

Gas-Absorptionswärmepumpe 6 bis 18 kW stufenlos regelbar für Hausheizungen

Prof. Dr.-Ing. Lutz Mardorf
Dipl.-Ing. Peter Menger
Fachhochschule Osnabrück
Labor für Angewandte Thermodynamik (LAT)

1. Regelungskonzept für die Absorptionswärmepumpe

Die meisten heute verwirklichten Absorptionswärmepumpen-Heizsysteme werden mit einer einfachen Zweipunktregelung betrieben. Der Auslegungspunkt für den Einsatz der Wärmepumpe ist durch die niedrigste Verdampfeintrittstemperatur der Sole aus der Umgebung, bei der die Wärmepumpe gerade noch als solche arbeiten soll, und durch die maximale Heizwasser-Vorlauftemperatur für die Heizkörper oder Fußbodenheizung eines Gebäudetyps festgelegt. Dadurch wird die Konzentration der reichen Lösung in ihrem Wert nach oben hin und die Konzentration der armen Lösung in ihrem Wert nach unten hin begrenzt. Die Massenströme des Kältemittels, welches durch den Kondensator über eine feste Kondensatdrosselstelle zum Verdampfer strömt, der reichen Lösung, welche vom Absorber mit einer Lösungspumpe mit konstanter Drehzahl zum Austreiber gefördert wird, und der armen Lösung, welche vom Austreiber über eine feste Lösungsdrosselstelle zum Absorber strömt, sind dabei in erster Linie von dem Austreiber zugeführten konstanten Wärmestrom des Brenners abhängig. Wird solch eine Wärmepumpe in einem anderen Betriebspunkt als dem Auslegungspunkt betrieben, verändern sich die Konzentrationen der reichen und armen Lösung nur geringfügig und der abgegebene Wärmestrom für das Heizsystem des Gebäudes bleibt nahezu konstant. Auch die Leistungszahl des Auslegungspunktes bleibt nahezu konstant [1].

Mit steigender Verdampfeintrittstemperatur der Sole aus der Umgebung wächst auch die Differenz zwischen dem Druck im Verdampfer, dem Niederdruck, und dem Sättigungsdruck des Kältemittels, d.h. es wächst auch die Überhitzung am Verdampfer. Dies verbessert nur sehr geringfügig die Leistungszahl. Um die Leistungszahl mit steigender Verdampfeintrittstemperatur der Sole oder Luft aus der Umgebung anzuheben, ist die Konzentration der reichen Lösung immer so zu erhöhen, daß der Verdampfer gerade noch verdampft und die Überhitzung am Verdampfer nahezu konstant bleibt. Dazu wird mit steigender Verdampfeintrittstemperatur in dem AWP-Prozess die Masse an Kältemittel erhöht, welches eine Steigerung der Konzentration der reichen Lösung zur Folge hat. In der Regel ist in einem Heizsystem mit steigender Umgebungslufttemperatur auch eine fallende Heizwasservorlauftemperatur gefordert und der Heizwärmebedarf eines Gebäudes sinkt. Wird der über einen Brenner dem Austreiber zugeführte Wärmestrom so gesteuert, bzw. geregelt, daß die Heizwasservorlauftemperatur in Abhängigkeit der Umgebungs-Lufttemperatur einer Gebäudekennfunktion entspricht wird auch die Wärmepumpe den aktuellen Wärmebedarf des Gebäudes decken. Da der Druck im Kondensator in direktem Zusammenhang mit der aktuellen Heizwasservorlauftemperatur steht, wird dieser Druck so als Führungsgröße gewählt, daß das flexible Volumen des Kältemittelspeichers beim höchsten Druck ein Maximum und beim niedrigsten Druck ein Minimum hat. Dieser Kältemittelspeicher ist über eine Kältemittelabzweigung mit der Kältemittelleitung zwischen Kondensator und Kondensatdrosselstelle verbunden (**Bild 1**). Da der Druck des Kältemittels immer dem Federdruck der pneumatischen Feder entspricht, verändert sich das Volumen des flexiblen Kältemittelspeichers entsprechend der o.g. Funktion.

