

Maschinenversuche mit Propen und Mineralöl, Alkylbenzol sowie Polyalkylenglykolen

Stabilität von Propen im Kältemittelkreislauf

Michael Schmitz und Dirk Gebhardt, Hannover

In den letzten Jahren wird zunehmend der Einsatz der brennbaren Kohlenwasserstoff-Kältemittel, die kein Ozonabbaupotential und nur ein geringfügiges Treibhauspotential besitzen, untersucht. Für den Einsatz als umweltfreundliches Kältemittel scheint aus der Stoffgruppe der Kohlenwasserstoffe neben den bereits in einigen Anwendungen eingeführten Arbeitsstoffen Isobutan (R 600a) (Kühl- und Gefriergeräte) und Propan (R 290) (Wärmepumpen) der Kohlenwasserstoff Propen (R 1270) besonders geeignet zu sein.

Zum Einsatz eines Kältemittels muß insbesondere dessen chemisch-thermische Stabilität unter den im Kältemittelkreislauf herrschenden Bedingungen und in Anwesenheit der weiteren im Kreislauf eingesetzten Stoffe gewährleistet sein. Speziell die aufgrund der Doppelbindung der Kohlenstoffatome des Propens zu erwartende geringere Stabilität könnte als Hinderungsgrund für eine Anwendung dieses Kältemittels in nennenswertem Umfang gesehen werden. Das Forschungsvorhaben „Stabilität von Kohlenwasserstoffen im Kältekreislauf“ des Forschungsrates Kältetechnik e. V. [1] hatte zum Ziel, die bislang noch nicht hinreichend untersuchte chemisch-thermische Stabilität des Propens im Kältemittelkreislauf zu ermitteln. Im Hinblick auf die Anforderungen des

zu den Autoren

Dipl.-Ing. Michael Schmitz,
wissenschaftlicher Mitarbeiter
im FKW – Forschungszentrum
für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH,
Hannover



Dipl.-Ing. Dirk Gebhardt,
wissenschaftlicher Mitarbeiter
im FKW – Forschungszentrum
für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH,
Hannover



praktischen Einsatzes wurde am FKW – Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH in Hannover im experimentellen Teil des Forschungsvorhabens die chemisch-thermische Stabilität des Propens in Maschinenversuchen untersucht, wobei die Laboruntersuchungen und tribotechnischen Messungen am Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden ausgeführt wurden.

Gaskreisläufe

Die Stabilität des Propens wurde in sogenannten Gaskreisläufen, in denen im Gegensatz zu einem realen Kältemittelprozeß kein Phasenwechsel stattfindet, unter-

sucht. Diese Gaskreisläufe sind in Zusammenarbeit des FKW und des IKW-Institut für Kältetechnik und Angewandte Wärmetechnik der Universität Hannover mit der Industrie in Anlehnung an die DIN 8978 (Verschleißtest mit Kältemittelverdichtern) entwickelt worden. Das Verschleißverhalten des Kältemittelverdichters kann maßgeblich von der chemisch-thermischen Stabilität des Kältemaschinenöles in Anwesenheit des eingesetzten Kältemittels, der verwendeten Materialien und gegebenenfalls vorliegender Fremdstoffe, z. B. von Feuchtigkeit, unter den im Kältemittelkreislauf herrschenden Bedingungen sowie der Löslichkeit des Kältemittels im Öl und der damit verbundenen Viskositätsabsenkung des Öles bestimmt werden. Insoweit dient auch das Verschleißbild des Verdichters neben der Analyse der eingesetzten Arbeitsstoffe als ein wesentliches Beurteilungskriterium des Stabilitätsverhaltens des verwendeten Kältemaschinenöl/Kältemittel-Gemisches. Die am FKW im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten vier Versuchsanlagen sind für verschiedene hermetische und halbhermetische Verdichter geeignet. Für die Dauerlaufversuche mit Propen wurde der Einsatz von Halbhermetikverdichtern vorgesehen. Als Versuchsparameter lassen sich grundsätzlich der Verdichtungsdruck p_{V2} , der Saugdruck p_{V1} und die Verdichtungsendtemperatur t_{V2} (Druckgastemperatur am Ventilsplatt) einstellen, so daß sich als weitere Betriebsbedingungen die Sauggastemperatur t_{V1} und die Öltemperatur t_{O1} ergeben. Für die Stabilitätsuntersuchungen mit Propen wurden folgende Sollwerte festgelegt:

- Verdichtungsdruck $p_{V2} = 21 \text{ bar}$
- Saugdruck $p_{V1} = 2,7 \text{ bar}$
- Verdichtungsendtemperatur $t_{V2} = 160 \text{ °C}$

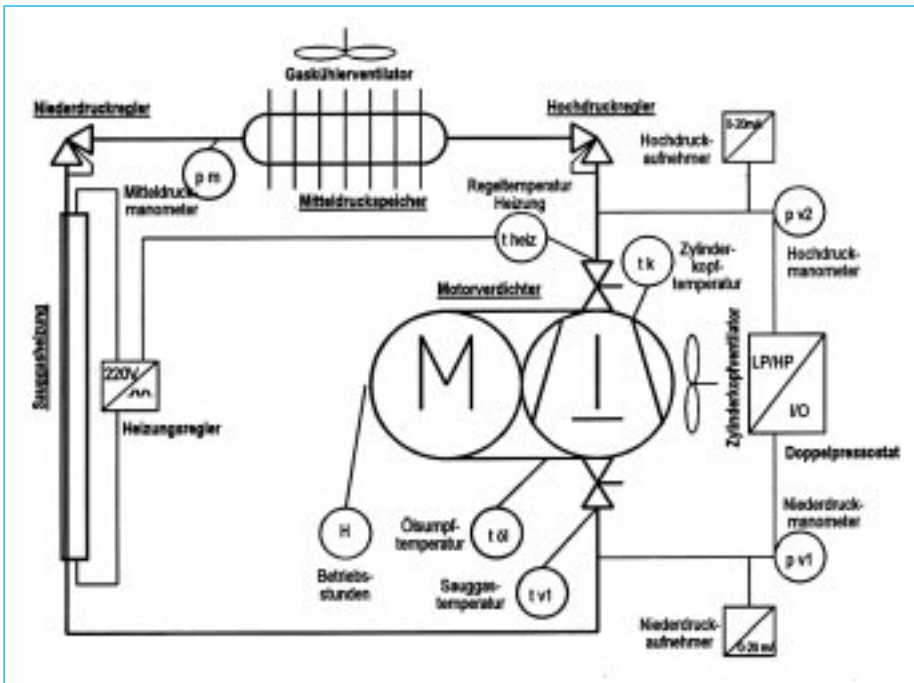


Bild 1 Schema der Gaskreisläufe mit Halbhermetikverdichter

Das Kreislaufschema der Versuchstände mit Halbhermetikverdichtern ist in Bild 1 dargestellt. Das Sauggas vom Druck p_{V1} wird im stark überhitzten Zustand angesaugt und verdichtet. Der gewünschte Gegendruck p_{V2} wird mit einem Hochdruckregler eingestellt und das verdichtete Gas in einen Mitteldruckspeicher entspannt. Das Gas kann im Mitteldruckspeicher durch einen Gaskühlerventilator gekühlt werden. Über einen Niederdruckregler wird das Kältemittel wieder auf den gewünschten Saugdruck p_{V1} entspannt. Das abgekühlte Gas kann anschließend mittels einer Sauggasheizung soweit erwärmt werden, daß es nach der Verdichtung die geforderte Verdichtungs- endtemperatur t_{V2} erreicht. Alle Temperaturen und Drücke werden mittels einer rechnergestützten Meßwerterfassung registriert.

Untersuchte Öle

Die Maschinenversuche wurden in zwei Versuchsreihen mit jeweils vier Parallelversuchen durchgeführt, wobei jeweils zwei der Prüfstände mit dem gleichen Kältemaschinenöl betrieben wurden.

