

Analyse und Optimierung einer einstufigen Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe

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

Vorgelegt von
Nico Mirl
aus Heidelberg

Hauptberichter: Apl. Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler

Mitberichterin: Prof. Dr.-Ing. Andrea Luke

Tag der mündlichen Prüfung: 10. September 2021

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
der Universität Stuttgart

2021

Vorwort und Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart im Rahmen zweier aufeinander aufbauenden AiF-Forschungsprojekte: dem Projekt „Potenziale von Absorptionswärmepumpen in zentralisierten Wärmeversorgungsnetzen“ (IGF-Vorhaben Nr. 19696 N) sowie dem Anschlussprojekt (IGF Vorhaben Nr.: 21315 N). An dieser Stelle möchte ich mich daher für die finanzielle Unterstützung beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durch die beiden Projekte bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Klaus Spindler für die wertvollen fachlichen Diskussionen sowie für die hervorragende Betreuung der Arbeit. Weiterer Dank gebührt Frau Professorin Andrea Luke vom Institut für Thermische Energietechnik der Universität Kassel für die Übernahme und Anfertigung des Mitberichts.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut möchte ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Meinem ehemaligen Kollegen und Arbeitsgruppenleiter Fabian Schmid danke ich besonders herzlich für das Korrekturlesen der Ausarbeitung und dafür, dass er mein Interesse und meine Begeisterung an der Absorptionskältetechnik geweckt hat. Auch meinem Bürokollegen Johannes Brunder möchte ich für die fachlichen Diskussionen, die hilfreichen Anregungen sowie für das Korrekturlesen der Arbeit danken.

Für die sprachliche Korrektur der englischsprachigen Texte danke ich Frau Maria Wegner. Den beiden Werkstatt-Meistern des Instituts Norbert Flosdorff und Marco Biondi danke ich für die tatkräftige Unterstützung und für das Einbringen Ihres Wissens und Erfahrungen bei den Versuchsaufbauten.

Außerdem bedanke ich mich bei den Studierenden, die mich im Projekt oder im wissenschaftlichen Fortschritt der Arbeit unterstützt haben. Hervorzuheben sind dabei Maik Doil, Alexander Stein, Marlon Weinert und Luisa Haak. Letzt genannter danke ich zudem für das Korrekturlesen der Arbeit.

Sehr dankbar bin ich meiner Mutter Ilona Krickl für die Unterstützung in meinem bisherigen Lebensweg, insbesondere der Entscheidung den zweiten Bildungsweg einzuschlagen. In diesem Zusammenhang möchte ich auch meinem Stiefvater und Lehrmeister Martin Bell danken, meine Begeisterung für die Gebäudeenergetik und Heizungstechnik geweckt zu haben.

Meinen Schwiegereltern Anke und Klaus Mirl möchte ich besonders für den Rückhalt während meines gesamten Studiums danken. Bei Anke möchte ich mich zusätzlich für die zahlreichen Stunden bedanken, die sie für die Rechtschreibungs- und Grammatikkorrekturen meiner Arbeiten aufgewandt hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Anna, die mich stets mit viel Verständnis, großem Rückhalt, konstruktiver Kritik, fachlichen Diskussionen und durch wertvolle Anmerkungen beim Korrekturlesen unterstützt (hat).

Erklärung über die Eigenständigkeit der Dissertation

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit

„Analyse und Optimierung einer einstufigen Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe“

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Aus fremden Quellen entnommene Passagen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Des Weiteren versichere ich, dass das elektronische Exemplar mit den anderen Exemplaren übereinstimmt.

Esslingen, September 2021

Nico Mirl

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Komponenteoptimierung der Desorber-Einheit sowie des Absorbers einer Absorptionswärmepumpe durchgeführt. Die Anforderungen an die Wärmepumpe umfassen sowohl eine hohe Effizienz als auch möglichst geringe Systemkosten, wobei letzteres durch ausschließliche Verwendung von Standardkomponenten, wie beispielsweise Plattenwärmeübertrager und einfach fertigbare Behälter, erzielt wird.

Es wird ein allgemeingültiges Analyseverfahren für Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen erarbeitet und angewandt. Mit diesem Verfahren ist sowohl eine Quantifizierung der Potenziale des Absorptions- und Desorptionsprozesses als auch eine Zuordnung dieser Potenziale zu Problemstellungen der Wärmeübertragung bzw. Stoffübertragung möglich.

Für das Analyseverfahren ist eine exakte Wiedergabe der Zustandsgrößen von zentraler Bedeutung. Es wird aufgezeigt, dass die Zustandsgleichung aus (Tillner-Roth und Friend, 1998a) die experimentellen Daten im relevanten Temperaturbereich von $-30\text{ °C} \leq \vartheta \leq 200\text{ °C}$ und Druckbereich von $p \leq 30\text{ bar}$ am besten wiedergibt. Diese Zustandsgleichung wird daher für die Prozessanalyse verwendet.

