

Visualisierung und Optimierung der Flüssigkeitsverteilung in einem Plattenabsorber

Nico Mirl*, Klaus Spindler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung,
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
Nico.Mirl@igte.uni-stuttgart.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) werden derzeit experimentelle Untersuchungen zur Effizienzsteigerung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe durchgeführt. Alle Wärmeübertrager innerhalb dieser Absorptionswärmepumpe sind als Plattenwärmeübertrager ausgeführt. Im Absorber wird die arme Lösung über eine Düse in den Eintrittskanal des Plattenwärmeübertragers zerstäubt. Hierdurch wird zum einen die arme Lösung mit einer möglichst großen Oberfläche zur Absorption mit dem Kältemittel zusammengeführt. Zum anderen wird durch die Zerstäubung auch die arme Lösung auf die einzelnen Plattenspalte verteilt. Eine optimale Verteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte ist insbesondere für die weitere Absorption unter Wärmeabfuhr innerhalb des Plattenwärmeübertragers von großer Bedeutung.

Das Ziel der Untersuchungen am Absorber besteht darin, die Wärme- und Stoffübertragung innerhalb des Plattenwärmeübertragers durch eine gleichmäßigere Flüssigkeitsverteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte zu erreichen. Hierfür wird ein Versuchsstand verwendet, in dem die Flüssigkeitsverteilung der Zweiphasenströmung anhand des Stoffsystems Luft/Wasser optisch untersucht und optimiert werden kann. Es werden verschiedene kommerziell verfügbare Düsen untersucht und die Eintauchtiefe der Düse in den Plattenwärmeübertrager variiert. Die Ergebnisse werden mit der aktuellen Einbausituation verglichen und die Erkenntnisse auf den Absorber der Absorptionswärmepumpe übertragen. Es werden sowohl die Ergebnisse dieser Untersuchungen als auch der Einfluss der veränderten Düse und deren Position auf die Wärmeübertragung im Absorber aufgezeigt.

Stichwörter:

Absorber, Absorptionswärmepumpe, Komponentenoptimierung, Strömungsvisualisierung, Zweiphasenströmung

1 Einleitung

Der Absorber ist eine für den Absorptionswärmepumpenprozess zentrale Komponente. Im Absorber wird der Kältemitteldampf auf niedrigem Druckniveau mit der armen Lösung gemischt und unter Wärmeabfuhr absorbiert. Dieser Vorgang ist ein gekoppelter Wärme- und Stofftransportprozess, bei dem idealerweise die treibenden Temperatur- bzw. Stoffmengengradienten möglichst klein sind. Für einen optimalen Stoffübergang ist es erforderlich, eine möglichst große Phasengrenzfläche zwischen armer Lösung und Kältemitteldampf zu erzeugen [1].

In der Absorptionswärmepumpe bzw. Absorptionskältemaschine des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung (IGTE) wird als Absorber ein Plattenwärmeübertrager mit einer Vollkegeldüse zur Zerstäubung und zur Verteilung der armen Lösung verwendet. Die Entwicklung des Konzepts wird in [2] beschrieben und für die IGTE-Absorptionskältemaschine übernommen [3]–[5]. Durch die Zerstäubung der armen Lösung entsteht eine große Flüssigkeitsoberfläche, die die Stoffübertragung zwischen dem Kältemitteldampf und der armen Lösung erhöht. In diesem Bereich des Absorbers wird keine Wärme abgeführt. Aufgrund der adiabaten Absorption des Kältemitteldampfes in der armen Lösung steigt die Temperatur der Mischung an, was in [2] auch experimentell belegt wird. Das zweiphasige Gemisch strömt anschließend in die Plattenspalte des Absorbers, wobei unter Wärmeabfuhr weiteres Kältemittel absorbiert wird [2], [3].

In [6]–[8] werden verschiedene Düsenarten für die Verwendung in adiabaten Sprayabsorbern für das Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Lithiumnitrat ($\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$) untersucht. Bei diesen Untersuchungen wird die Stoffübertragung betrachtet sowie die Anreicherung der Lösung mit einer idealen Anreicherung bis zum Sättigungszustand verglichen. Auch Nebenaspekte wie eine hohe Marktverfügbarkeit der Düsen werden diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass eine Nebeldüse aufgrund der größten Oberfläche für die Stoffübertragung den Sättigungszustand am ehesten erreicht. Für diese Bauart sind jedoch sehr kleine Düsenbohrungen nötig, welche bei längerem Anlagenbetrieb verstopfen und damit zu einem kompletten Ausfall führen könnten. Aus diesem Grund wird empfohlen, Vollkegeldüsen zu verwenden. Diese weisen ebenfalls eine hohe Anreicherung der reichen Lösung von bis zu 85% des maximalen Wertes bei deutlich größeren Bohrungen der Düse auf [6]. Es wird aufgezeigt, dass sowohl ein größerer Abstand der Düse zur Flüssigkeitsoberfläche als auch eine hohe Unterkühlung der armen Lösung vor dem Absorbereintritt die Absorption begünstigt. Die Erkenntnis einer Begünstigung der Unterkühlung der armen Lösung deckt sich mit der Entwicklung eines Absorbervorkühlers, der am IGTE erprobt und patentiert wurde [9], [10].

Seit dem Aufbau aus [4] wird ein Plattenwärmeübertrager mit zwei Durchgängen der Firma AlfaLaval des Typs AlfaNova HP27-64H als Absorber verwendet. In [11] wird zudem die verwendete Düse gegenüber dem Aufbau aus [2] verändert. Es werden dabei jedoch keine ausführlichen optische Untersuchungen zur optimalen Düsenposition oder einem optimalen Spraywinkel wie in [2] durchgeführt. In [5] und in [12] wird das ungenutzte Potenzial im Absorptionsprozess quantifiziert. Es wird gezeigt, dass in einigen Betriebspunkten die Entgasungsbreite $\Delta\xi_E$ im Fall einer idealen Absorption mehr als verdoppelt werden könnte [12].

Die Erkenntnis, dass die Verteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte maßgebend für die Absorption des Kältemittels ist, wird in [13] anhand eines Fallfilmabsorbers bestätigt. Darin wird auch aufgezeigt, dass sich eine harte Prägung der Platten für eine gleichmäßigere Strömungsverteilung innerhalb eines Plattenspaltes besser eignet als eine weiche Plattenprägung [13]. Es wird daher eine harte Plattenprägung für den Absorber beibehalten.

In dieser Arbeit werden optische Untersuchungen zur Verteilung der Flüssigkeit auf die Plattenspalte in einem Ersatzsystem mit dem Stoffpaar Luft/Wasser in einem separaten Versuchsstand durchgeführt. An diesem Versuchstand werden vier verschiedene Vollkegeldüsen untersucht mit der Zielsetzung, eine möglichst homogene Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte zu erreichen. Anschließend werden zwei grundlegend verschiedene Verteilungskonzepte näher untersucht.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den optischen Untersuchungen, werden die beiden Verteilungskonzepte mit der jeweils optimalen Düse und dem optimalen Düsenabstand im Betrieb der Absorptionswärmepumpe untersucht. Es werden die Unterschiede zur bisherigen Düse bzw. Verteilung anhand der Wärmeübertragungsfähigkeit des Absorbers kA_{Abs} aufgezeigt. Anhand dieser Datenlage werden die relevanten Einflussgrößen identifiziert und Anforderungen an die Düse sowie deren Position für eine maximale Wärmeübertragungsfähigkeit des Absorbers kA_{Abs} abgeleitet.

2 Aufbau und Funktion der Absorptionswärmepumpe

In einer Absorptionswärmepumpe wird für die Druckerhöhung ein thermischer Verdichter verwendet. Dabei sind zwei Prozessschritte wesentlich, die Absorption des Kältemittels in einem Lösungsmittel bei niedrigem Druck sowie die anschließende Trennung dieser beiden Stoffe auf hohem Druckniveau der Wärmepumpe. Nachfolgend wird der Aufbau einer Absorptionswärmepumpe anhand des Prozessschemas in Abbildung 1 erläutert.

Analog zu einer Kompressionswärmepumpe wird im Kondensator der Kältemitteldampf (1) verflüssigt. Dabei wird ein Teil des Nutzwärmestroms \dot{Q}_K aus dem Prozess entzogen. Das Kältemittel-Reservoir (2) dient der Zwischenspeicherung von flüssigem Kältemittel. Dadurch wird der Betriebsbereich der Absorptionswärmepumpe vergrößert und Temperaturschwankungen der externen Kreisläufe ausgeglichen [3]. Der Kältemittelwärmeübertrager (KMWÜ) erhöht die Effizienz des Prozesses. Hierfür wird das flüssige Kältemittel nach dem KM-Reservoir im KMWÜ (3→4) unterkühlt und der Kältemitteldampf (6→7) überhitzt. Mit dem Kältemittel-expansionsventil (KM-Ventil) wird das flüssige Kältemittel isenthalp auf den Tiefdruck der Absorptionswärmepumpe gedrosselt (4→5). Beim Tiefdruck liegt das Kältemittel zweiphasig vor und kann auf einem niedrigen Temperaturniveau verdampfen (5→6). Im Absorber wird der Kältemitteldampf (7) mit der armen Lösung (8) zusammengeführt. Die Mischung der beiden Ströme erfolgt innerhalb des Absorbers. Der Kältemitteldampf wird dabei von der armen Lösung absorbiert. Bei diesem Vorgang wird die Absorptionswärme freigesetzt, welche für die vollständige Absorption des Kältemittels abgeführt werden muss. Der resultierende Absorptionswärmestrom \dot{Q}_{Abs} wird hierfür auf einem mittleren Temperaturniveau an das Heizsystem übertragen und stellt einen weiteren Teil des nutzbaren Wärmestroms dar. Am Ende des Absorptionsprozesses hat die reiche Lösung einen höheren Ammoniakmassenanteil ξ_{rL} und liegt im flüssigen Zustand vor (9). Die flüssige reiche Lösung (9) wird in einen Pumpenvorlagebehälter geleitet. Die Füllhöhe der flüssigen Phase im Pumpenvorlagebehälter wird über das Lösungsmittelventil auf einen konstanten Wert geregelt. Hierdurch wird das Ansaugen einer Gasphase durch die Lösungsmittelpumpe (10) verhindert. Die Lösungsmittelpumpe fördert die reiche Lösung und bringt

