

Einsatz ölgeschmierter Schraubenverdichter in Absorptions-Kompressions-Wärmepumpen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser

Dipl.-Ing. R. Heidelck, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H. Kruse, Hannover

Zusammenfassung

Absorptions/Kompressions-Kältemaschinen ermöglichen erhebliche Energieeinsparungen im Wärmepumpenbetrieb. Diese liegen in der Nutzung des Temperaturglides begründet, der in den Wärmeaustauschern dieser Kältemaschinen auftritt. Für Hochtemperaturwärmepumpen mit Temperaturen bis 120°C kann das Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser verwendet werden. Die Bewertung des Betriebsverhaltens von ölgeschmierten Schraubenverdichtern für solche Absorptions/Kompressions-Kältemaschinen ist dabei von besonders großem Interesse. Es wurde daher ein Prüfstand aufgebaut, um experimentelle Daten für eine Bewertung zu liefern.

Gegenstand der experimentellen Untersuchungen ist die Mischbarkeit von Ammoniak und Wasser mit Kältemaschinenöl unter Betriebsbedingungen. Sie dient als Ausgangspunkt für die Untersuchung der tribologischen Eigenschaften der verwendeten Öle. Zusätzlich wurden Ölstabilitätsuntersuchungen an Hubkolbenverdichtern durchgeführt. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen werden dargestellt.

1 Einleitung

Absorptions-Kompressions-Kältemaschinen werden seit ungefähr 100 Jahren in der Literatur behandelt /1/. Die erste Veröffentlichung stammt von Ösenbrück aus dem Jahre 1895 /2/. 1950 wurden von Altenkirch zum erstenmal detaillierte theoretische Untersuchungen durchgeführt /3/. Dabei wurde festgestellt, daß der Betrieb solcher Anlagen durch Nutzung des Temperaturglides in den Wärmeaustauschern zu erheblichen Energieeinsparungen gegenüber konventionellen Kälteanlagen führen kann.

Bercescu berichtete 1983 erstmals über experimentelle Untersuchungen /4/. Er verwendete einen zweistufigen Hubkolbenverdichter und Ammoniak/Wasser als Arbeitsstoffpaar. Den

aktuellen Stand der Forschung und Technik faßte Groll 1997 zusammen /1/. Danach liegen die besonderen Vorteile von Absorptions-Kompressions-Kältemaschinen in der erhöhten Leistungszahl, der Möglichkeit durch Anpassung des spezifischen Ansaugvolumens die Anlagenleistung zu regeln und der Reduktion der Anlagendrücke für eine gegebenes Kältemittel durch Verwendung eines Lösungsmittels. Trotz dieser Vorteile wird diese Technik bis heute noch nicht kommerziell eingesetzt.

Die Möglichkeit der Druckreduktion führte zu dem Vorschlag, Absorptions-Kompressions-Kältemaschinen mit dem Kältemittel Ammoniak und dem Lösungsmittel Wasser als Hochtemperatur-Wärmepumpe zu betreiben. Es werden Temperaturen von 120°C im Nutzwärmeaustauscher angestrebt, die mit reinem Ammoniak zu einem Anlagendruck von 91 bar führen würden. Wird zusätzlich Wasser als Lösungsmittel eingesetzt, können die Betriebsdrücke in den Bereich konventioneller Kälteanlagen unter 25 bar gesenkt werden.

Von besonderer Bedeutung für die Realisierung solcher Anlagen ist der Verdichter. Um wirtschaftlich und energetisch sinnvolle Anlagen zu entwickeln, sollten ölgeschmierte Verdichter eingesetzt werden. Im März 1996 startete ein Forschungsprojekt der EU, das sich speziell die Realisierung solcher Anlagen mit ölgeschmierten Verdichtern zum Ziel gesetzt hat /5/. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstand diese Untersuchung über ölgeschmierte Schraubenverdichter.