Um den dadurch instationär angestiegenen Massenstrom des Kältemittels in den Verdampfer strömen zu lassen, wird am stufenlos verstellbaren Kondensatdrosselventil das regelbare

Verhältnis von Verschlußzeit zu Öffnungszeit verkleinert oder vergrößert. Dadurch wird gewährleistet, daß der Kondensator nicht überflutet wird und sich die wirksame Kondensatorwärmeübertragerfläche nicht verkleinert. Die Regelung durch die Veränderung des Verhältnisses von Verschlußzeit zu Öffnungszeit erfolgt so, daß die Unterkühlung am Austritt des Kondensators entsprechend eines verfahrenstechnisch kleinsten Wertes immer konstant bleibt.

Da mit steigender Konzentration der reichen Lösung das durch die Lösung beaufschlagte Volumen im Austreiber anwächst, wurde der Austreiber am Kopf mit einem Ausgleichsvolumen versehen. Der Massenstrom der armen Lösung vom Austreiber über den Lösungswärmetauscher wird über eine verstellbares Lösungsdrosselventil an die oben beschriebene Konzentrationsveränderung der reichen Lösung angepaßt, in dem an dem stufenlos verstellbaren Lösungsdrosselventil das Verhältnis von Verschlußzeit zu Öffnungszeit ebenfalls verändert wird. Entsprechend eines Regelalgorithmus unterstützt dieser Vorgang die Konzentrationsänderung der reichen Lösung in dem bei abnehmender Konzentration der reichen Lösung der Austreiber und der Absorber durch Anheben der armen Lösungskonzentration jeweils eine größere Masse an Ammoniak beinhaltet [2].

Überlagert wird als Grenzwertfunktion die Vermeidung eines Unterschreitens einer minimalen Konzentration der armen Lösung um die maximale Kocherbodentemperatur von ca. 180 °C nicht zu überschreiten.

Sinkt der aktuelle Wärmebedarf eines Gebäudes bei sonst konstant bleibender Umgebungslufttemperatur, und es entsteht gegenüber der Wärmepumpe ein Teillastverhalten, steigt die Heizwasservorlauftemperatur kurzfristig etwas an. Um die Heizwasservorlauftemperatur wieder an ihren von der Umgebungstemperatur gebundenen Sollwert entsprechend der vorgegebenen Heizkurve wieder anzupassen, wird der vom Brenner an den Austreiber abgegebene Wärmestrom so abgesenkt, daß die Soll-Vorlauftemperatur des Heizwassers erreicht wird. Gleichzeitig passen sich die Öffnungszeiten des Kondensatdrosselventils durch die Kondensatortemperatur und den Hochdruck und die Öffnungszeit des Lösungsdrosselventils durch die Austreibertemperatur und weitere Prozeßtemperaturen an die veränderten Massenströme an. Für den Einsatz einer Lösungspumpe auf der Basis einer Membranverdrängerpumpe wurde eine autarke Regelung entwickelt, die sich selbstständig auf den veränderten Massenstrom der reichen Lösung einstellt und damit keine Störgröße für die Konzentrationsregelung und Brennerleistungsregelung bildet.

2. Untersuchung des geregelten Prozesses

Für die in den Prototypen integrierten Stellglieder wurde eine Mikroprozessorregelung entwickelt. Mit dieser Regelung werden das Lösungsdrosselventil, das Kondensatdrosselventil und der Lüftermotor des Gasbrenners als Stellglieder der Regelung so angesteuert, dass die Heizwasservorlauf-Solltemperatur entsprechend der vorgegebenen Heizkurve als Funktion der Außenlufttemperatur für variable Lastfälle erreicht wird (**Bild 2**).

Die Wirkungsweise der Regelung wird an den Einschwingvorgängen der Drosselventile und der Veränderung der Lösungskonzentrationen dargestellt. Zur Überprüfung der Regelung des Kondensatdrosselventils wurde im Prüfstand dem AWP-Prototypen ein Heizwasservorlauftemperatur-Sprung im stationären Zustand von 37 °C auf 40 °C aufgeprägt. In dieser Betriebsweise wurde die neue Vorlaufstempertemperatur innerhalb 300 Sekunden erreicht. Der Hochdruck wird durch die automatische Verstellung der Öffnungszeit des Kondensatdrosselventils nahezu synchron zu der vorhandenen Heizwasservorlauftemperatur so verändert, daß die Unterkühlung von ca. 3,5 K nahezu konstant bleibt.