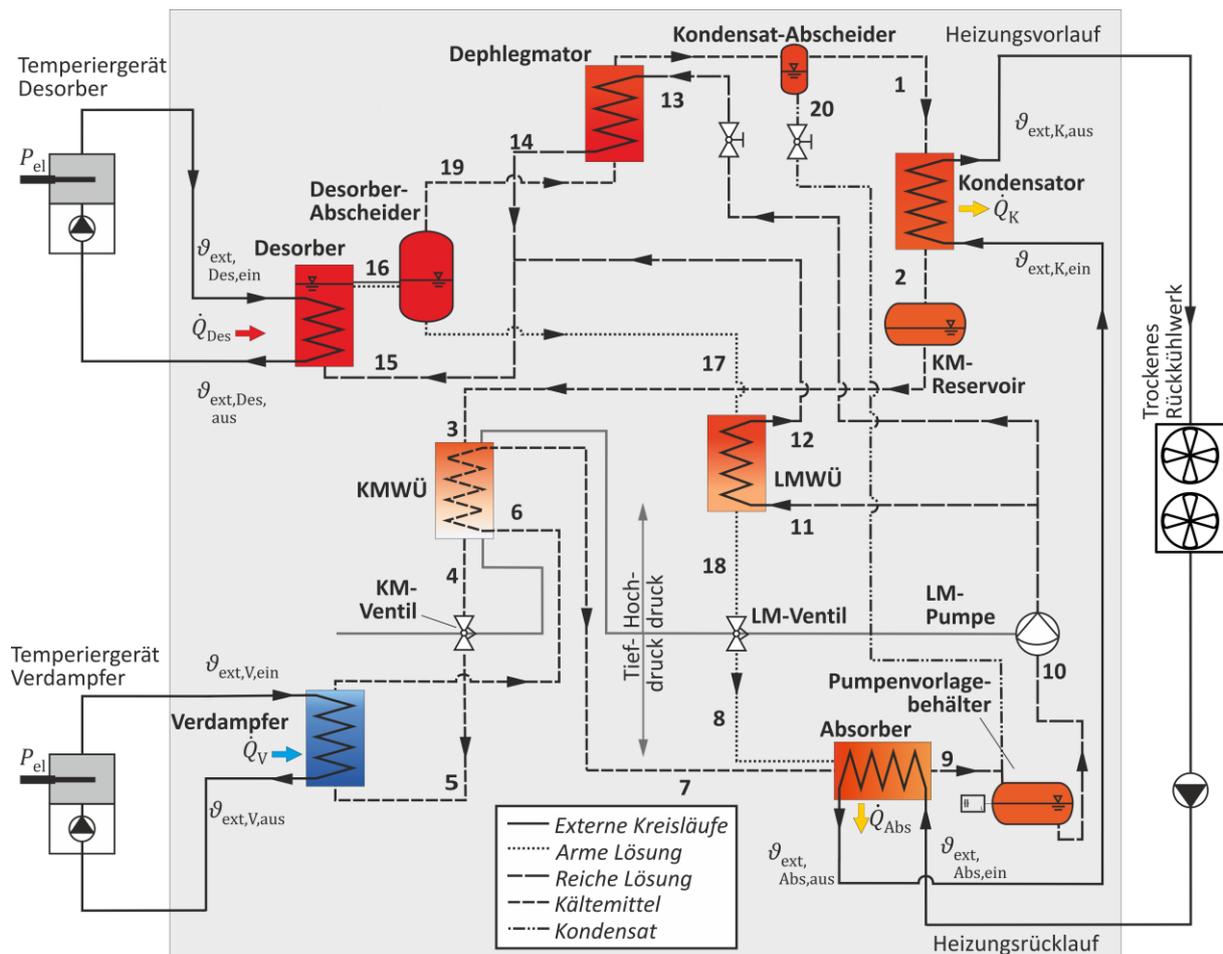


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Absorptionswärmepumpe.

diese auf das Hochdruckniveau der Absorptionswärmepumpe. Nach der Lösungsmittelpumpe wird die reiche Lösung auf zwei parallele Stränge aufgeteilt. Ein Teil der reichen Lösung wird zur Effizienzsteigerung durch einen Lösungsmittelwärmeübertrager (LMWÜ) geleitet. Dort findet eine interne Wärmerückgewinnung zwischen armer Lösung (17→18) und reicher Lösung (11→12) statt. Der andere Teil der reichen Lösung strömt durch den Dephlegmator. Dort findet ebenfalls eine interne Wärmerückgewinnung vom Kältemitteldampf (19→1) zur reichen Lösung (13→14) statt. Die beiden Teilströme werden vor dem Eintritt in den Desorber (15) wieder zusammengeführt. Unter Zufuhr des Wärmestroms \dot{Q}_{Des} auf einem hohen Temperaturniveau wird die reiche Lösung teilweise verdampft (15→16). Im Desorber-Abscheider wird der zweiphasige Strom in eine arme Lösung (17) und einen Kältemitteldampf (19) getrennt. Die arme Lösung wird über den LMWÜ zum Absorber (17→18→8) zurückgeführt und für den Absorptionsprozess wiederverwendet.

Der aus dem Desorber abgeführte Kältemitteldampf ist aufgrund seines thermodynamischen Gleichgewichts mit dem Lösungsmittel Wasser kein reines Ammoniak. Um die Reinheit des Kältemittels zu erhöhen, wird der Dampf im Dephlegmator teilweise kondensiert. Das Kondensat weist dabei einen Ammoniakmassenanteil auf, der in etwa dem der reichen Lösung entspricht. Im Gegensatz zu dem in [5] verwendeten Konzept wird bei diesem Aufbau das anfallende Kondensat über einen Kondensat-Abscheider aus dem Dampf getrennt. Das Kondensat (20) wird über eine Drossel auf das Tiefdruckniveau entspannt und in den Pumpenvorlagebehälter (9) eingeleitet. Der Kältemitteldampf strömt zum Kondensator (1), wodurch der Kreisprozess geschlossen ist.

3 Optische Absorber-Untersuchung im Stoffsystem Luft/Wasser

Im Absorber findet die Absorption des Kältemitteldampfes in der armen Lösung statt. In dem verwendeten Konzept wird die arme Lösung über eine Düse in den Eintrittskanal des als Plattenwärmeübertrager ausgeführten Absorbers zerstäubt. Hierdurch wird die arme Lösung mit einer möglichst großen Oberfläche zur Absorption mit dem Kältemitteldampf zusammengeführt. Außerdem soll durch die Zerstäubung auch die Lösung möglichst gleichmäßig auf die Plattenspalte verteilt werden. Eine gleichmäßige Verteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte ist insbesondere für die weitere Absorption unter Wärmeabfuhr innerhalb des Plattenwärmeübertragers von großer Bedeutung, [2], [13].

3.1 Versuchsbeschreibung

In einem separaten Versuchsstand wird die Flüssigkeitsverteilung der Zweiphasenströmung anhand eines Ersatzsystems mit der Stoffpaarung Luft/Wasser optisch untersucht. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in

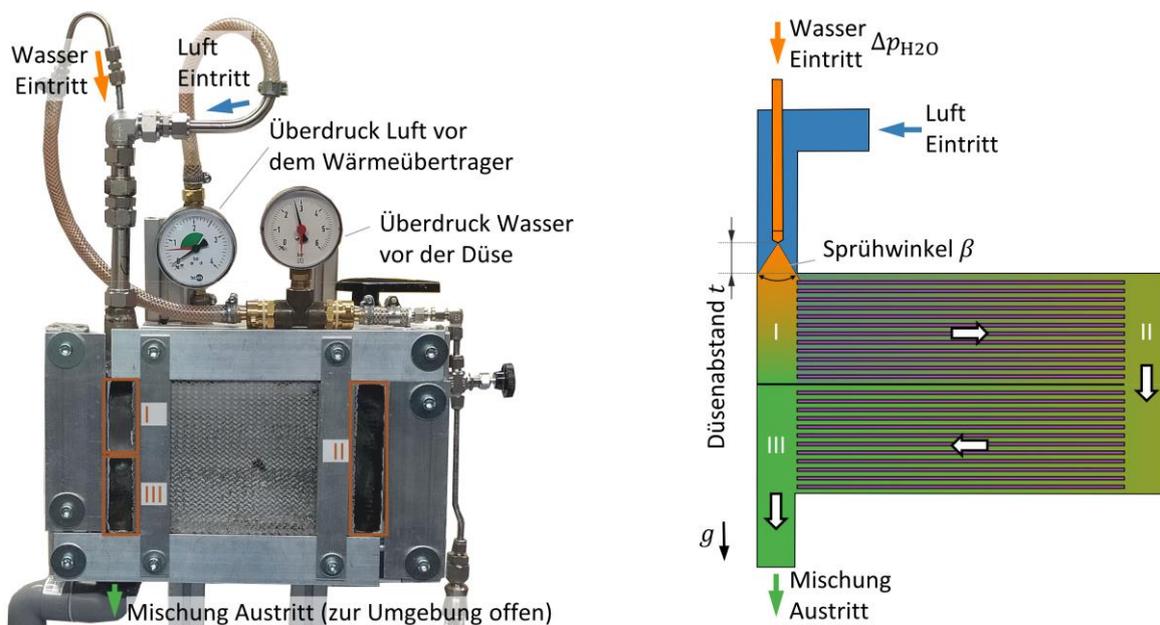


Abbildung 2: Versuchsstand zur Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte im Stoffsystem Luft/Wasser: links ist der Aufbau dargestellt und rechts ist eine Skizze mit den variierten Größen gezeigt.