Für Versuchsreihe I wurden als mit Kohlenwasserstoffen lösliche Öle das Mineralöl Shell Clavus G68 sowie das Alkylbenzol Fuchs RENISO SP68 ausgewählt.

In der zweiten Versuchsreihe wurden die Dauerlauf-Prüfstände mit den teillöslichen Polyalkylenglykol-(PAG)-Schmierstoffen Shell Clavus SG68 sowie Fuchs RENISO PGP70 betrieben.

Nr.	Hersteller	Typ	Volumenstrom		Ölfüllung
			50 Hz	24 Hz	
I/1, I/2	Bitzer	2HL-1.2	6,56	-	Shell Clavus G 68
I/3, I/4	Bock	HG3/155-4	13,6	6,53	Fuchs RENISO SP 68
II/1, II/2	Bitzer	2HL-1.2	6,56	-	Shell Clavus SG 68
II/3, II/4	Bitzer	2HL-1.2	6,56	-	Fuchs RENISO PGP 70

Tabelle 1 Untersuchte Verdichter

Sollwerte	
Kältemittel	Propen (R 1270) 2.5 (99,5 Vol.-%)
Verdichtungsdruck	21 bar abs
Saugdruck	2,7 bar
Verdichtungs- endtemperatur am Druckventil	160 °C
Öle Versuchsreihe I	Mineralöl Shell Clavus G 68 Alkylbenzol Fuchs RENISO SP 68
Öle Versuchsreihe II	PAG Shell Clavus SG 68 PAG Fuchs RENISO PGP 70
Wassergehalt der Kältemaschinenöle	I: < 30 ppm, II: Lieferzustand
Versuchsdauer	2000 h
Parameter	
Sauggastemperatur	ca. 90 °C
Öltemperatur	ca. 90 °C

Tabelle 2 Versuchsbedingungen für die Gaskreisläufe der Versuchsreihen I und II

Verdichter

Die Gaskreisläufe wurden mit halbhermetischen Zweizylinderverdichtern ausgerüstet. Für zwei der vier Gaskreisläufe der Versuchsreihe I wurden Verdichter des Herstellers Bitzer vom Typ 2HL-1.2 (Nr. I/1, Nr. I/2), für die beiden anderen Verdichter des Herstellers Bock vom Typ HG3/155-4 (Nr. I/3, Nr. I/4) ausgewählt. Beide Verdichtertypen sind sauggasgekühlt und fördern bei einer Frequenz von 50 Hz einen theoretischen Volumenstrom von 6,56 m³/h bzw. 13,6 m³/h. Die Verdichter Nr. I/1 und Nr. I/2 wurden mit dem Mineralöl Shell Clavus G68, Nr. I/3 und Nr. I/4 mit dem Alkylbenzol Fuchs RENISO SP68 betrieben. Zur Durchführung der zweiten Versuchsreihe mit den PAG-Kältemaschinenölen wurden in allen vier Gaskreisläufen Verdichter des Typs Bitzer 2HL-1.2 eingesetzt. Die Versuchsbedingungen für die Gaskreisläufe sind in Tab. 2 zusammengefaßt.

Versuchsdurchführung

Nach den Dauerlaufversuchen von 2000 Betriebsstunden wurden die einzelnen Bauteile der eingesetzten Verdichter visuell auf Zeichen von Verschleiß, Kupferplattierung, Zersetzung des Kältemittelöles in Form von Schlamm- oder Lackbildung sowie Korrosion untersucht. Das Ausmaß der genannten Betriebseinflüsse wurde sowohl mit Hilfe eines Bewer-