2 Funktionsweise von Absorptions-Kompressions-Kältemaschinen

In Abbildung 1 ist der grundsätzliche Aufbau eines solchen Systems dargestellt. Als Kältemittel wird Ammoniak und als Lösungsmittel Wasser verwendet. Das verdichtete Kältemittel Ammoniak mit geringem Wasserdampfanteil von ca. 1 bis 5% wird im Resorber in einer Lösung absorbiert. Dabei wird bei gleitender Temperatur Wärme abgegeben. Am Austritt des Resorbers ist das gesamte gasförmige Kältemittel absorbiert. Im Drosselventil wird der gesamte Stoffstrom entspannt und in den Entgaser eingespritzt. Dort findet unter Wärmeaufnahme eine Teilverdampfung bei gleitenden Temperaturen statt. Im nachgeschalteten Abscheider werden Restflüssigkeit und Dampf voneinander getrennt. Der Dampf wird vom Verdichter und die Flüssigkeit von der Lösungspumpe angesaugt. Um die Temperatur der Lösungsflüssigkeit jeweils denen im Resorber und Entgaser anzupassen, wird ein Temperaturwechsler vorgesehen. In einer realen Anlage sind noch weitere Maßnahmen

notwendig, um die Lösung geeignet zu temperieren. Für den Betrieb eines Schraubenverdichters sind außerdem noch ein Ölabscheider und ein Ölkühler notwendig. Die Flüssigkeit, die durch das Drosselventil strömt und zuvor das gesamte Kältemittel im Resorber absorbiert hat, wird reiche Lösung genannt. Nach dem Austreiben des Kältemittels im Entgaser ist die Lösung an Kältemittel verarmt und wird entsprechend arme Lösung genannt.

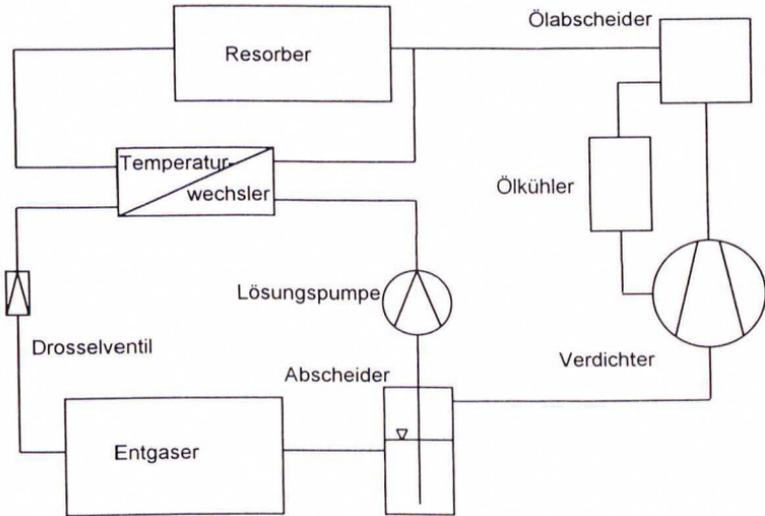


Abbildung 1: Schema einer Absorptions-Kompressions-Kältemaschine

Dieser Prozeß kann auch vereinfacht in einem $\lg-p-1/T$ -Diagramm dargestellt werden. In Abbildung 2 ist ein Beispiel angegeben. Durch Variation der Betriebsdrücke und damit der Konzentrationen, kann bei geforderten Temperaturen in den Wärmeaustauschern das spezifische Ansaugvolumen in weiten Grenzen angepaßt werden. Eine wirkungsvolle Leistungsregelung kann so realisiert werden. Ebenso kann eine solche Anlage in weiten Grenzen an unterschiedliche Temperaturbereiche angepaßt werden, ohne das maximale Anlagendrücke von 25 bar überschritten werden.

Für das in Abbildung 2 angegebene Beispiel wurde eine entsprechende Kreislaufberechnung durchgeführt. Als Verdichter wurde ein offener Schraubenverdichter mit einem geo-

3 Vereinfachtes System

Um den experimentellen Aufwand in Grenzen zu halten, wurde ein vereinfachtes System entwickelt, welches in Abbildung 3 dargestellt ist. Das vereinfachte System soll in der Lage sein, den Ansaug- und den Druckzustand einer normalen Absorptions-Kompressions-Kältemaschine zu simulieren. Untersuchungen des Verdichters und dessen Schmierung lassen sich mit so einem System einfacher und effizienter durchführen.