Abbildung 2 dargestellt. Für diesen Aufbau wird ein Plattenwärmeübertrager, welcher baugleich zum verwendeten Absorber ist, verwendet. Um einen Einblick in dessen Inneres zu erhalten wird eine Längsseite vollflächig abgefräst. An dieser Seite wird eine Acrylglasscheibe auf den Wärmeübertrager geklebt und zusätzlich über Blechstreifen an den Kanten fixiert.

Die Zuführung der Druckluft und des Wassers erfolgt analog zum Absorber der Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe. Der Kältemitteldampf wird in diesem Aufbau durch Druckluft ersetzt und anstatt der armen Lösung wird Wasser verwendet. An ein $\frac{3}{4}$ "-Winkelstück wird ein $\frac{1}{4}$ "-Rohr gasdicht zur Umgebung angeschweißt, sodass das $\frac{1}{4}$ "-Rohr konzentrisch in dem $\frac{3}{4}$ "-Rohr verläuft. Die Druckluft strömt in dem Ringspalt zwischen $\frac{1}{4}$ "- und $\frac{3}{4}$ "-Rohr direkt in den Wärmeübertrager ein. Das Wasser wird in dem innenliegenden $\frac{1}{4}$ "-Rohr zur Düse geführt. Da das innere, wasserführende Rohr fest mit dem Winkelstück verbunden ist, wird der Düsenabstand t durch Längenänderung des äußeren $\frac{3}{4}$ "-Rohres verändert. Des Weiteren kann die zur Zerstäubung des Wassers verwendete Düse getauscht werden. In dieser Untersuchung werden vier kommerziell verfügbare Vollkegeldüsen mit unterschiedlichen Sprühwinkeln β von 60° , 90° und 120° und unterschiedlicher benötigter Druckdifferenz von $\Delta p_{H_2O} \approx 2,8 \text{ bar}$ bzw. $\Delta p_{H_2O} \approx 5,0 \text{ bar}$ untersucht.

Die Beurteilung der Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte erfolgt durch eine optische Methode. Hierzu werden im stationären Betrieb des Versuchsaufbaus aus Abbildung 2 $n = 30$ Fotos mit einer Belichtungszeit von $\tau = 0,8 \text{ ms}$ mit einem konstanten zeitlichen Abstand von 3 s aufgenommen. Diese Fotos werden nach dem in Abbildung 3 dargestellten Vorgehen für die Auswertung aufbereitet. Dabei werden die Graustufen-Fotos in MATLAB zur weiteren Verarbeitung eingelesen. In MATLAB werden die Bilddateien als Matrizen behandelt. Die Dimension dieser Matrix entspricht den Abmessungen der Bilddatei in Bildpunkten. Jeder dieser Bildpunkte hat eine Graustufe zwischen 0 und 1. Der Wert 0 entspricht dabei der Farbe Schwarz und der Wert 1 der Farbe Weiß. Über die MATLAB-Inbuilt-Funktion „imbinarize“ wird das Foto unter Vorgabe eines konstanten Schwellwertes binarisiert. Hierbei wird jedem Bildpunkt, der eine Graustufe oberhalb des Schwellwerts besitzt, der Wert 1 zugewiesen und jedem Bildpunkt der unterhalb des Schwellwerts liegt der Wert 0 zugewiesen. Das so entstandene Binärbild besitzt damit nur noch schwarze Bildpunkte, deren Wert 0 ist, und weiße Bildpunkte mit

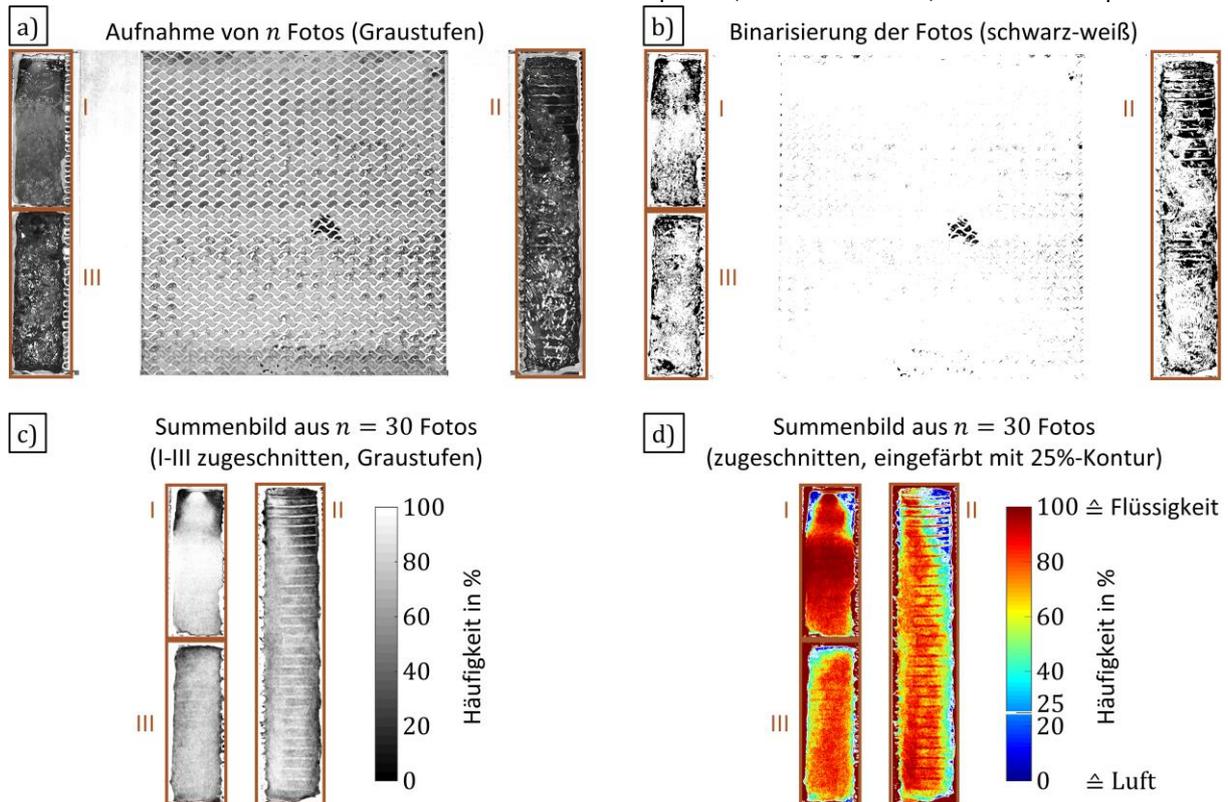


Abbildung 3: Darstellung des Ablaufs bei der Versuchsauswertung anhand eines Beispiels. In a) ist ein Foto gezeigt, dass in b) binarisiert dargestellt ist. In c) ist ein auf die Auswertungsbereiche I-III zugeschnittenes Summenbild aus 30 binarisierten Fotos gezeigt, das in d) für einen besseren Vergleich nachträglich eingefärbt ist und um Konturlinie bei einer Häufigkeit von 25 % ergänzt wird.

dem Wert 1. Bei diesem Bearbeitungsschritt hat die Ausleuchtung der Auswertungsbereiche I-III des Wärmeübertragers einen Einfluss auf den benötigten Schwellwert. Um einen hohen Kontrast in der Auswertung zu erhalten, werden daher unterschiedliche versuchsstandsspezifische Schwellwerte für die verschiedenen Auswertungsbereiche verwendet. Der Auswertungsbereich I wird mit einem Schwellwert von 0,14 binarisiert und die Bereiche II und III mit einem Schwellwert von 0,08.

Wie in Abbildung 3 b) zu sehen ist, werden so die Bereiche weiß dargestellt, in denen das Licht beispielsweise durch die flüssige Phase gebrochen wird. Die flüssige Phase ist hierdurch in den Auswertungsbereichen im Binärbild gut erkennbar, wodurch die Flüssigkeitsverteilung für ein einzelnes Foto besser sichtbar gemacht wird. Für eine weitere Auswertung werden die binarisierten Fotos auf die Bereiche I bis III zugeschnitten. Alle weiteren Bildausschnitte enthalten keine Informationen über die zweiphasige Strömung und werden daher verworfen.

Jedes Foto stellt dabei ausschließlich eine Momentaufnahme der Strömung dar. Die Strömung der zweiphasigen Mischung ist allerdings auch im stationären Betrieb eine schwallartige Strömung. Um die Strömung vollständig erfassen zu können, werden daher mehrere binarisierte Fotos zu einem Summenbild zusammengeführt. Ein Beispiel für ein Summenbild ist in Abbildung 3 c) gezeigt. Hierzu werden die Werte aller Bildpunkte des Binärbildes durch die Anzahl der verwendeten Fotos $n = 30$ dividiert. Auf diese Weise werden Bildpunkte, die in dem binarisierten Foto weiß sind, also den Wert 1 haben, erneut in eine Graustufe umgerechnet. Diese Bilder werden in einem zweiten Schritt durch die Bildung einer Summe aus $n = 30$ solcher Bilder zu einem Summenbild zusammengefügt. In dem so entstandenen Summenbild hat jeder Bildpunkt erneut eine Graustufe, die zwischen 0 und 1 liegt.

