. 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
7. BRUNDER, J., K. SPINDLER und K. STERGIARPOULOS. Untersuchung der Austreibereinheit einer Diffusions-Absorptionskältemaschine mit Plattenaustreiber. In: *DKV Tagung 2020*, AA.II 1.17.
8. TILLNER-ROTH, R. und D.G. FRIEND. A Helmholtz Free Energy Formulation of the Thermodynamic Properties of the Mixture {Water + Ammonia} [online]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, **27**(1), 63-96. ISSN 00472689. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.556015
9. MIRL, N., M. DOIL, K. SPINDLER und K. STERGIARPOULOS. Comparison of ammonia/water equations of state under operating conditions of absorption systems [online]. *Fluid Phase Equilibria*, 2020, **526**, 112748. ISSN 03783812. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.fluid.2020.112748
10. SCHMID, F. und K. SPINDLER. Experimental investigation of the auxiliary gas circuit of a diffusion absorption chiller with natural and forced circulation [online]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, **70**, 84-92. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.07.012
11. BRUNDER, J., K. SPINDLER und K. STERGIARPOULOS. Leistungssteigerung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine durch Erhöhung des Hilfgasvolumenstroms. In: *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins*, 2021.
12. FUHS, F., J. BRUNDER und K. STERGIARPOULOS. Untersuchung der Strömungseigenschaften im Absorber einer Diffusions-Absorptionskältemaschine. In: *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins*, 2021.
13. BRUNDER, J. und K. STERGIARPOULOS. Analysis and optimisation of the absorber of a diffusion absorption chiller. In: *Proceedings of the 15th IIR-Gustav Lorentzen conference on Natural Refrigerants 2022*.
14. BIERLING, B. *Untersuchung des thermohydraulischen Förderverhaltens einer Thermosiphonpumpe bei unterschiedlichen Beheizungsarten*. Dissertation. Stuttgart, 2019.
15. KÄPPELER, H., J. BRUNDER und K. STERGIARPOULOS. Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen zur Steigerung der Heizleistung. In: *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins 2022*, S 08.
16. MIRL, N. *Analyse und Optimierung einer einstufigen Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe*. Dissertation. Stuttgart, 2021.