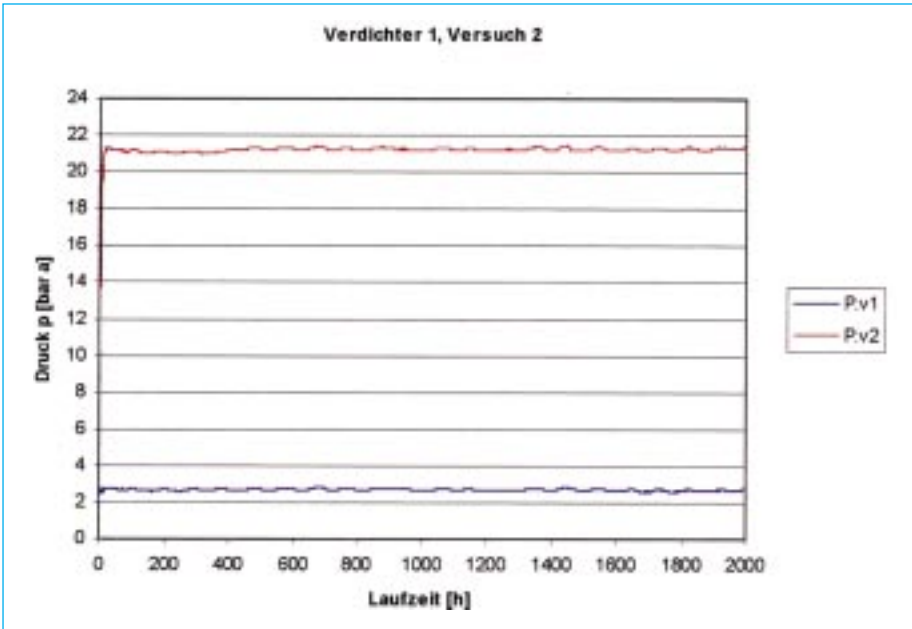


Bild 2 Druckverläufe des Gaskreislaufes II/1 mit Propen – PAG

tungsschemas als auch fotografisch festgehalten, so daß anhand dieser Befunde die Stabilität der Arbeitsstoffe im Kältemittelkreislauf beurteilt wird.

Vor der Durchführung der ersten Versuchsreihe wurden die Verdichter vollständig in ihre Einzelteile zerlegt, mit Pentan gereinigt und vor dem Zusammenbau mit dem Betriebsöl eingeölt. Ebenso wurden die Kreisläufe in die einzelnen Rohrleitungsabschnitte zerlegt und diese solange mit Pentan gespült, bis keine Verunreinigungen mehr erkennbar waren. Die Regeleinrichtungen der Kreisläufe wurden ebenfalls im Pentan-Bad gereinigt. Nach dem Zusammenbau der Kreisläufe und dem Einbau der Verdichter wurden die vollständigen Gaskreisläufe sorgfältig evakuiert und einem Drucktest unterzogen. Da zur Untersuchung in der zweiten Versuchsreihe eine Umstellung der Gaskreisläufe von Mineralöl bzw. Alkylbenzol auf PAG-Schmierstoffe notwendig war, wurde die Vorbereitung der Gaskreisläufe abweichend von der ersten Versuchsreihe durchgeführt. Um den einwandfreien Betrieb mit PAG-Ölen sicherzustellen, war eine möglichst vollständige Entfernung der vorher eingesetzten Schmierstoffe notwendig. Dieser Ölwechsel wurde durch eine wiederholte Spülprozedur der gesamten Gaskreisläufe gewährleistet. Dabei wurden die Gaskreisläufe zunächst

zweimal für eine Dauer von 24 h mit dem Spülöl T01/35 auf Basis spezieller Polyalkylenglykole der Firma Fuchs betrieben. Dieses spezielle Polyalkylenglykol ist im Gegensatz zu den PAG-Kältemaschinenölen mit mineralischen und vielen synthetischen Schmierstoffen gut mischbar. Aufgrund der Hygroskopie der PAG-Schmierstoffe wird eventuell im Kreislauf vorhandene Feuchtigkeit durch die Spülprozedur im Öl angereichert und damit aus dem Kreislauf entfernt. Nach einem weiteren Spülbetrieb mit dem Betriebsöl wurden die zweiten Dauerlaufversuche durchgeführt. Während der Durchführung der

Dauerlaufversuche über 2000 h wurden die Temperaturen und Drücke der Kreisläufe mittels der Meßwerterfassungsanlage in Intervallen von 15 min. aufgezeichnet. In Bild 2 und Bild 3 sind beispielhaft die Druck- bzw. Temperaturverläufe eines Gaskreislaufes der zweiten Versuchsreihe dargestellt.