Um die optische Auswertung des Summenbildes zu vereinfachen und die Unterschiede in den Summenbildern besser beurteilen zu können, wird im letzten Bearbeitungsschritt jedem Wert zwischen 0 und 1 eine Farbe anhand des MATLAB Farbschemas „jet“ zugeordnet. Ein dunkelroter Bildpunkt in den Auswertungsbereichen entspricht dabei dem Wert 1 und stellt einen Bildpunkt dar, in dem häufiger eine Lichtreflexion detektiert wird. Ein blauer Bildpunkt entspricht dem Wert 0 und zeigt Stellen auf, in denen keine Lichtreflexion erkannt wird.

Zusätzlich wird zur Abgrenzung der Strömungskontur eine berechnete Konturlinien bei einer Häufigkeit von 25 % eingezeichnet.

Durch die Binarisierung gehen allerdings auch manche Informationen verloren. Aus diesem Grund wird für die Auswertung jeder Messung ein Foto ausgewählt, das möglichst gut mit dem Summenbild übereinstimmt. In dieses Foto wird ebenfalls die 25%-Konturlinie eingezeichnet.

3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Für eine gezielte Optimierung der Wärme- und Stoffübertragung innerhalb des Absorbers ist ein tiefgehendes Verständnis über den Einfluss der Düse auf den Absorptionsprozess nötig. Durch die Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte sollen in dieser Arbeit die wesentlichen Einflussgrößen der Düse eines Sprayabsorbers identifiziert werden.

Hierfür soll zunächst der Referenzzustand erfasst werden. In [3]–[5] wird eine Vollkegeldüse der Firma Lechler des Typs 460.566 verwendet, die einen Sprühwinkel von $\beta = 90^\circ$ aufweist. Bei einem Volumenstrom von $\dot{V}_{al} \approx 210 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ der zu zerstäubenden Lösung benötigt dieser Typ eine Druckdifferenz von etwa $\Delta p \approx 5 \text{ bar}$. Da dieser Düsentyp derzeit schrittweise vom Markt genommen wird, werden für den Vergleich neue Vollkegeldüsen der Firma Lechler der Typen 490.604, 490.606 und 490.608 verwendet. Der Düsenhersteller wirbt bei den neuen Düsen der Typen 490.60x mit einer besonders gleichmäßigen Flüssigkeitsverteilung [15]. Der Sprühwinkel der drei Düsen beträgt $\beta = 60^\circ$, $\beta = 90^\circ$ und $\beta = 120^\circ$. Diese Düsen benötigen für den gleichen Volumenstrom $\dot{V}_{al} \approx 210 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ eine geringere Druckdifferenz von etwa $\Delta p \approx 2,8 \text{ bar}$. Dies wirkt sich positiv auf die Ventilautorität und damit auf die Regelgüte des im Absorptionswärmepumpenprozess vorgeschalteten Expansionsventils aus [16]. In den Messungen am Versuchsstand zur Flüssigkeitsverteilung wird die verringerte benötigte Druckdifferenz für den gleichen Volumenstrom durch einen verringerten Druck vor der Düse berücksichtigt. Für die Gasströmung wird ein über alle Messungen gleichbleibender Überdruck vor dem Wärmeübertrager von 0,2 bar eingestellt.

Die Flüssigkeitsverteilung der vier verschiedenen Düsen ist in Abbildung 4 bei einem Düsenabstand von $t = 0 \text{ mm}$ gegenübergestellt. In a) ist die Auswertung der bisher in der Absorptionswärmepumpe verwendeten Vollkegeldüse gezeigt. Der Sprühwinkel dieser Düse beträgt bei ungestörter Strömung $\beta = 90^\circ$, was auch direkt am Austritt aus der Düse in den Messungen entnommen werden kann. Durch die Gasströmung wird der

Sprühkegel beeinflusst, sodass der tatsächliche Sprühwinkel im Plattenwärmeübertrager kleiner ist. Der gleiche Effekt kann ebenfalls bei allen anderen verwendeten Düsen beobachtet werden.

Obwohl die obersten Plattenspalte in allen vier Messungen nicht direkt durch das Spray mit Flüssigkeit beaufschlagt werden, zeigen die Summenbilder im Auswertungsbereich II einen Flüssigkeitsaustritt aus den obersten Plattenspalten. Durch einen zusätzlichen Vergleich mit den repräsentativen Fotos der Strömung können die Ursachen hierfür identifiziert werden. Bei den in a), c) und d) gezeigten Düsen ist der maßgebende Grund hierfür, dass im Bereich I an der Acrylglasscheibe ein dünner Flüssigkeitsfilm durch die Gasströmung nach oben umgelenkt wird. Dieser Flüssigkeitsfilm reflektiert dabei das Licht in geringem Maße, weshalb dieser in dem Summenbild kaum erkennbar ist. In einem geschlossenen Plattenwärmeübertrager ohne Acrylglasscheibe wäre diese aufwärtsgerichtete Strömung durch die in den Verteilkanal hineinragende Rippenstruktur der einzelnen Platten nicht möglich. Die obersten Plattenspalte würden deshalb von einer deutlich geringeren Flüssigkeitsmenge durchströmt werden.

In Abbildung 4 b) strömt durch die oberen Plattenspalte im Abschnitt II tatsächlich nur eine sehr geringe Flüssigkeitsmenge. Die Acrylglasscheibe beschlägt in diesem Bereich. Die Reflexionen der beschlagenen Scheibe werden daher auf vielen Fotos an der gleichen Stelle erkannt, was zu diesem hohen Häufigkeitswert führt. Tatsächlich ist im Abschnitt II der Abbildung 4 b) vor allem der Bereich durchströmt, auf den auch der Sprühkegel der Düse auftrifft.

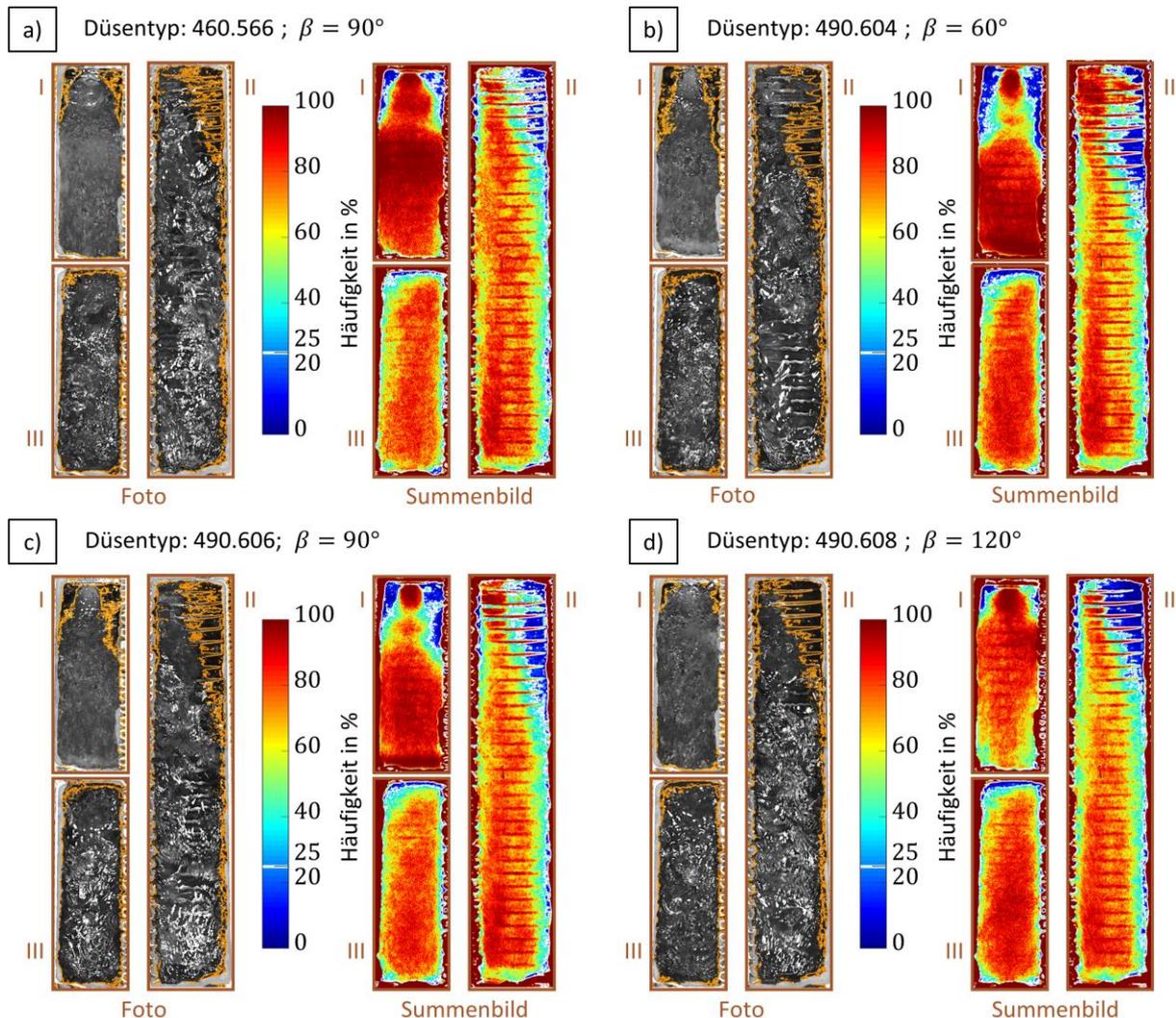


Abbildung 4: Auswertung der Flüssigkeitsverteilung innerhalb eines Plattenwärmeübertragers bei Verwendung verschiedener Vollgehdüsen mit einem Düsenabstand von $t \approx 0$ mm.