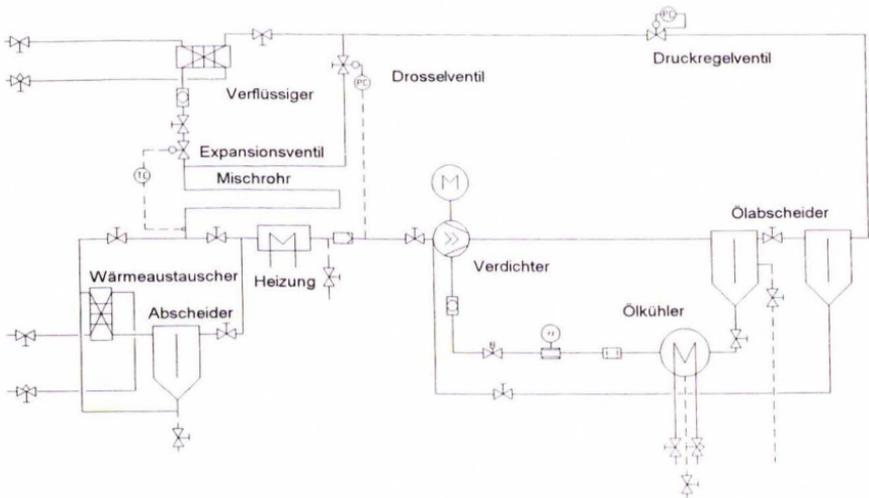


Abbildung 3: Anlagenskizze des vereinfachten Systems

Die Hauptkomponenten des vereinfachten System sind der Verdichter, der Verflüssiger, das Drosselventil, die Wärmeaustauscher-Abscheider-Einheit und die Heizung. In diesem System wird nur ein Teil des Kältemittels kondensiert. Der andere Teil wird durch die Verdampfung des kondensierten Teils gekühlt. Damit wird die Wärme, die durch den Verdichter in das System eingebracht wird, abgeführt. Das Mischrohr wird benutzt, um eine homogene Gasphase des Kältemittels zu erreichen. Die Abscheider-Wärmeaustauscher-Einheit wird dazu benutzt, den Wasseranteil im zirkulierenden Kältemittel zu regulieren. Zu diesem Zweck wird das zirkulierende Gas mit einer Flüssigkeit am Eintritt des Wärmeaustauscher vermischt. Die Flüssigkeit besteht aus Wasser mit einem Anteil Ammoniak. Im Wärmeaustauscher werden Gas und Flüssigkeit durch die hohe Turbulenz, die durch die Rillenstruktur der Wärmeaustauscher-Platten hervorgerufen wird, intensiv gemischt. Mit einer externen

Flüssigkeit kann das Flüssigkeits-Gas-Gemisch temperiert werden. Das Ziel besteht darin, das thermodynamische Gleichgewicht im Gemisch zu erreichen. Dann ist es möglich durch Messung des Druckes und der Temperatur, die Konzentration des Ammoniak/Wasser-Gemisches in der Flüssigkeit und dem Gas zu bestimmen. Durch Ändern der Temperatur im Wärmeaustauscher kann die Ammoniak/Wasser-Konzentration eingestellt werden. Im nachfolgenden Abscheider wird das Gas und die Flüssigkeit wieder voneinander getrennt. Die Flüssigkeit zirkuliert in der Wärmeaustauscher-Abscheider-Einheit. Das Gas wird durch eine Heizung überhitzt und vom Verdichter angesaugt.