Zur Optimierung der Absorptionswärmepumpe werden zwei Desorber-Konzepte experimentell untersucht: ein Desorber nach dem Naturumlaufprinzip und ein zwangsdurchströmter Desorber. Die Messungen zeigen, dass mit dem zwangsdurchströmten Desorber die erreichte Entgasungsbreite von $0,044 \leq \Delta\xi_E \leq 0,078$ auf $0,066 \leq \Delta\xi_E \leq 0,102$ erhöht wird. Auch der Desorberwirkungsgrad von $0,851 \leq \eta_{\xi,Des} \leq 0,923$ belegt die sehr gute Funktionalität dieses Desorber-Konzeptes.

In einem separaten Versuchsstand wird die Verteilung der Flüssigkeit auf die Plattenspalte des Absorbers untersucht. Diese Versuche werden in dem Ersatzsystem Luft/Wasser mit einer optischen Methode durchgeführt und ausgewertet. Es wird aufgezeigt, dass die bisher verwendete Vollkegeldüse mit einem Sprühwinkel von $\beta = 90^\circ$ in Verbindung mit einem Düsenabstand zum obersten Plattenspalt im Absorber von $t \approx 0\text{ mm}$ die Flüssigkeit nicht gleichmäßig innerhalb des ersten Durchgangs verteilt. Durch die Verwendung einer Vollkegeldüse mit einem Sprühwinkel von $\beta = 120^\circ$ und einem Düsenabstand von $t \approx 6\text{ mm}$ erfolgt die Verteilung der Flüssigkeit auf die Plattenspalte weitestgehend gleichmäßig. Bei Verwendung dieser Düse wird im Betrieb der Absorptionswärmepumpe, mit Ausnahme eines Betriebspunktes, die höchste Wärmeübertragungsfähigkeit des Absorbers kA_{Abs} erreicht.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und erprobte zwangsdurchströmte Desorber eine nahezu ideale Desorption ermöglicht. Darüber hinaus wird durch einen Kondensat-Abscheider sichergestellt, dass der Ammoniakmassenanteil des Kältemittels maximal ist. Sowohl die Entgasungsbreite $\Delta\xi_E$ als auch das Wärmeverhältnis ζ als Maß für die Effizienz der Absorptionswärmepumpe werden durch diese Maßnahmen erheblich gesteigert.

Abstract

In this work, a systematic component optimization of the desorber unit as well as the absorber of an absorption heat pump is carried out. The requirements regarding the heat pump include both high efficiency and the lowest possible system costs. The latter is achieved by the exclusive use of standard components such as plate heat exchangers and easily manufacturable vessels.

To quantify the absorption and desorption potentials, an analysis procedure which is universally valid for absorption heat pumps and chillers is developed and applied. With this method it is possible to quantify the potentials of the absorption and desorption process as well as to assign these potentials to problems of heat transfer or mass transfer.

An exact reproduction of the state variables is of central importance for the process analysis. It is shown that the equation of state from (Tillner-Roth und Friend, 1998a) best reflects the experimental data in the relevant temperature range of $-30\text{ °C} \leq \vartheta \leq 200\text{ °C}$ and pressure range of $p \leq 30\text{ bar}$. This equation of state is therefore used for the process analysis.

Two desorber concepts are experimentally investigated to optimize the absorption heat pump: a desorber based on the natural circulation principle and a forced flow desorber. The results of the measurements show that with the forced flow desorber concept, the achieved degassing range is increased from $0.044 \leq \Delta\xi_E \leq 0.078$ to $0.066 \leq \Delta\xi_E \leq 0.102$. The desorber efficiency of $0.851 \leq \eta_{\xi,Des} \leq 0.923$ also proves the very good functionality of this desorber concept.

In a separate test rig, the distribution of the liquid flow across the channels inside the absorber is investigated. These tests are carried out and evaluated in the substitute air/water system using an optical method. It is shown that the previously used nozzle with a spray angle of $\beta = 90^\circ$ and its position in the absorber does not distribute the liquid uniformly to the channels of the plate heat exchanger within the first pass. By using a full-cone nozzle with a spray angle of $\beta = 120^\circ$ and a nozzle spacing of $t \approx 6\text{ mm}$, the distribution of the liquid onto the channels is uniform as far as possible. When using this nozzle and its position, the highest heat transfer capability of the absorber kA_{Abs} is achieved during the operation of the absorption heat pump, with the exception of one operating point.