Auswertung der Versuchsreihen

Zur Auswertung der Versuchsreihen wurde für jeden Gaskreislauf eine visuelle Beurteilung der Verdichterbauteile vorgenommen. Die Bauteile wurden quantitativ auf Zeichen von

- Kupferplattierung (Ablagerung von im Kältemittel gelöstem Kupfer),
- Schlamm- und Verschleißbildung (Verschleiß von Öl, Ölkohle),
- Lackbildung (eingebraunte Ölschicht),
- Verschleiß und
- Korrosion

untersucht. Das Erscheinungsbild der einzelnen Bauteile (Gehäuseteile, Dichtungen, Lager, Ventilplatten und Ventile, Zylinder, Kolben, Pleuel und Kurbelwelle sowie Motor) wurde für die genannten 5 Beurteilungskriterien nach folgendem Schema durch Bewertungsziffern begutachtet:

- ,0': Kein Befund; das Kriterium konnte am Bauteile nicht festgestellt werden;
- ,1': In Spuren; das Erscheinungsbild des Bauteils ließ erste leichte Anzeichen des jeweiligen Beurteilungskriteriums erkennen;
- ,2': Geringer Befund; eine Veränderung des Bauteils hat in geringem Ausmaß begonnen;

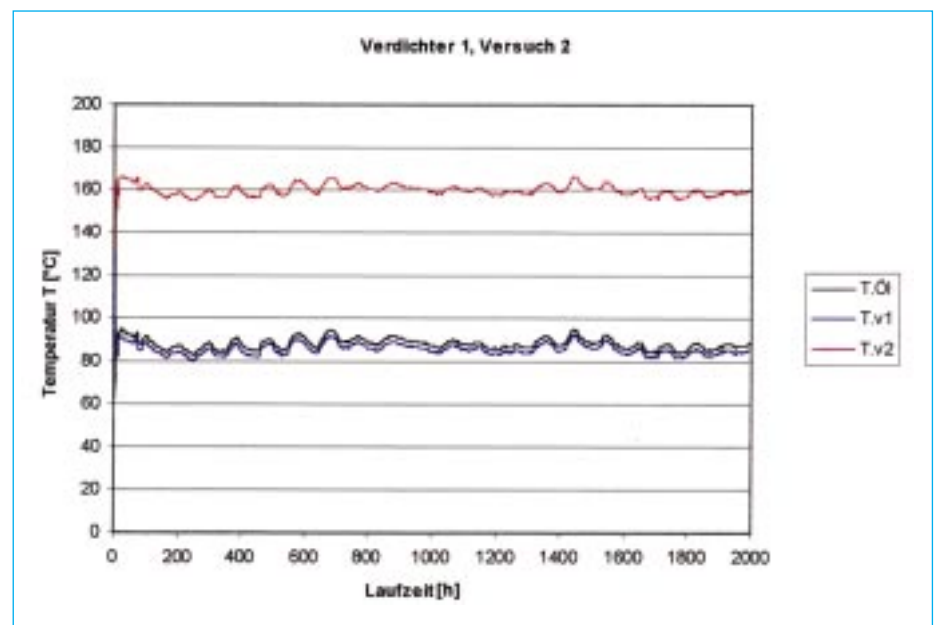


Bild 3 Temperaturverläufe des Gaskreislaufes II/1 mit Propen – PAG

,3': Normaler Befund; die Veränderungen können als normal toleriert werden;
 ,4': Die Veränderungen des Bauteils durch Verschleiß, Ablagerungen oder Korrosion beginnen die Funktion des Bauteils zu beeinträchtigen;
 ,5': Ein umfangreicher Befund läßt Störungen des ordnungsgemäßen Betriebes des Verdichters erwarten;
 ,6': Nicht akzeptabler Befund; der störungsfreie Betrieb des Verdichters ist nicht mehr gewährleistet;
 ,-' : Keine Bewertung wurde für die Bauteile vorgenommen, für die das jeweilige Kriterium nicht zu erwarten ist, so z. B. Verschleiß an Gehäuseteilen oder am Kolbenkopf.