In Tabelle 2 ist ein Beispiel für eine Kreislaufberechnung für dieses System angegeben. Abweichend von den üblicherweise in Ammoniakanlagen verwendeten Komponenten, wurden einige spezielle Komponenten in dem Prüfstand installiert. In der Druckleitung befindet sich ein Druckregelventil. Es wird benutzt, um einen konstanten Druck am Auslaß des Verdichters sicherzustellen. Zum Drosseln wird ein anderes Druckregelventil verwendet. Es hat eine externe Verbindung zur Saugleitung. Die Funktion des Ventil besteht darin, einen konstanten Druck am Eintritt des Verdichters aufrechtzuerhalten. Als Expansionsventil kommt eine spezielle Bauart eines thermostatischen Ventils zum Einsatz. Es ist auf besonders große Überhitzungen ausgelegt. Als Wärmeaustauscher werden Platten-Wärmeaustauscher eingebaut mit Ausnahme des Ölkühlers, der als Rohrbündel-Wärmeaustauscher ausgeführt ist. Für die Ölrückführung sind einige Komponenten erforderlich: ein Ölfilter, ein Öldurchflußwächter, ein Magnetventil zur Kontrolle der Einspritzung und ein Schauglas. Um einen besonders hohen Ölabscheidegrad in der Druckleitung zu erreichen, sind zwei Ölabscheider integriert. Der Abscheider in der Saugleitung zur Kontrolle des Wasseranteils ist ein modifizierter Ölabscheider. Die Heizung wird durch Umwickeln eines Rohres mit Heizbändern realisiert.

Tabelle 2: Beispiel einer Kreislaufberechnung für Anlagenschaltung nach Abbildung 3

(Wärmesenke)	(100 → 120 °C)	Sauggastemperatur	$t_{\text{Saug}} = 84 \text{ °C}$
(Wärmequelle)	(70 → 60 °C)	Druckgastemperatur	$t_{\text{Druck}} = 130 \text{ °C}$
(Resorbertemperatur)	(130 → 110 °C)	spez. Ansaugvolumen	$v_{\text{Saug}} = 569,4 \text{ l/kg}$
(Entgasertemperatur)	(55 → 65 °C)	Konzentration des Dampfes	$\xi_{\text{D}}'' = 0,944$
Resorberdruck	$p_{\text{R}} = 16 \text{ bar}$	Massenstrom des Dampfes	$\dot{m}_{\text{D}} = 36,88 \text{ g/s}$
Entgaserdruck	$p_{\text{E}} = 3 \text{ bar}$	Leistung des Verdichters	$P \approx 15,8 \text{ kW}$
geom. Hubvolumen	$\dot{V}_{\text{g}} = 84 \text{ m}^3/\text{h}$	Leistung des Verflüssigers	$\dot{Q}_{\text{C}} = 4,1 \text{ kW}$

4 Ölauswahl

Zur Schmierung des Verdichters wurden im Zusammenarbeit mit den Ölherstellern drei Öle unterschiedlicher Typen zur weiteren Untersuchung ausgewählt: Zwei für Ammoniak unlösliche Öltypen, ein Polyalphaolefin (PAO) und ein Alkyl Benzol (AB). Zusätzlich wird ein Polyalkylen Glykol (PAG) untersucht. Dieses PAG-Öl ist nur teillöslich für Ammoniak und unlöslich für Wasser. Durch die verbesserte Materialverträglichkeit stellt es eine Weiterentwicklung gegenüber den bekannten PAG-Ölen dar. Erste Laboruntersuchungen mit diesem Öl belegen, daß die Mischbarkeit des PAG-Öls mit Wasser sehr gering ist. Die wichtigsten Eigenschaften der Öle sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Tabelle 3: Untersuchte Öle

Nr.	Abk.	Öltyp	Mischungsverhalten		Viskositätsklasse
			Ammoniak	Wasser	
1	PAO	Polyalphaolefin	unmischbar	unmischbar	220
2	AB	Alkyl Benzol	unmischbar	unmischbar	150
3	PAG	Polyalkylen Glykol	teilweise mischbar	unmischbar	120

Um die Einsatzfähigkeit dieser Öle in der Versuchsanlage abschätzen zu können, wurden Gaskreislauftests an Hubkolbenverdichtern durchgeführt, die zum Ziel hatten, tribologische und chemisch-thermische Probleme der Arbeitsstoffe Ammoniak-Öl unter Feuchtigkeitsbeimengungen aufzuzeigen. Alle Tests dauerten 500 Betriebsstunden. Die Ventilttemperaturen betragen 160 °C, die Ölsumptemperaturen 80 - 90 °C. In Tabelle 4 sind die Versuchsparameter zusammengefaßt.