In Abbildung 4 a) und c) sind die Auswertungen der beiden Vollkegeldüsen mit einem Sprühwinkel von $\beta = 90^\circ$ gezeigt. Zwischen diesen beiden Typen sind deutliche Unterschiede in der Flüssigkeitsverteilung erkennbar. Dabei weisen drei Effekte auf eine höhere Flüssigkeitsmenge im äußeren Bereich des Sprühkegels beim Typ 460.566 hin. Zum einen zeigen die Aufnahmen, dass bei dem in a) gezeigten Düsentyp 460.566 in der Mitte des Bereichs I mehr Wasser auf die Acrylglasplatte trifft als bei dem in c) gezeigten Typ 490.606. Zum anderen ist der Einfluss der Gasströmung auf den Sprühwinkel in a) geringer. Darüber hinaus ist in c) im Gegensatz zu a) am Boden des Bereichs I eine Flüssigkeitsansammlung vorhanden. Da in beiden Fällen der Flüssigkeitsvolumenstrom ungefähr gleich ist, wird in c) eine geringere Flüssigkeitsmenge über die direkt angesprühnten Plattenspalte abgeführt. Eine größere Wassermenge strömt somit in der Mitte des Verteilkanals nach unten und bildet dabei die sichtbare Wasseransammlung.

Die in Abbildung 4 d) gezeigte Düse mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ weist eine ähnlich gleichmäßige Häufigkeit über der Höhe des Bereichs I wie die Referenzdüse des Typs 460.566 auf. Des Weiteren kommt es bei dieser Düse nicht zu einer Flüssigkeitsansammlung am Boden des Bereichs I. Auch die oberen Plattenspalte werden durch den hohen Sprühwinkel besser durch den Sprühkegel mit Flüssigkeit beaufschlagt. Die Verringerung des Sprühwinkels durch die überlagerte Gasströmung ist zwar in der Messung sichtbar, aber nicht so stark ausgeprägt wie bei den Düsen in b) und c). Eine Düse mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ scheint daher für die Verteilung am besten geeignet zu sein.

Insgesamt zeigen die Messungen bei einem Düsenabstand von $t \approx 0$ mm, dass die Luftströmung den Sprühkegel der Düsen des Typs 490.60x stärker beeinflusst als dies bei der Referenzdüse der Fall ist. Als Ursache wird die geringere benötigte Druckdifferenz der Düsen bei gleichem Volumenstrom ausgemacht. Hierdurch ist der Impuls, mit dem die Flüssigkeit aus der Düse austritt, geringer.

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Konzepte für eine möglichst homogene Flüssigkeitsverteilung näher untersucht. Das Konzept A ist eine Weiterentwicklung des bisher verfolgten Konzepts. Hierfür wird der Düsenabstand t derart erhöht, dass der Sprühkegel den Eintrittsstutzen des Plattenwärmeübertragers rechnerisch gerade tangiert. Das zweite Konzept B ist an die Untersuchungen aus [2] angelehnt. Dabei wird dem Plattenwärmeübertrager ein Mischrohr vorgeschaltet, in dem die adiabate Absorption stattfindet. Die Verteilung der zweiphasigen Strömung auf die Plattenspalte erfolgt anschließend unkontrolliert durch das resultierende Druckfeld innerhalb des Verteilkanals. Beide Konzepte werden nachfolgend sowohl in Untersuchungen am optischen Versuchsstand als auch durch Messungen innerhalb der Absorptionwärmepumpe bewertet.

3.2.1 Optische Untersuchung in Konzept A

In diesem Konzept soll der Sprühkegel möglichst viele Plattenspalte direkt mit Flüssigkeit beaufschlagen. Damit auch die obersten Plattenspalte des Wärmeübertragers direkt angesprüht werden, muss ein möglichst hoher Sprühwinkel für dieses Konzept verwendet werden. Aus diesem Grund wird die Düse des Typs 490.608 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ eingesetzt. Der ungestörte Sprühkegel würde bei dieser Düse den Eintrittsstutzen des Plattenwärmeübertragers bei einem Düsenabstand von $t = 6,9$ mm gerade tangieren. Eine Platzierung der Düse mit einer Genauigkeit von unter einem Millimeter kann innerhalb der Absorptionwärmepumpe nicht sichergestellt werden. Bei einer zu hohen Düsenplatzierung würde das Rohr von dem Sprühkegel erfasst werden, wodurch ein Flüssigkeitsfilm in den Verteilkanal rinnen würde. Um dies zu vermeiden wird nachfolgend ein Düsenabstand von $t \approx 6$ mm näher untersucht. In Abbildung 5a) ist der schematische Aufbau in Konzept A dargestellt.

Die Auswertung der Flüssigkeitsverteilung in Konzept A ist in Abbildung 5 b) gezeigt. Im Auswertungsbereich I wird über nahezu der gesamten Höhe eine Flüssigkeit erkannt. Auch im Bereich der obersten Plattenspalte ist eine Flüssigkeitsströmung zu sehen. Im Auswertungsbereich II ist hierdurch im oberen Viertel sowohl die Häufigkeit als auch die von Flüssigkeit durchströmte Breite höher als im Fall der $\beta = 120^\circ$ Düse bei einem Düsenabstand von $t \approx 0$ mm.

Im Vergleich mit der $\beta = 90^\circ$ -Referenzdüse des Typs 460.566 in Abbildung 4 a) ist nahezu kein Unterschied in den Auswertungsbereichen II und III erkennbar. Hierdurch ist direkt der Einfluss des geringeren Impulses der Flüssigkeitsströmung durch eine geringere benötigte Druckdifferenz der verwendeten $\beta = 120^\circ$ -Düse und der daraus resultierenden stärkeren Beeinflussung durch die Luftströmung erkennbar. Sowohl der höhere Düsenabstand von $t \approx 6$ mm als auch der höhere Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ in Konzept A würden bei ungestörtem Sprühkegel eine Erhöhung der Flüssigkeitshäufigkeit in den oberen Plattenspalten des ersten

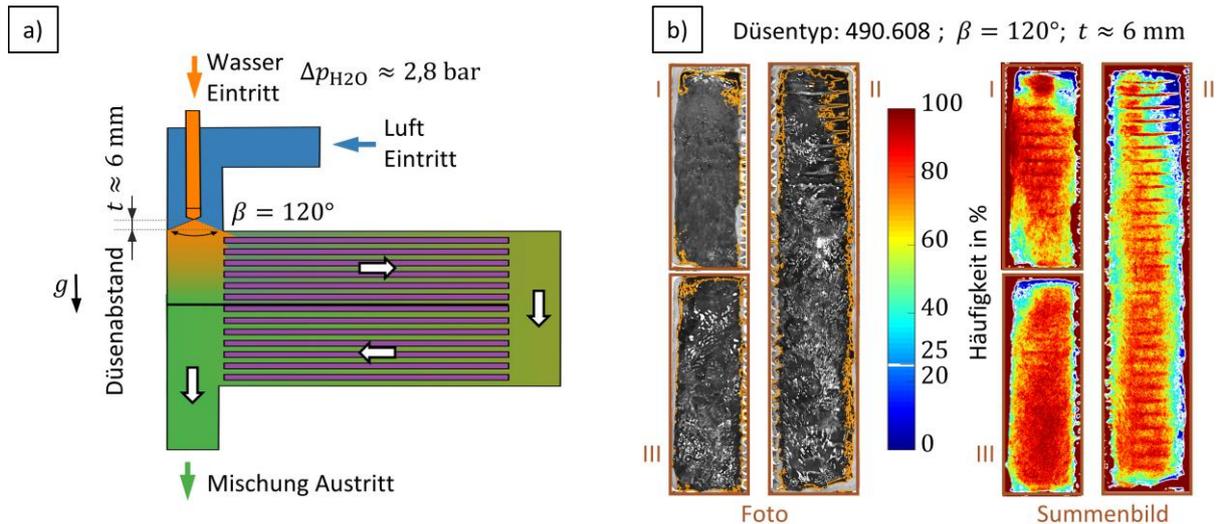


Abbildung 5: Auswertung der Flüssigkeitsverteilung innerhalb eines Plattenwärmeübertragers in Konzept A: in a) ist der schematische Aufbau des Konzeptes gezeigt und in b) die Auswertung der Flüssigkeitsverteilung anhand eines repräsentativen Fotos und anhand des Summenbildes.

Durchgangs bewirken. Da die Flüssigkeitsverteilung im Referenzkonzept aus Abbildung 4 a) jedoch nahezu identisch mit der Flüssigkeitsverteilung in Konzept A ist, muss die Ursache hierfür der höhere Einfluss der Luftströmung sein. Die Auswirkungen der Dampfströmung auf den Sprühkegel und die Flüssigkeitsverteilung kann somit durch die optisch sehr ähnliche Flüssigkeitsverteilung anhand von Konzept A im Vergleich mit dem Referenzkonzept bestätigt werden. Die Auswirkung des höheren Dampfströmungseinflusses auf die Flüssigkeitsverteilung innerhalb des Absorptionsprozesses muss in der realen Absorptionswärmepumpe beurteilt werden.