Die Bewertungen der Einzelteile wurden für jedes Kriterium zu einer Gesamtbeurteilung zusammengefaßt, anhand derer die Gesamtbewertung des Verdichters vorgenommen wurde.

Kupferplattierung und Korrosion

An keinem der Verdichter waren Zeichen von Kupferplattierung oder Korrosion zu erkennen. Ursächlich für die Entstehung von Kupferplattierung und auch Korrosion ist die Bildung von Säuren im Kältemittelkreislauf als Reaktionsprodukt der Arbeitsstoffe Kältemittel oder Kältemaschinenöl mit im Kreislauf verbliebenem Wasser (z. B. durch Hydrolyse oder thermische/oxidative Zersetzung). Eine solche Säurebildung ist für Propen, wie für Kohlenwasserstoff-Kältemittel im allgemeinen, nicht zu erwarten. Auch die untersuchten Kältemaschinenölytypen Mineralöl und Alkylbenzol neigen unter den Bedingungen im Kältemittelkreislauf nicht zur Zersetzung.

Schlamm- und Lackbildung

Hinsichtlich Schlamm- und Lackbildung zeigten jeweils die vier Verdichter einer Versuchsreihe für die überwiegende Zahl der Bauteile ein sehr ähnliches Bild. Grundsätzlich traten Schlamm- und Lackbildung erwartungsgemäß nur an den mechanisch und thermisch hoch belasteten Bauteilen auf. Eine Schlamm- und Lackbildung wurde nur in geringem bis normalem Umfang an einigen Lagerstellen, wie den Kolbenbolzenlagern und den Pleuellagern,

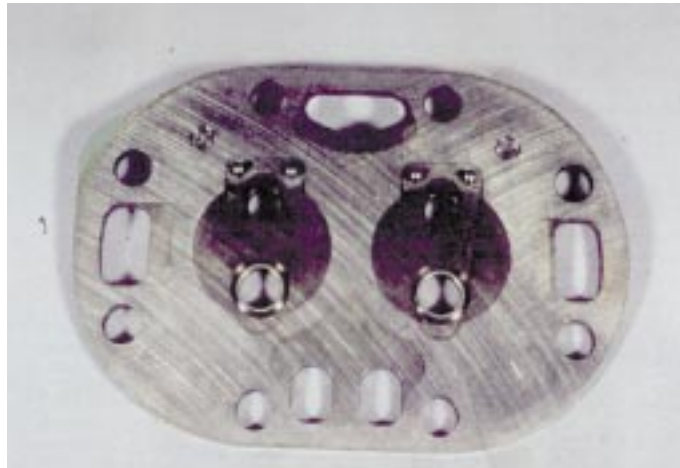


Bild 4 Ventilplatte Kolbenseite, Verdichter II/1 mit Propen - PAG



Bild 5 Pleuel 1 und Kolbenbolzen 1 von Verdichter I/1

und an den Ventilen, speziell den Druckventilen, festgestellt. Ein Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen war in bezug auf die Lackbildung im Bereich der Ventilplatte, der Saug- und Druckventile sowie den Kolbenbolzen- und Pleuellagern festzustellen. Die Lackbildung war nach dem Betrieb mit den PAG-Ölen gegenüber dem Mineralöl- bzw. Alkylbenzol-Betrieb etwas erhöht, erbrachte jedoch auch hier einen normalen Befund. Beispielhaft ist in Bild 4 die Kolbenseite einer der Ventilplatten abgebildet.