Der Verdichter wurde für den Einsatz mit Ammoniak modifiziert. Weder Kupfer noch Aluminium Komponenten kamen zum Einsatz. Die Gleitlagerung am Pleuelauge wurde durch eine Nadellagerung ersetzt, da Kupfer und Aluminium in der Orginallagerung benutzt wird.

Die Testreihe bestand aus vier Einzeltests. Der erste Test wurde mit dem PAG-Öl und einem Wasseranteil im Öl von 1,09% als ungünstigsten Fall für teilweise lösliche Öle durchgeführt. Dann folgten drei Tests mit einem Wasseranteil von 0,2% für jedes Öl. So ist ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Ölen möglich. Der Wasseranteil bewegt sich im Bereich der Mischbarkeit von Öl und Wasser.

Tabelle 4: Betriebsbedingungen der Gaskreislauftests mit Hubkolbenverdichtern

Test	1	2	3	4
Öl	PAG	PAO	PAG	AB
Wasseranteil bezogen auf die Ölmasse	1.09%	0.2%	0.2%	0.2 %
Betriebsstunden	500 h	500 h	500 h	500 h
Druckgastemperatur	160 °C	160 °C	160 °C	160 °C
Sauggastemperatur	60 - 70 °C	90 - 100 °C	80 - 90 °C	75 - 85 °C
Öltemperatur	80 - 82 °C	88 - 90 °C	85 - 88 °C	82 - 86 °C

Zur Bewertung der Gaskreislauftests wurden Verdichterbesichtigungen und Ölanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Ölanalysen sind in Tabelle 5 dargestellt. Wie erwartet, war der Wasseranteil in allen Proben erhöht. Die anderen Analysewerte sind im Bereich der Frischölqualität. Der Phosphoranteil im AB-Öl wird durch Additive hervorgerufen und ist im normalen Bereich.

Tabelle 5: Ölanalyse der Gaskreislauftests

	Einheit	Test 1 - PAG1		Test 2 - PAO		Test 3 - PAG1		Test 4 - AB	
		G-Öl	N-Öl	G-Öl	N-Öl	G-Öl	N-Öl	G-Öl	N-Öl
Viscosität, 40°C	mm ² /s	125	125	206	208	120	125	159	150
Basenzahl	mgKOH/g	0,7	-	< 0.01	Nz 0.02	0,8	-	0.06	-
Wasseranteil (Karl Fischer)	mg/kg	770	<300	91	< 40	2000	<300	177	<30
Fe-Anteil	mg/kg	Spuren	n.n.	2	n.n.	n.n.	n.n.	Spuren	n.n.
Zn-Anteil	mg/kg	Spuren	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Si-Anteil	mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Spuren	n.n.
Cu-Anteil	mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
P-Anteil	mg/kg	n.n.	n.n.	-	n.n.	n.n.	n.n.	336	340

n. n. = nicht nachweisbar, Nz = Neutralisationszahl

G-Öl = Gebrauchtöl, N-Öl = neues Öl,

Die Verdichterbesichtigung zeigte nur geringe Verschleißerscheinungen für die ersten drei Tests mit dem PAG- und dem PAO-Öl. Speziell die Laufbilder der Kolbenringe, an denen Mischreibung auftritt, waren im guten Zustand. Lediglich die modifizierten Pleuelaugenlagerungen zeigten ausgeprägtere Verschleißerscheinungen, sie sind aber auch nicht für die-

sen Verdichter konstruiert. Die Verfärbungen und Ablagerungen an den Ventilplatten können als normal eingeschätzt werden. Im ersten Test mit dem PAG-Öl und einem Wasseranteil von 1,09% waren diese Verfärbungen und Ablagerungen etwas verstärkt.

Während des vierten Tests mit dem AB-Öl, wurde Schaumbildung beobachtet. Die Verdichterbesichtigung ergab moderaten Verschleiß. Die Laufbilder der Kolbenringe zeigten beginnende Verschleißerscheinungen. Auch deutliche Verfärbungen und Ablagerungen konnten festgestellt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Untersuchungen einen Einsatz des untersuchten PAG- und des PAO-Öl mit guten Ergebnissen in einer Schraubenverdichteranlage vermuten lassen. Einschränkend sollte aber bemerkt werden, daß Verschleißuntersuchungen an Hubkolbenverdichtern nicht 1:1 auf Schraubenverdichter übertragbar sind, da bei Schraubenverdichtern die Schmierung aus dem druckseitigen Ölvorrat erfolgt.