Das instationäre Verhalten zeigt sich am deutlichsten beim Anfahren des AWP-Prozesses aus dem kalten Zustand bei Raumtemperatur. Für diesen Versuch wurde die Soletemperatur von

ca. 0°C durch den im Prüfstand integrierten Kryostaten bereitgestellt. Beim Brennerstart werden gleichzeitig die Heizkreispumpe und die Solekreispumpe angestellt. Beim Anfahren der AWP hat das Lösungsdruckventil die Aufgabe den Ist-Hochdruck an den Soll-Hochdruck anzugleichen. Bei dieser Betriebsweise stellte sich die Brennerleistung entsprechend der Heizwasservorlauf-Solltemperatur auf ca. 10 kW ein, sodaß der Prozeß mit dieser Brennerleistung hochgefahren wurde.

Für die zukünftige Regelung wird die Brennerleistung für das Anfahren aus dem kalten Zustand aber mit 18 kW starten und sich entsprechend der Anstiegsgeschwindigkeit der Heizwasservorlaufstemperatur stufenlos auf ca. 10 kW einstellen. Mit der jetzigen Regelung stellt sich nach ungefähr 20 Minuten aus dem kalten Zustand der stationäre Betrieb mit einer Vorlaufstemperatur von 42 °C ein. Der Hochdruck hat sich dann an den Soll-Hochdruck angepaßt.

Zur Überprüfung des Verdampferverhaltens wurde aus dem konstanten Betriebszustand mit einer konstanten Heizwasservorlaufstemperatur von 40 °C die Soletemperatur von 7 °C sprunghaft auf 5 °C abgesenkt. In erster Linie durch die Regelung des Lösungsdruckventils wird die Temperatur des Kältemittels am Verdampfereintritt, bzw. am Austritt des Kondensatdruckventils, auf die Soll-Temperatur am Verdampfereintritt eingestellt. Die Verdampfereintrittstemperatur wird nach ca. 300 Sekunden erreicht (**Bild 3**). Der Niederdruck hat sich von 2,6 bar auf 2,9 bar erhöht und bestimmt den neuen stationären Betriebszustand. Betrachtet man den Prozeß bei einer sprunghaftigen Erhöhung der Soletemperatur von 0 °C auf 3 °C, schwingt dabei die Kältemittelintrittstemperatur nach ca. 180 Sekunden um nur 1,5 K über die Soll-Temperatur und gleicht sich nach 600 Sekunden an. Der Niederdruck steigt von 2,1 auf 2,6 bar und stellt mit diesem Wert den stationären Betriebszustand dar.

3. Regelung des Prozesses über der Heizwasservorlaufstemperatur

Für die Entwicklung der Regelalgorithmen wurden zuerst die Untersuchungen mit manueller Verstellung des Lösungsdruckventils und des Kondensatdruckventils durchgeführt. Dabei wurde die Brennerleistung entsprechend der 55/45 °C Heizkurve so eingestellt, daß sich die Sollvorlaufstemperatur einstellte. Bei der ersten Versuchsreihe wurde die Konzentration der reichen Lösung im stationären Betrieb nur durch die gleichzeitige Verstellung der beiden Druckventile vorgenommen. Die Absenkung der reichen Lösungskonzentration mit steigender Vorlaufstemperatur wurde durch das gleichzeitige Anheben der armen Lösungskonzentration erreicht. Dadurch verschieben sich die Konzentrationsprofile im Absorber und Austreiber und die anderen von der armen Lösung durchströmten Komponenten wie Lösungswärmetauscher, Lösungsrückführung im Austreiber enthalten eine größere Masse an Ammoniak. Dieses Verfahren bewirkt ein Ansteigen des spezifischen Lösungsumlaufes von 3,7 bei 30 °C auf ca. 11 bei einer Heizwasservorlaufstemperatur von 50 °C. Die Fördermenge der Lösungspumpe erhöht sich in dieser Betriebsweise 1 von 9,5 g/s auf 32,9 g/s sehr stark.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Konzentration der reichen Lösung im stationären Betrieb in erster Linie durch das Speicherverhalten des Kältemittelspeichers eingestellt. Da das Speichervolumen durch den ausgewählten Kältemittelspeicher nach oben hin begrenzt ist, muß mit der gleichzeitigen Verstellung der beiden Druckventile eine restliche Korrektur vorgenommen werden. Mit zunehmendem Hochdruck erhöht sich die gespeicherte Masse an Kältemittel im Kältemittelspeicher. Um das Speicherverhalten auf die Regelung der Konzentration der reichen Lösung anzupassen, wird der Speicher bei Umgebungsdruck auf der Gasfederseite vorgedrückt. Der Vordruck entspricht ungefähr dem Hochdruck des AWP-Prozesses bei der der Kältemittelspeicher noch keine Speicherfähigkeit hat. Mit steigendem Hochdruck wird immer mehr Kältemittel abgespeichert. Mit der Wahl des Vordruckes im Kältemittelspeicher kann die maximale Kältemittelspeichermasse und damit die Konzentrationsverschiebung der reichen Lösung eingestellt werden. Bei einem Vordruck von