Overall, the investigations show that the desorber concept developed and tested as part of this work enables an almost ideal desorption. In addition, a condensate separator ensures that the ammonia mass fraction of the refrigerant is maximized. Both the degassing range $\Delta\xi_E$ and the heat ratio ζ as a measure of the efficiency of the absorption heat pump are considerably increased by these measures.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Vorwort und Danksagungen..... | I |
| Erklärung über die Eigenständigkeit der Dissertation..... | III |
| Kurzfassung..... | IV |
| Abstract..... | V |
| Nomenklatur | VIII |
| 1. Einleitung..... | 1 |
| 1.1. Rücklauftemperaturabsenkung von Fernwärmenetzen..... | 1 |
| 1.2. Zielsetzung..... | 4 |
| 2. Grundlagen..... | 6 |
| 2.1. Funktionsweise der Absorptionswärmepumpe..... | 6 |
| 2.2. Wärmeübertragung zwischen zwei Fluiden | 9 |
| 2.2.1. Grundlagen der Wärmeübertragung..... | 9 |
| 2.2.2. Optimale Wärmeübertragung..... | 10 |
| 2.2.3. Plattenwärmeübertrager | 14 |
| 2.3. Thermodynamische Grundlagen des Ammoniak/Wasser-Gemischs..... | 17 |
| 2.3.1. Systemeigenschaften beim Phasenübergang..... | 17 |
| 2.3.2. Zustandsgleichungen des Ammoniak/Wasser-Gemischs | 19 |
| 2.4. Abhängigkeiten innerhalb der Absorptionswärmepumpe | 23 |
| 2.5. Bewertungsgrößen | 28 |
| 3. Stand der Technik zu Ammoniak/Wasser-Absorptionssystemen..... | 32 |
| 3.1. Komponenten..... | 32 |
| 3.1.1. Absorber..... | 32 |
| 3.1.2. Desorber..... | 35 |
| 3.1.3. Dephlegmator | 36 |
| 3.1.4. Expansionsventile..... | 37 |
| 3.2. Ausgangszustand der Absorptionswärmepumpe..... | 38 |
| 4. Methodik..... | 40 |
| 4.1. Analysemethode..... | 40 |
| 4.1.1. Berechnung des Temperaturverlaufs | 41 |
| 4.1.2. Grenzfälle der Absorption und Desorption | 43 |
| 4.1.3. Potenziale im Absorber und Desorber | 47 |
| 4.2. Vergleich thermodynamischer Zustandsgleichungen für Ammoniak/Wasser-Gemische..... | 51 |
| 4.2.1. Dampf-Flüssigkeits-Phasengleichgewicht..... | 52 |
| 4.2.2. Dichte der Flüssigkeit..... | 56 |
| 4.2.3. Exzessenthalpie der Flüssigphase..... | 58 |

| | |
|--|------|
| 4.2.4. Spezifische isobare Wärmekapazität der Flüssigkeit..... | 60 |
| 4.2.5. Einfluss der Zustandsgleichungen auf die Bewertung..... | 61 |
| 4.2.6. Fazit..... | 63 |
| 4.3. Experimentelle Methodik..... | 64 |
| 4.3.1. Betriebspunkte und Versuchsauswertung | 64 |
| 4.3.2. Ausgangszustand der Absorptionswärmepumpe (A1) | 67 |
| 5. Analyse des Ausgangszustandes | 70 |
| 5.1. Beurteilung des Gesamtprozesses..... | 70 |
| 5.2. Analyse des Absorptions- und Desorptionspotenzials | 76 |
| 5.2.1. Auswertung der Desorber-Einheit..... | 77 |
| 5.2.2. Auswertung des Absorbers | 81 |
| 6. Optimierung der Desorber-Einheit | 84 |
| 6.1. Optimierung des Desorbers nach dem Naturumlaufprinzip (A2) | 84 |
| 6.1.1. Anpassung der Komponenten und Messtechnik..... | 84 |
| 6.1.2. Beurteilung des Desorbers | 87 |
| 6.1.3. Beurteilung des Lösungsmittelwärmeübertragers | 91 |
| 6.2. Zwangsdurchströmter Desorber (A3) | 93 |
| 6.2.1. Beurteilung des zwangsdurchströmten Desorbers | 94 |
| 6.2.2. Beurteilung des Prozesses und der Kältemittelreinheit | 97 |
| 6.3. Erhöhung der Kältemittelreinheit (A4)..... | 99 |
| 6.3.1. Funktionsnachweis und erreichte Kältemittelreinheit | 101 |
| 6.3.2. Beurteilung der internen Wärmerückgewinnung | 103 |
| 6.3.3. Beurteilung der Desorption | 107 |
| 7. Optimierung des Absorbers | 111 |
| 7.1. Optische Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung | 111 |
| 7.1.1. Versuchsbeschreibung..... | 111 |
| 7.1.2. Versuchsdurchführung und Auswertung..... | 114 |
| 7.2. Einfluss der Düse auf den Absorptionsprozess (A5 und A6) | 118 |
| 7.3. Beurteilung des Gesamtprozesses..... | 120 |
| 8. Zusammenfassung und Ausblick..... | 124 |
| 9. Literaturverzeichnis | 128 |
| 10. Anhang | i |
| A-I. Zustandsgleichung nach Ziegler und Trepp bzw. Ibrahim und Klein | i |
| A-II. Zustandsgleichung nach Tillner-Roth und Friend | iv |
| A-III. Berechnung der Wärmewiderstände eines Plattenwärmeübertragers | viii |
| A-IV. Komponenten im Aufbau A6..... | x |
| A-V. Übersicht der Messdaten..... | xi |