Die Bewertung des AB-Öl zeigt, daß zwar die Öluntersuchung zu ähnlich guten Ergebnissen führte wie bei dem PAO- und dem PAG-Öl, aber die Verdichterbesichtigung ergab schlechtere Ergebnisse. Aus diesem Grund werden die weiteren Untersuchungen an dem Schraubenverdichter mit dem PAO- und dem PAG-Öl ausgeführt.

5 Aufbau

In den Abbildungen 4 und 5 sind die Vorder- und Rückseite des Prüfstandes dargestellt. Alle Leitungen sind aus Stahl gefertigt, Aluminium oder gar Kupfer wird nicht verwendet, da Korrosionserscheinungen in Verbindung mit dem Kältemaschinenöl und dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser soweit wie möglich ausgeschlossen werden sollen.

Die Vorderseite zeigt die Verdichtereinheit. Ganz links ist der Ölabscheider zu sehen, rechts daneben der Schraubenverdichter. Der Schraubenverdichter ist direkt an einen Motor gekoppelt, der den Verdichter mit einer Drehzahl von 1495 min^{-1} antreibt. Unter dem Motor ist noch die Ölzuführung zum Verdichter zu sehen. Ganz unten im Bild befindet sich der Ölkühler. Darüber sind die weiteren Komponenten wie Ölfilter usw. zu erkennen.

Auf der Rückseite - Abbildung 5 - ist rechts der Verflüssiger und links der Wärmeaustauscher für die Befeuchtung angeordnet. Der Lösungsabscheider befindet sich in der Mitte. Der Prüfstand ist mit Meßtechnik ausgestattet, die es erlaubt, die relevanten Temperaturen und Drücke in der Anlage zu messen.