12,7 bar werden bei dem maximalen Hochdruck des AWP-Prozesses 1,8 kg und bei einem Vordruck von 10 bar 2,4 kg Kältemittel abgespeichert.

Die Absenkung der reichen Lösungskonzentration mit steigender Vorlauftemperatur wurde so durch die in Abhängigkeit des Hochdruckes bewirkte Erhöhung der Masse des Kältemittels im Kältemittelspeicher erreicht. Im Gegensatz zu dem Verfahren mit ausschließlicher Drosselverstellung wird bei der Regelung der reichen Lösungskonzentration mit Kältemittelspeicher mit steigender Heizwasservorlauftemperatur die Konzentration der armen Lösung von 19 % bei 30 °C auf 11% bei einer Heizwasservorlauftemperatur von 50 °C abgesenkt (**Bild 4**). Dieses Verfahren bewirkt dadurch ein geringeres Ansteigen des spezifischen Lösungsumlaufes von 2,7 bei 30 °C auf ca. 5,1 bei einer Heizwasservorlauftemperatur von 50 °C. Die Fördermenge der Lösungspumpe erhöht sich in dieser Betriebsweise mit dem Prototyp dementsprechend auch nur von 5,6 g/s auf 21,3 g/s.

Betrachtet man die heizwasserseitig bilanzierten Heizzahlen des Prototypen zeigt sich, dass bei allen Heizwasservorlauftemperaturen die Heizzahl mit dem Verfahren mit Kältemittelspeicher über der Heizzahl mit dem Verfahren mit Drosselverstellung liegt. Mit dem Regelungsverfahren mit Kältemittelspeicher konnten Heizzahlen bis 1,73 erreicht werden [3].

Bei dem Verfahren mit Drosselverstellung, ohne Kältemittelspeicher, nimmt die Spreizung der Konzentrationen mit steigender Heizwasservorlauftemperatur stärker ab als bei dem Verfahren mit Kältemittelspeicher. Dies zeigt sich auch im Verlauf der Heizzahl. Die Heizzahl fällt bei dem Verfahren mit Drosselverstellung stärker mit steigender Heizwasservorlauftemperatur als mit dem Verfahren mit Kältemittelspeicher. Während mit dem Verfahren mit Kältemittelspeicher bei einer Heizwasservorlauftemperatur von 50 °C und einer Soletemperatur von -10°C noch eine Heizzahl von ca. 1,4 beim Prototyp erreicht wurde, fiel die Heizzahl mit dem Verfahren ohne Kältemittelspeicher auf einen Wert von ca. 1,3.

Zwar wurde die in [1] beschriebene mathematische Modellierung mit Komponenten auf der Basis von Blasensäulen bei Austreiber und Absorber durchgeführt, aber ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus dieser Untersuchung des Prototypen mit Plattenwärmetauschern mit integriertem Kältemittelspeicher zeigt, daß die experimentellen Heizzahlen nur geringfügig unter denen der mathematischen Simulation liegen (**Bild 5**).