3.2.2 Optische Untersuchung in Konzept B

Das in Abbildung 6 a) schematisch gezeigte Konzept B wird in Anlehnung an die Untersuchungen aus [2] betrachtet. Dort wird im letzten Versuchsaufbau die Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte durch eine Düse mit einem Sprühwinkel von $\beta = 45^\circ$ und eine dem Plattenabsorber vorgeschaltete Mischkammer realisiert. In dieser Arbeit wird als Mischkammer ein $\frac{3}{4}$ "-Rohrstück verwendet, in das die Flüssigkeit über eine Düse des Typs 460.604 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 60^\circ$ eingespritzt wird. Auf gleicher Höhe wie die Düse befindet sich die Zufuhr der Luft-, bzw. Dampfströmung. Hierdurch soll eine ideale Durchmischung und adiabate Absorption innerhalb der Mischkammer stattfinden. Die Flüssigkeitsverteilung auf die Strömungskanäle des Plattenabsorbers erfolgt hierbei ausschließlich durch das sich im Plattenwärmeübertrager aufbauende Druckfeld der zweiphasigen Strömung. Es findet somit bei diesem Konzept keine durch die Düse direkte Flüssigkeitsbeaufschlagung einzelner Kanäle statt.

Das Ergebnis der Flüssigkeitsverteilung in Konzept B ist in Abbildung 6 b) gezeigt. Der Sprühkegel trifft bei diesem Konzept nicht direkt auf der Acrylglasscheibe auf. Hierdurch wird bestätigt, dass keiner der Plattenspalte direkt durch den Sprühkegel mit Flüssigkeit beaufschlagt wird. Zudem erscheint hierdurch die erkannte Flüssigkeitshäufigkeit im oberen Teil des Auswertungsbereiches I geringer, da die Strömung im Inneren des Kanals das Licht weniger stark reflektiert. Am unteren Ende des Auswertungsbereiches I ist jedoch eine sehr große Häufigkeit erkennbar. Der Vergleich mit einem einzelnen Foto zeigt, dass sich dort die flüssige Phase ansammelt. Durch den von oben auftreffenden Sprühkegel findet eine gute Durchmischung der Flüssigkeitsansammlung mit der umgebenden Luft statt. Diese Strömungsregion wirkt somit wie ein adiabater Blasenabsorber.

In Hinblick auf die Flüssigkeitsverteilung im Auswertungsbereich II ist erkennbar, dass die erkannte Flüssigkeitshäufigkeit im oberen Drittel im Vergleich aller bisher vermessenen Varianten am geringsten ist. Ein etwas größerer Häufigkeitswert ist in etwa auf gleicher Höhe wie die Flüssigkeitsansammlung im Bereich I erkennbar. Im weiteren Strömungsverlauf bis zum Austritt aus dem Plattenwärmeübertrager liegt sowohl über der Kanalbreite als auch über der Kanalhöhe eine jeweils gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung vor.

Die optische Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung in Konzept B zeigt, dass die Durchmischung der Luft/Wasser-Strömung am Eintritt in den Absorber sehr ausgeprägt ist. Es wird dort sowohl das Prinzip des

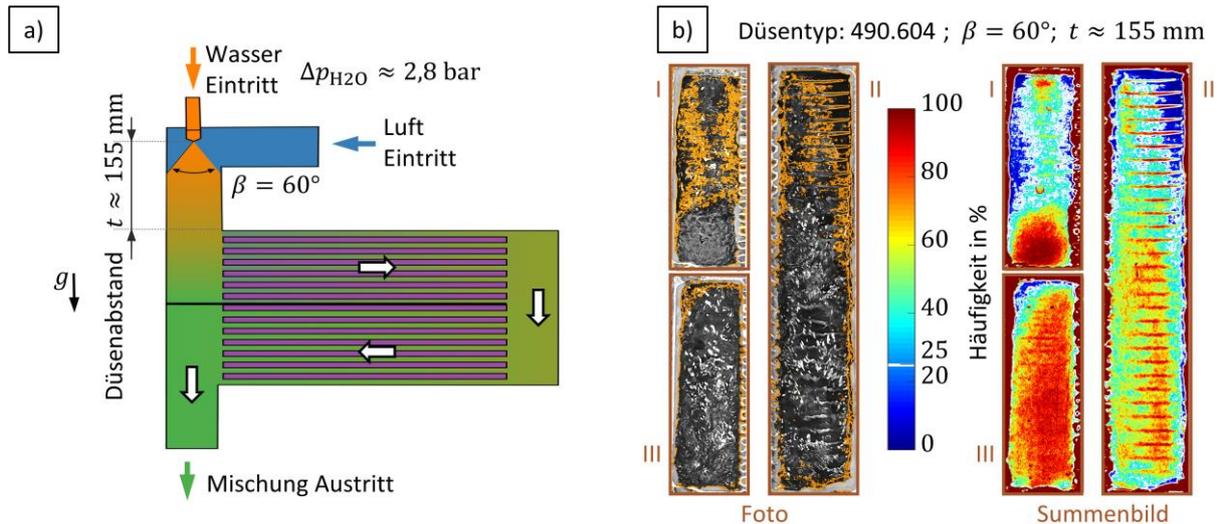


Abbildung 6: Auswertung der Flüssigkeitsverteilung innerhalb eines Plattenwärmeübertragers in Konzept B: in a) ist der schematische Aufbau des Konzeptes gezeigt und in b) die Auswertung der Flüssigkeitsverteilung anhand eines repräsentativen Fotos und anhand des Summenbildes.

Flüssigkeitssprays in einer Gasströmung als auch das Prinzip eines Blasenabsorbers, also dem Gaseinschluss in einem Flüssigkeitsfilm zur Oberflächenvergrößerung, verwendet. Dies wirkt sich positiv auf die adiabate Absorption aus. Die Flüssigkeitsverteilung innerhalb des ersten Durchgangs ist bei diesem Konzept jedoch am ungleichmäßigsten. Es wird somit erwartet, dass daher die Absorption unter Wärmeabfuhr in diesem Konzept den gesamten Absorptionsprozess verschlechtert.

4 Einfluss der Düse auf den Absorptionsprozess

Für die Beurteilung des Düseninflusses auf die Absorption wird die aus den Messdaten berechnete Wärmeübertragungsfähigkeit kA verwendet. Eine Beurteilung des Absorbers anhand dieser Größe wird ebenfalls in [2] verwendet. Für diese Arbeit wird die Wärmeübertragungsfähigkeit wie nachfolgend beschrieben berechnet. Zunächst wird der im Absorber übertragene Wärmestrom \dot{Q}_{Abs} über den externen Fluidkreislauf nach Gleichung (1) berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Abs}} = \dot{V}_{\text{ext,ein}} \cdot \rho_{\text{ext,ein}} \cdot \bar{c}_{p,\text{ext}} \cdot (\vartheta_{\text{ext,Abs,aus}} - \vartheta_{\text{ext,Abs,ein}}) \quad (1)$$

Da die Mischungstemperatur der Ammoniak/Wasser-Mischung am Eintritt in den Absorber nicht messtechnisch erfasst werden kann, wird für die Berechnung der Wärmeübertragungsfähigkeit eine ideale Mischung angenommen. Die Temperatur dieser idealen Mischung resultiert nach den Gleichungen (2) und (3) direkt aus der Energiebilanz im Gleichgewichtszustand der Mischung.

$$h_{rL,\text{Abs,ein}} = \frac{\dot{M}_{aL} \cdot h_{aL,\text{Abs,ein}} + \dot{M}_{KM} \cdot h_{KM,\text{Abs,ein}}}{\dot{M}_{rL}} \quad (2)$$

$$\vartheta_{rL,\text{Abs,ein}} = \vartheta(h_{rL,\text{Abs,ein}}, p_{\text{tief}}, \xi_{rL}) \quad (3)$$

Da für die Absorption des Kältemittels in der armen Lösung die Annahme einer annähernd konstanten spezifischen Wärmekapazität der Ammoniak/Wasser-Mischung $c_{p,rL}$ nicht zutrifft, muss die mittlere Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung θ_m sowie der Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} numerisch erfolgen. Das Vorgehen der Berechnungsmethodik ist in Abbildung 7 veranschaulicht. Analog zu dem Vorgehen aus [17] wird der Absorber in $z = 200$ gleiche Zellen unterteilt und für jede Berechnungszelle i der nachfolgende Gleichungssatz gelöst:

$$\dot{Q}_i = \frac{kA_{\text{Abs}}}{z} \cdot \theta_{m,i} = \dot{M} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_i = \dot{M} \cdot \Delta h_i \quad (4)$$