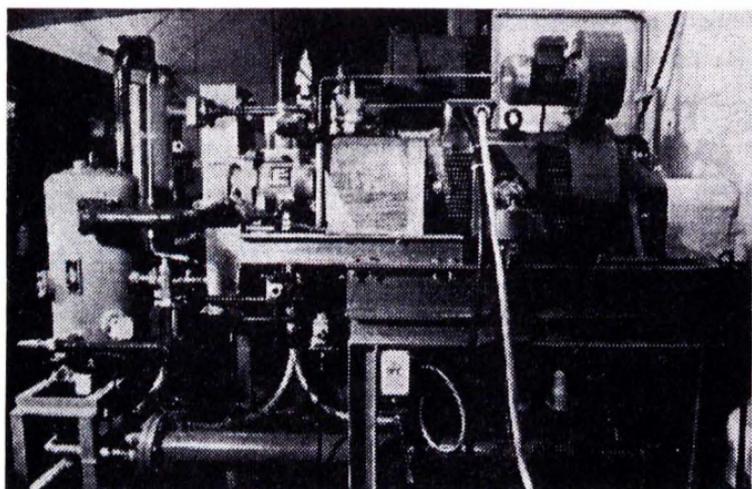


Abbildung 4: Vorderseite des Prüfstandes

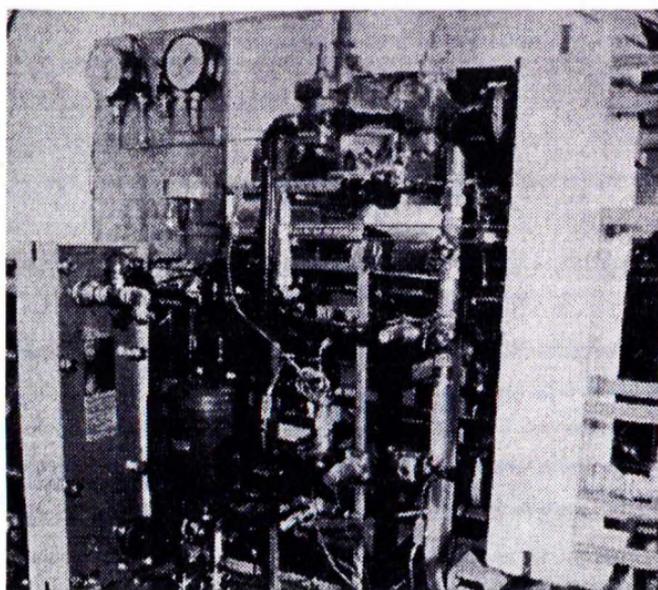


Abbildung 5: Rückseite des Prüfstandes

6 Versuchsbetrieb

Der Testbetrieb gliedert sich in zwei Abschnitte. Zunächst wurden die Versuche mit dem PAO-Öl als Schmieröl gestartet. Im zweiten Abschnitt folgen Untersuchungen mit dem PAG-Öl. Nach Inbetriebnahme wurde die Funktion des Prüfstandes zunächst mit reinem Ammoniak und dem PAO-Öl getestet. Danach wurde zusätzlich Wasser eingefüllt. Der Verdichterhersteller erteilt für diesen Schraubenverdichter eine Freigabe bis 80°C Druckgastemperatur und nach Absprache bis 100°C. Temperaturen darüber sind als experimentell einzustufen. Daher wurde die Anlage zunächst nur bis 100°C betrieben, um Schäden sicher auszuschließen. Dabei wurden bisher keine ungewöhnlichen Vibrationen, Geräusche oder andere Fehlfunktionen beobachtet. In Tabelle 5 sind Meßwerte für einen Betriebszustand dargestellt. Eine Messung des Ammoniak- und Wasseranteils im Öl, das dem Ölabscheider entnommen wurde, ergab eine Ammoniakkonzentration von 1,3% und eine Wasserkonzentration von 0,3%.

Die Test haben erst kürzlich begonnen und werden für verschiedene Betriebsbedingungen und mit dem PAG-Öl fortgesetzt. Mit Hilfe dieser Untersuchungsergebnisse können dann detailliertere Aussagen über die Eignung der eingesetzten Schmieröle getroffen werden.

Tabelle 5: Beispielmessung des Kältemittelkreislaufs

Meßpunkt	Meßwert
Saugdruck	$p_E = 2,48 \text{ bar}$
Hochdruck	$p_R = 7,55 \text{ bar}$
Ansaugtemperatur	$t_{\text{Saug}} = 48,4 \text{ °C}$
Druckgastemperatur	$t_{\text{Druck}} = 83,0 \text{ °C}$
Ölabscheider	$t_{\text{Öl-Ab}} = 82,2 \text{ °C}$
Verdichter-Öleinspritzung	$t_{\text{Öl-V-E}} = 68,6 \text{ °C}$
Mischrohr-Ausgang	$t_{\text{Misch}} = 49,7 \text{ °C}$
Lösungsabscheider	$t_{\text{L-Ab}} = 32,6 \text{ °C}$
Konzentration im Ansaugzustand	$\xi_D'' = 0,99$

7 Referenzen

- /1/ Groll, E.A.: Current Status of Absorption/Compression Cycle Technology. ASHRAE Transactions, Symposia, PH-97-1-1, S. 361-374, 1997.
- /2/ Osenbrück, A.: Verfahren zur Kälteerzeugung bei Absorptionsmaschinen. Deutsches Reichspatent DRP 84084, 1895.
- /3/ Altenkirch, E.: Kompressionskältemaschine mit Lösungskreislauf. Kältetechnik 2(10) S. 251-259, 2(11) S.279-284, 2(12) S. 310-315, 1950.
- /4/ Bercescu, V.; et al.: Aspects du fonctionnement d'une installation expérimentale de pompe de chaleur avec compression mécanique et circulation additionnelle de la solution. Proc. of the XVlth Int. Congress Refrig., Commission E2, Paris, France, S. 173-178, 1983.
- /5/ European Commission Joule: Advanced Cycles and Replacement Working Fluids in Heat Pumps. PROP-No. 4581PL950097, Contract-No. JOET950009.