Bilder:

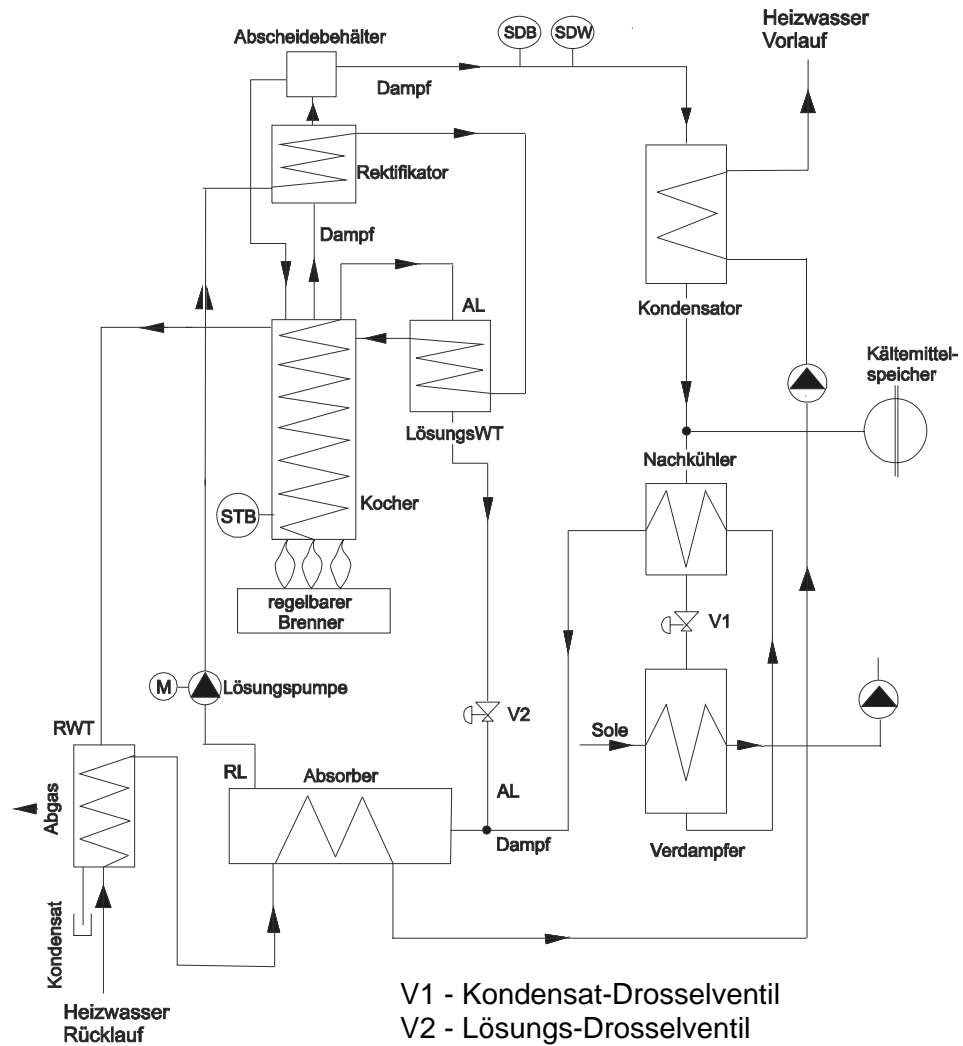


Bild 1: Schema der geregelten Absorptionswärmepumpe

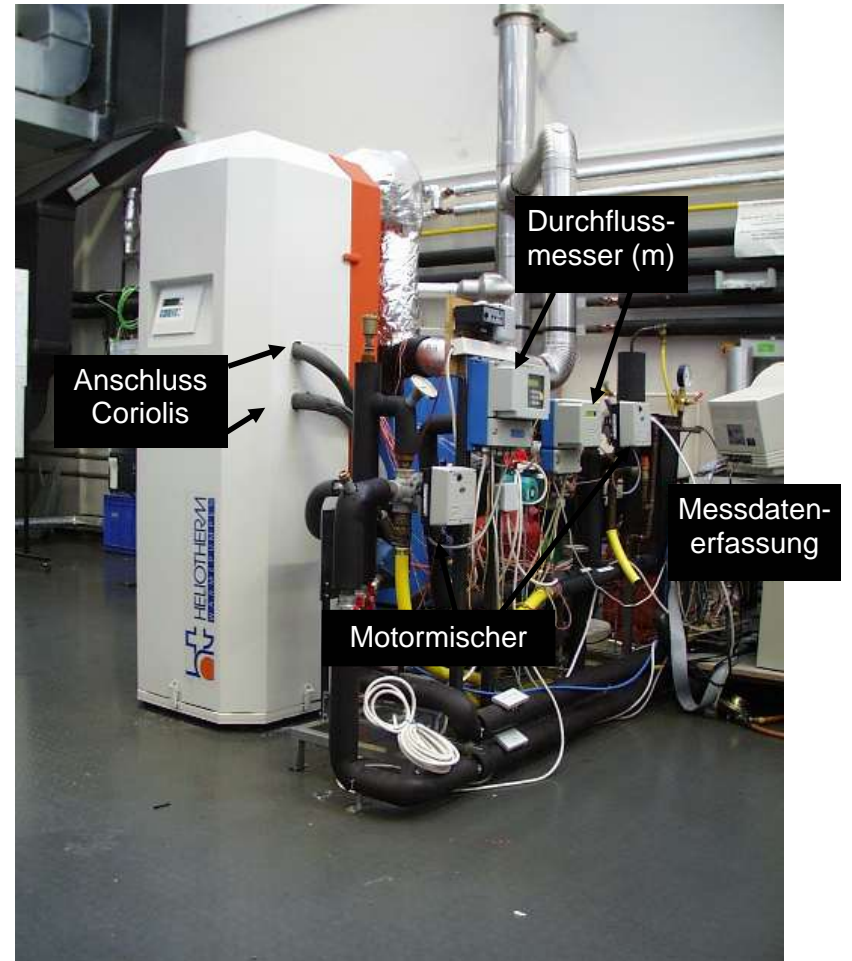