Verschleiß

Die mechanisch beanspruchten Bauteile der acht untersuchten Verdichter zeigten grundsätzlich ein geringes bis ein dem Dauerlaufbetrieb entsprechendes normales Verschleißbild. Die Lager aller Verdichter wiesen ein normales bis geringes Verschleißbild auf. An den Kurbelwellen der Verdichter waren bis auf wenige Verschleißspuren keine Betriebseinflüsse zu erkennen, wobei die Versuchsreihe II tendenziell einen geringeren Befund erbrachte. Unterschiede der vier Verdichter der

Versuchsreihe I traten an den Kolbenhemden, den Kolbenbolzen und Kolbenbolzenlagern sowie den kleinen Pleuellagern auf. Während diese Bauteile bei Verdichter Nr. I/2 und Verdichter Nr. I/3 einen geringen Befund zeigten, wurden bei Verdichter Nr. I/1 und Verdichter Nr. I/4 auffälligere Spuren von Verschleiß und Schlamm- und Lackbildung an den Kolbenbolzen, Kolbenbolzenlagern und den kleinen Pleuellagern festgestellt. Die Kolben dieser beiden Verdichter zeigten am Kolbenhemd einseitige Reibspuren. Die deutlicheren Betriebseinflüsse bei den Verdichtern Nr. I/1 und Nr. I/4 sind aber auch als normal zu bewerten. Als Beispiel ist in Bild 5 ein Pleuel mit Kolbenbolzen des Verdichters Nr. I/1 abgebildet. Solche Unterschiede waren in Versuchsreihe II lediglich für die Axialagerteile zu erkennen. Für beide PAG-Öle zeigte sich hier jeweils bei einem der zwei untersuchten Verdichter (Nr. II/2

und Nr. II/4) ein als normal zu bewertendes, jedoch deutlicheres Verschleißbild als im jeweiligen Parallelversuch, bei dem kein bzw. nur in Spuren Verschleiß festzustellen war.

Ergebnis der Maschinenversuche

Die Versuchsreihe I erbrachte für die vier Verdichter entsprechend dem vorgenommenen Bewertungsschema Gesamtbeurteilungen von 1–2 und 2–3, die Gesamtbeurteilungen der Versuchsreihe II wurden mit 2–3 festgehalten. Die untersuchten Öle haben im ungebrauchten Zustand eine klare weiße Farbe. Nach dem Betrieb waren das Mineralöl und das Alkylbenzol von klarer hellgelber, die PAG-Öle von klarer schwarzbrauner Farbe. Im Öl befanden sich keinerlei Partikel, die auf eine Verschmutzung hindeuteten. Der Ölgeruch war in allen Fällen stark propenüberlagert.

Laboruntersuchungen

Im Anschluß an die Maschinenversuche wurden die chemisch-physikalischen und tribologischen Eigenschaften der gebrauchten Öle untersucht. Das Propen wurde gaschromatographisch analysiert. Sowohl je eine Neuölprobe als auch eine Probe des Propen wurden als Vergleich herangezogen.

Die ermittelten Ölkenndaten Viskosität, Wassergehalt, Neutralisationszahl (NZ) sowie die im Öl gelösten Metalle oder Verunreinigungen (durch Atomabsorptionsspektrometrie, AAS, ermittelt) sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Diese lassen keine signifikanten, die Funktion des Öles negativ beeinflussenden Eigenschaftsveränderungen erkennen. Für Versuchsreihe II konnten im Gegensatz zu Versuchsreihe I im Öl gelöste Metalle oder Verunreinigungen nachgewiesen werden. Dies läßt sich zum einen durch den erhöhten Wassergehalt der Öle begründen. Zum anderen handelt es sich bei den Polyalkylenglykolen um polare Schmierstoffe mit einer hohen Reinigungswirkung. Diese beiden Phänomene könnten dafür verantwortlich sein, daß sich im gebrauchten Schmierstoff gelöste Metalle oder Verunreinigungen wiederfinden. In die Tabelle 3 sind die mittleren Freßlasten der Öle in der Almen-Wieland-Prüfmaschine aufgenommen worden. Bei den Mineralölen aus Versuchslauf I ist zu erkennen, daß sich das