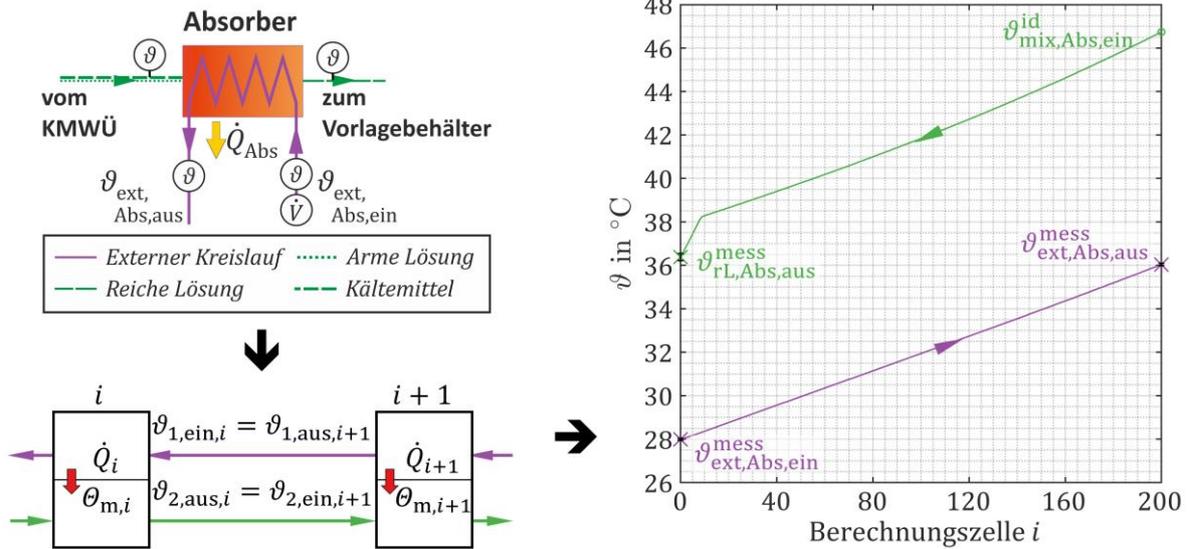


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Berechnungsverfahrens zur Bestimmung des Temperaturverlaufs innerhalb des Absorbers und der mittleren Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung θ_m .

$$\theta_{m,i} = \frac{(\vartheta_{rL,ein} - \vartheta_{ext,aus})_i + (\vartheta_{rL,aus} - \vartheta_{ext,ein})_i}{2} \quad (5)$$

$$\vartheta_{rL,ein,i} = \vartheta_{rL,aus,i+1} \quad ; \quad \vartheta_{ext,aus,i} = \vartheta_{ext,ein,i+1} \quad (6)$$

Für diese Berechnungsmethode wird vorausgesetzt, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} über den gesamten Wärmeübertrager konstant ist. In der Berechnung nach Gleichung (4) hat jede Zelle i eine Wärmeübertragungsfähigkeit, die dem Wert $kA \cdot z^{-1}$ entspricht. Innerhalb einer solchen Zelle wird aus den Temperaturen der ein- und austretenden Fluidströme die mittlere Temperatur der Wärmeübertragung der Zelle $\theta_{m,i}$ nach Gleichung (5) berechnet.

Aus der mittleren Temperaturdifferenz der Zelle $\theta_{m,i}$ kann der übertragene Wärmestrom der Zelle \dot{Q}_i nach Gleichung (4) berechnet werden. Aus dem Wärmestrom der Zelle \dot{Q}_i werden wiederum die Austrittstemperaturen der Zelle berechnet. Durch Gleichung (6) sind die jeweils benachbarten Zellen miteinander verbunden. Die Summe der Wärmeströme aller Zellen z muss dabei die Wärmeleistung des Absorbers \dot{Q}_{Abs} ergeben. Zusammen mit der mittleren Temperaturdifferenz der Wärmeübertragung des Absorbers θ_m , wird über Gleichung (8) die Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} des Absorbers berechnet.

$$\theta_m = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^{i=z} \theta_{m,i} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^{i=z} \frac{(\vartheta_{rL,ein} - \vartheta_{ext,aus})_i + (\vartheta_{rL,aus} - \vartheta_{ext,ein})_i}{2} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{Abs} = \sum_{i=1}^{i=z} \dot{Q}_i = kA_{Abs} \cdot \theta_m \quad (8)$$

Für die Versuchsdurchführung werden die gleichen Betriebspunkte wie in [18] verwendet. Die Definition dieser Betriebspunkte ist in Tabelle 1 aufgeführt. In den Betriebspunkten 2, 4 und 5 wird der externe Volumenstrom am Absorber und Kondensator bei der Messung in den drei Konzepten annähernd konstant gehalten. In den Betriebspunkten 1 und 3 hingegen wird der externe Volumenstrom am Absorber und Kondensator so verändert, dass eine konstante Kondensatoraustrittstemperatur von $\vartheta_{ext,K,aus} = 55 \text{ °C}$ erreicht wird.

Die aus den Messdaten berechnete Wärmeübertragungsfähigkeit des Absorbers kA_{Abs} ist für die drei Konzepte in den fünf Betriebspunkten in Abbildung 8 gezeigt. Zunächst kann festgestellt werden, dass die verwendete Düse sowie der Düsenabstand t einen messtechnisch erfassbaren Einfluss auf die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung besitzt. Ein solcher Einfluss wird in [2] ebenfalls erwartet, jedoch nicht im Betrieb einer Absorptionswärmepumpe nachgewiesen.

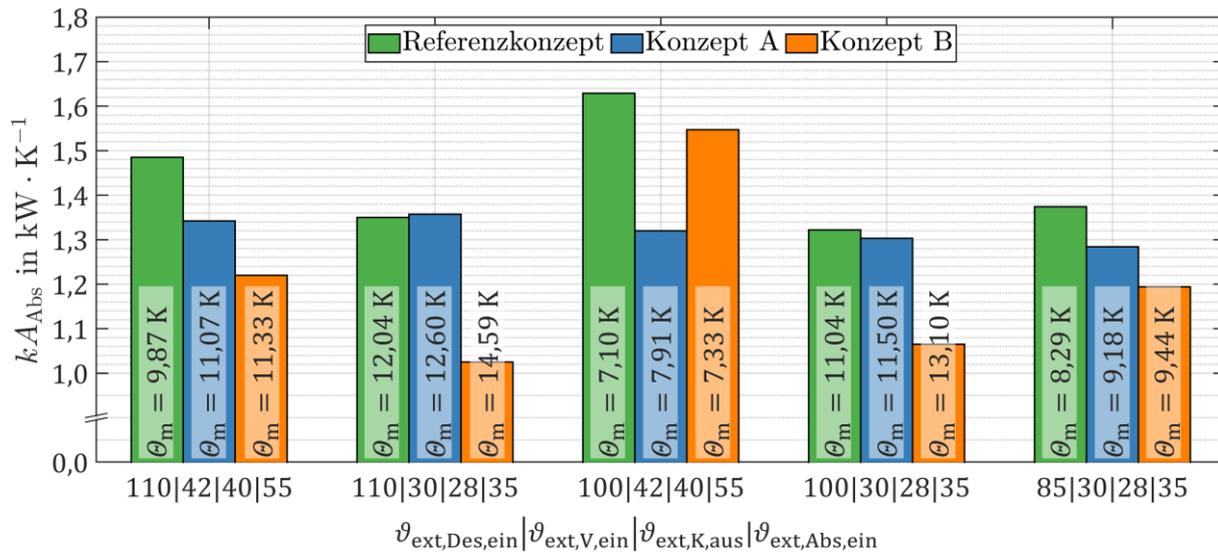


Abbildung 8: Wärmeübertragungsfähigkeit kA des Absorbers unter Verwendung der drei untersuchten Konzepte im Betrieb der Absorptionswärmepumpe in den Betriebspunkten aus [17].

Betriebspunkt	Externer Desorber	Externer Verdampfer	Externer Kondensator	Externer Absorber
	Eintritt $\vartheta_{ext,Des,ein}$	Eintritt $\vartheta_{ext,V,ein}$	Austritt $\vartheta_{ext,K,aus}$	Eintritt $\vartheta_{ext,Abs,ein}$
1	110 °C	42 °C	55 °C	40 °C
2	110 °C	30 °C	>35 °C	28 °C
3	100 °C	42 °C	55 °C	40 °C
4	100 °C	30 °C	> 35 °C	28 °C
5	85 °C	30 °C	> 35 °C	28 °C

Tabelle 1: Definition der Betriebspunkte.

Im Vergleich der drei Konzepte ist die Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} im Referenzkonzept stets am höchsten. Im Fall der Düse des Typs 490.608 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ ist die erreichte Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} geringfügig niedriger oder annähernd gleichbleibend zum Referenzzustand. Wie in den optischen Untersuchungen gezeigt, ist durch die verringerte Druckdifferenz der Düse die Beeinflussung des Sprühkegels durch die Dampfströmung größer als im Referenzkonzept. Da die Flüssigkeitsverteilung im Vergleich der beiden Konzepte sehr ähnlich ist, liegt der Schluss nahe, dass der Einfluss der Dampfströmung auf den Sprühkegel im Betrieb der Absorptionswärmepumpe größer ist als im optischen Versuchsstand. Für eine weitere Optimierung von Konzept A sollte daher im nächsten Schritt eine Düse des Typs 490.568 verwendet werden. Diese Düse hat ebenfalls einen Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$, benötigt jedoch eine höhere Druckdifferenz Δp_{H_2O} bei gleichem Volumenstrom als die Düse des Typs 490.608.

Die Auswertung von Konzept B zeigt, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} in fast allen Betriebspunkten am geringsten ist. Bereits in der optischen Auswertung im Ersatzsystem Luft/Wasser wird für dieses Konzept die Flüssigkeitsverteilung als am ungleichmäßigsten eingestuft. Einerseits rechtfertigt dies in [2] verwendete Vorgehen, die Flüssigkeitsverteilung anhand eines optischen Versuchstandes zu beurteilen und Rückschlüsse auf die Absorption zu ziehen. Andererseits zeigt dies, dass das ebenfalls in [2] am Projektende untersuchte Konzept am wenigsten für einen Einsatz innerhalb der Absorptionswärmepumpe geeignet ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden optische Untersuchungen zur Verteilung der Flüssigkeit auf die Plattenspalte mit dem Stoffsystem Luft/Wasser in einem separaten Versuchsstand durchgeführt. An diesem Versuchsstand wurden vier verschiedene Vollkegeldüsen der Firma Lechler mit der Zielsetzung, eine möglichst homogene Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte zu erreichen, untersucht. Zur Beurteilung der Flüssigkeitsverteilung wurde eine

optische Analysemethode entwickelt und erstmals erprobt. Hierfür wurden $n = 30$ Fotos der Flüssigkeitsverteilung in den Verteil-, Umlenkungs- und Sammelkanälen des Plattenwärmeübertragers aufgenommen. Diese Fotos werden anhand eines konstanten Schwellwertes in ein Binärbild umgewandelt und zur Erhöhung der statistischen Signifikanz zu einem Summenbild überlagert.