Bild 2: Einbau der AWP in die Prüfstandsperipherie

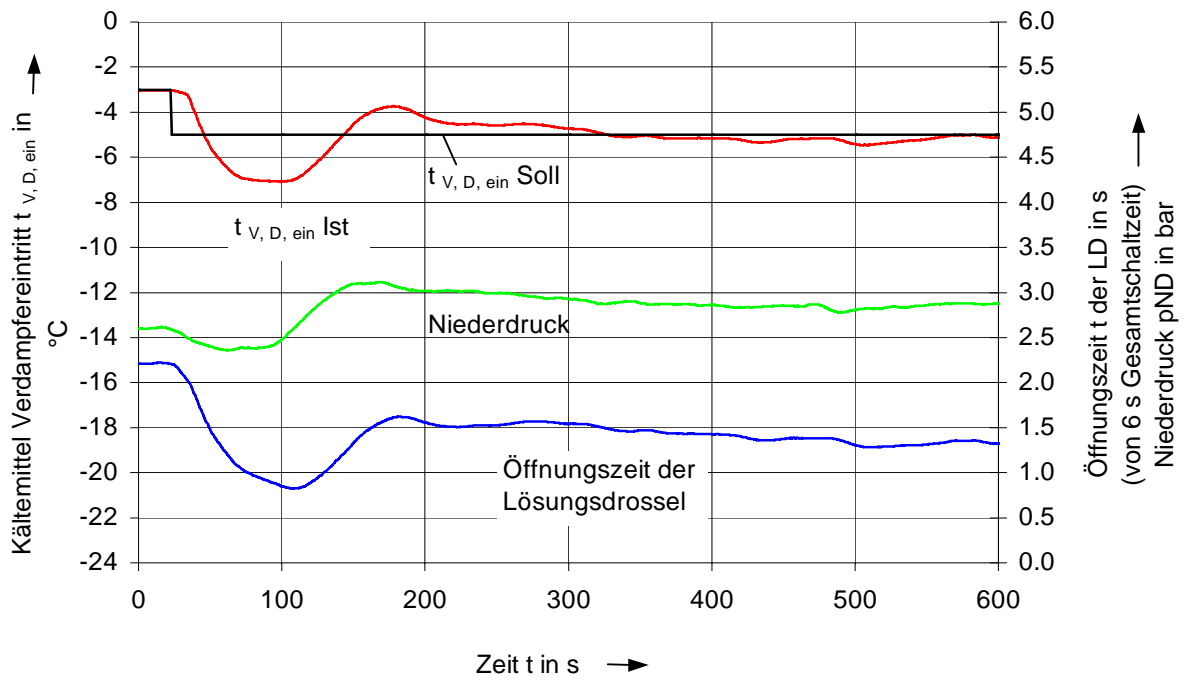


Bild 3: Einschwingvorgang nach Absenkung der Sole-Eintrittstemperatur am Verdampfer

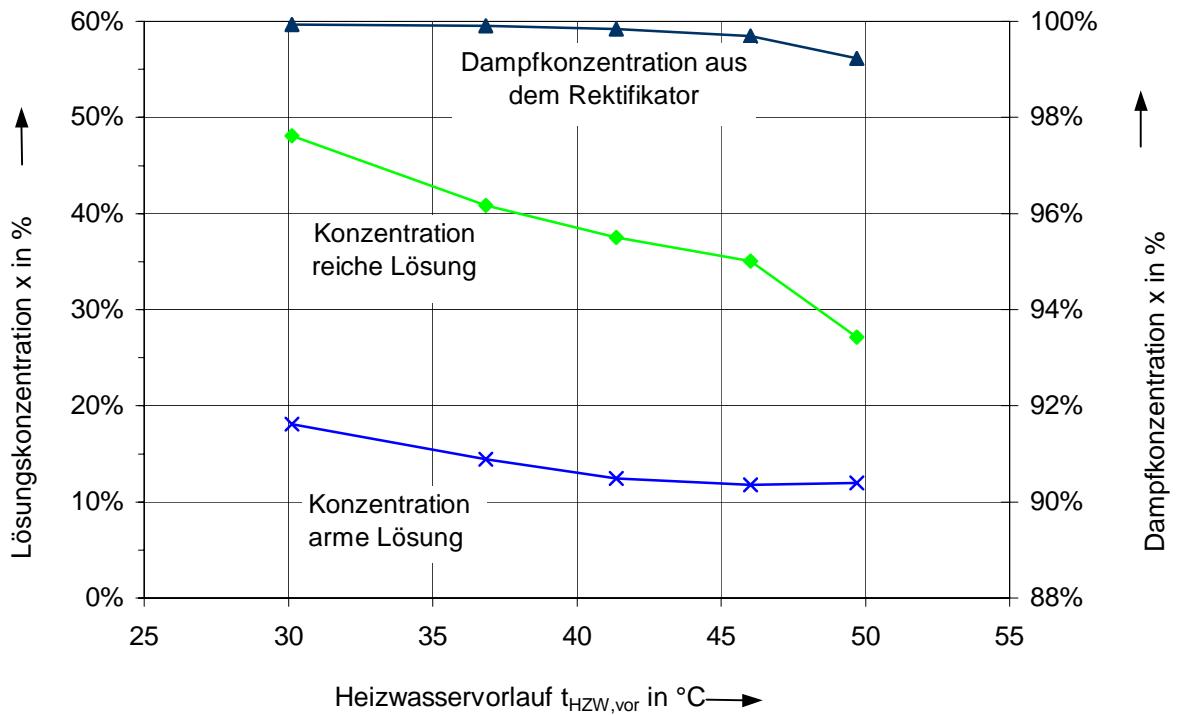


Bild 4: Regelung der Konzentration der reichen Lösung in AWP mit Kältemittelspeicher