Insgesamt konnte aufgezeigt werden, dass die optischen Untersuchungen im Ersatzsystem mit den Arbeitsstoffen Luft/Wasser zur Beurteilung der Flüssigkeitsverteilung sehr gut geeignet sind. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass diese Untersuchungen Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Absorbers im Betrieb der Absorptionswärmepumpe mit der Arbeitsstoffpaarung Ammoniak/Wasser zulassen.

In der Auswertung der Fotos wird aufgezeigt, dass der Sprühkegel unter Verwendung der bisher eingesetzten Vollkegeldüse des Typs 460.566 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 90^\circ$ am wenigsten durch die Luftströmung beeinflusst wird. Diese Düse wird bei einem Düsenabstand von $t = 0$ mm als Referenz für die weiteren Untersuchungen verwendet. In Hinblick auf die Flüssigkeitsverteilung wird im oberen Drittel des ersten Durchgangs nur eine geringe Flüssigkeitsmenge erkannt. Es besteht daher noch weiteres Optimierungspotenzial der Flüssigkeitsverteilung auf die Plattenspalte.

Um dieses Optimierungspotenzial nutzbar zu machen, wurde die Verwendung einer Düse des Typs 490.608 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ ebenfalls optisch untersucht. Es wird aufgezeigt, dass durch die geringere benötigte Druckdifferenz der Düse bei gleichem Volumenstrom der Einfluss der Luftströmung auf das Spray größer ist. Nur durch eine zusätzliche Erhöhung des Düsenabstandes auf $t \approx 6$ mm kann eine ähnliche Flüssigkeitsverteilung wie im Referenzkonzept erreicht innerhalb des ersten Durchgangs werden.

Als weiterer Optimierungsansatz wurde die Verwendung einer Düse des Typs 490.604 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 60^\circ$ in Verbindung mit einem Mischrohr untersucht. Die optische Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung bei diesem Konzept ergab, dass es zu einer Flüssigkeitsansammlung im unteren Bereich des Eintrittskanals des Plattenabsorbers kommt. Hierdurch ist die Flüssigkeitsverteilung auf die nachfolgenden Plattenspalte des ersten Durchgangs sehr ungleichmäßig.

In den Messungen an der Absorptionswärmepumpe wurde abschließend der Einfluss der verwendeten Düse und deren Position auf die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung innerhalb des Plattenabsorbers anhand der Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} beurteilt. Es wurde festgestellt, dass die Wärmeübertragungsfähigkeit im Referenzzustand in nahezu allen untersuchten Betriebspunkten am höchsten ist. Als Ursache für die niedrigere Wärmeübertragungsfähigkeit kA_{Abs} bei Verwendung der Düse des Typs 490.608 mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ wird der Einfluss der Dampfströmung auf den Sprühkegel vermutet.

In weiterführenden Arbeiten sollte der Einfluss der Druckdifferenz der Düse auf die Stabilität des Sprühwinkels bestätigt werden. Eine weitere Optimierung von Konzept A zur Flüssigkeitsverteilung im Absorber sollte innerhalb der Absorptionswärmepumpe überprüft werden. Darüber hinaus sollten die Erkenntnisse aus dieser und weiterführenden Untersuchungen auf weitere Plattenwärmeübertrager angewandt und idealerweise allgemeingültig formuliert werden.

6 Nomenklatur

Formelzeichen

c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	in $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
h	spezifische Enthalpie	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
i	Laufvariable	–
kA	Wärmeübertragungsfähigkeit	in $\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}$
n	Anzahl der Fotos	–
\dot{M}	Massenstrom	in $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
p	Druck	in bar
\dot{Q}	Wärmestrom	in kW
t	Düsenabstand	in mm
\dot{V}	Volumenstrom	in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
z	Anzahl der Berechnungszellen	–
β	Sprühwinkel der Düse	in $^\circ\text{deg}$
Δp	Druckdifferenz	in bar
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz	in K
$\Delta \xi_E$	Entgasungsbreite	in $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
ϑ	Temperatur	in $^\circ\text{C}$
θ_m	mittlere Temperaturdifferenz	in K
ρ	Dichte	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
τ	Belichtungszeit	in ms
ξ	Ammoniakmassenanteil	in $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Indizes

Abs	Absorber
aL	arme Lösung
aus	Austritt
Des	Desorber
ein	Eintritt
ext	extern
H ₂ O	Wasser
i	Laufvariable
K	Kondensator
KM	Kältemittel
Luft	Luftströmung
max	Maximalwert
min	Minimalwert
rL	reiche Lösung
tief	Tiefdruck
V	Verdampfer

Abkürzungen

IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
NH ₃ /LiNO ₃	Ammoniak-Lithiumnitrat
KM	Kältemittel
KMWÜ	Kältemittelwärmeübertrager
LM	Lösungsmittel
LMWÜ	Lösungsmittelwärmeübertrager

7 Literaturverzeichnis

- [1] Stephan, P.; Mayinger, F.; Schaber, K.; Stephan, K.: "Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen - Band 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen", 15th ed., *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [2] Treffinger, P.; Sander, H.; Peter, T.; Wieland, D.; Mohrlök, K.: "Entwicklung und Test eines Funktionsmodells einer leistungsgeregelten Absorptionswärmepumpe für Hausheizung", *Forschungsbericht IB403, Institut für Technische Thermodynamik, DLR*, Stuttgart, 1997.
- [3] Zetzsche, M.: "Experimentelle Untersuchungen und regelungstechnische Optimierung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine in Kombination mit einem solar angetriebenen Kühlsystem mit Eisspeicher", *Dissertation, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart*, Stuttgart, Germany, 2012.
- [4] Brendel, T.; Schmid, F.; Müller, M.; Hahn, R.: "Effizienzsteigerung einer solar angetriebenen Absorptionskälteanlage mit Eisspeicher: Abschlussbericht, FKZ 0327898A", *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart*, Stuttgart, 2013.
- [5] Müller, M.; Spindler, K.: "Effizienzsteigerung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine" in *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins*, Hannover, Germany, 2013, AA II.1.08.

- [6] Zacarías, A.; Venegas, M.; Lecuona, A.; Ventas, R.; Carvajal, I.: "Experimental assessment of vapour adiabatic absorption into solution droplets using a full cone nozzle", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 68, pp. 228–238, 2015.
- [7] Zacarías, A.; Venegas, M.; Ventas, R.; Lecuona, A.: "Experimental assessment of ammonia adiabatic absorption into ammonia–lithium nitrate solution using a flat fan nozzle", *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3569–3579, 2011.
- [8] Zacarías, A.; Venegas, M.; Lecuona, A.; Ventas, R.: "Experimental evaluation of ammonia adiabatic absorption into ammonia–lithium nitrate solution using a fog jet nozzle", *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 781–790, 2013.
- [9] Schmid, F.; Brendel, T.; Müller, M.; Hahn, R.: "Absorption Refrigerating Machine; Absorptionskältemaschine", DE.
- [10] Said, S.A.M.; Spindler, K.; El-Shaarawi, M.A.; Siddiqui, M.U.; Schmid, F.; Bierling, B.; Khan, M.M.A.: "Design, construction and operation of a solar powered ammonia–water absorption refrigeration system in Saudi Arabia", *Int. J. Refrig.*, vol. 62, pp. 222–231, 2016.
- [11] Brendel, T.; Koller, T.; Zetzsche, M.; Ziegler, E.: "Entwicklung einer solar angetriebenen Absorptionskälteanlage mit einem Eisspeicher: Abschlussbericht", *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart*, 2010.
- [12] Mirl, N.; Spindler, K.: "Optimization potentials for the absorber and the generator of an ammonia-water absorption heat pump" in *25th IIR International Congress of Refrigeration*, Montréal, Canada, 2019, Manuscript ID: 189.
- [13] Markmann, B.: "Wärmeübergang bei der Absorption ammoniakreichen Dampfes durch wässrige Lösung im Plattenwärmeübertrager", *Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover*, Hannover, 2020.
- [14] Busch, M.; Eyb, G.; Messner, J.: "Messtechnik an Maschinen und Anlagen: Vorlesungsmanuskript zur Vorlesung Messtechnik I", *Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM), Universität Stuttgart, Stuttgart*, 2018.
- [15] Lechler GmbH: "Technisches Datenblatt: Axial-Vollkegeldüsen, Baureihe 490 / 491", 2017.
- [16] Roos, H.: "Hydraulik der Wasserheizung: Mit 25 Tabellen", 5th ed., *Oldenbourg-Industrieverl.*, München, 2002.
- [17] Gehring, D.: "Experimentelle Untersuchung zur Kopplung einer Ammoniak-Wasser Absorptionswärmepumpe in Fernwärmenetzen" in *Jahrestagung des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins*, Aachen, 2018.
- [18] Fang Yang; Nico Mirl; Fabian Schmid: "Potenziale von Absorptionswärmepumpen in zentralisierten Wärmeversorgungsnetzen: Schlussbericht, IGF-Vorhaben Nr. 19696 N", *Forschungsbericht, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Universität Stuttgart, Stuttgart*, 2020.