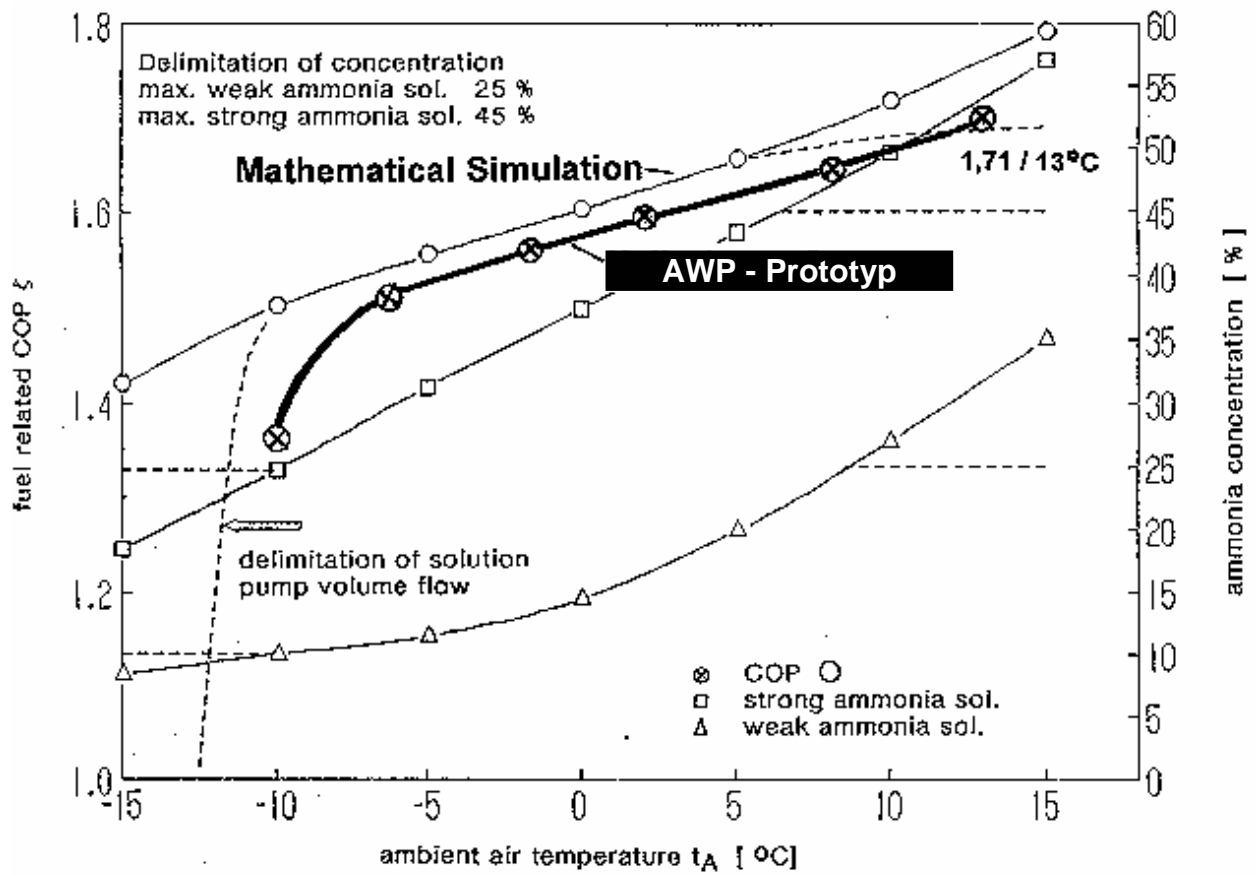


Bild 5: Vergleich der Heizzahlen von mathematischer Simulation mit dem Prototyp

Literatur:

- [1] Mardorf, L.: Entwicklung und Test einer monovalenten Absorptionswärmepumpe für Hausheizungssysteme. Jahrbuch 92, Hrsg. VDI - Ges. Energietechnik, S. 256-268, VDI - Verlag, Düsseldorf 1992, ISBN 3-18-401213-1.
- [2] Mardorf, L.: Controllable Cycle Investigation of Direct Fired Absorption Heat Pump for Residential Heating Systems. The International Absorption Heat Pump Conference '94, Jan 19-21, 1994, p. 339 - 344, New Orleans, Louisiana, USA.
- [3] Mardorf, L. ; Menger, P.: Gasbeheizte Absorptionswärmepumpe mit optimierten Leistungszahlen für Hausheizungen. Abschlußbericht Forschungs- und Entwicklungs-Projekt AGIP Nr. 1997.231, Jan.1999.