	Wasser	Visk. 20 °C	Visk. 40 °C	NZ	AAS Cu	AAS Fe	ASS Al	mittl. FL Almen-Wieland
	ppm	mm ² /s	mm ² /s	mg KOH/g Öl	ppm	ppm	ppm	kN
Shell G 68 – neu –	25	250,1	64,7	<0,01	n. n.	n. n.	n. n.	1,85
– Verd. I/1	26	248,4	64,4	0,01	n. n.	n. n.	n. n.	1,56
– Verd. I/2	28	241,2	62,4	0,02	n. n.	n. n.	n. n.	
Fuchs RENISO SP 68 – neu –	42	288,9	66,4	<0,01	n. n.	n. n.	n. n.	3,30
– Verd. II/3	41	286,0	66,3	0,01	n. n.	n. n.	n. n.	1,49
– Verd. II/4	51	285,7	66,2	0,01	n. n.	n. n.	n. n.	
Shell Clavus SG 68 – neu-	215			< 0,01	–	–	–	8,31
– Verd. II/1	462	188,5	71,7	0,01	6,4	15,6	8	8,06
– Verd. II/2	452	192,3	73,7	0,02	8,7	15,9	4	
Fuchs RENISO – PGP 70 – neu-	310			< 0,01	–	–	–	6,37
– Verd. III/3	283	194,4	73,7	< 0,01	2,9	5,5	4	6,47
– Verd. III/4	374	195,7	74,7	< 0,01	7,3	10,7	2	

Tabelle 3 Ölkenndaten

tribotechnische Verhalten geringfügig verschlechtert hat. Bei Clavus G68 ist nur ein geringer Abfall der Freßlast zu sehen (von 1,85 kN auf 1,56 kN). Bei RENISO SP68 tritt ein deutlicher Abfall der Freßlast durch die 2000-h-Versuche ein (von 3,3 kN auf 1,49 kN). Die Freßlast des gebrauchten Alkylbenzolöles liegt im Bereich der gebrauchten Mineralöle. Die Freßlasten der PAG-Öle sind erheblich höher als bei den im ersten Dauerlauf untersuchten Mineralöl bzw. dem Alkybenzolöl. Die Gebrauchtöle zeigen ein nur geringfügig schlechteres Verhalten als die Frischöle.

Am Kältemittel Propen konnten in keinem Fall Veränderungen nachgewiesen werden. Sowohl in der frischen Propenprobe als auch in den Proben aus den Kreisläufen fanden sich die gleichen Verunreinigungen Luft, Ethan, Propan, Isopentan und Pentan.

Zusammenfassung

Das Stabilitätsverhalten des Kohlenwasserstoff-Kältemittels Propen wurde am FKW im Betrieb mit vier Kältemaschinenölen mittels Dauerlaufversuchen in Gaskreisläufen untersucht. Die visuelle Beurteilung der Verdichterbauteile ergab weder Zeichen von Kupferplattierung noch Zeichen von Korrosion. Schlamm- bildung, Lackbildung und Verschleiß fanden sich vorwiegend in geringem Ausmaß.

Auch deutlichere Beeinträchtigungen der stärker beanspruchten Bauteile der Verdichter, der Lager, Kolben, Kolbenbolzen, Pleuel und Ventile gingen in keinem Fall über ein normales, akzeptables Maß hinaus. Die Laboruntersuchungen der in den Maschinenversuchen gebrauchten Kältemittel und Kältemaschinenöle erbrachten ebenfalls gute Ergebnisse, so daß sich die chemisch-thermische Stabilität von Propen im Betrieb mit dem untersuchten löslichen Mineralöl und dem Alkylbenzolöl sowie den teillöslichen Polyalkylen-Schmierstoffen bestätigt hat. □

Literatur

- [1] Stabilität von Kohlenwasserstoffen im Kältemittelkreislauf, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10 927, Forschungsrat Kältetechnik e. V., Frankfurt 1999
 - Heft 1: Physikalische Eigenschaften von Kohlenwasserstoff-Öl-Gemischen, Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Dresden
 - Heft 2: Chemisch-physikalische und tribotechnische Eigenschaften von Kohlenwasserstoff-Öl-Gemischen, Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Dresden
 - Heft 3: Maschinenversuche, Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover
- Das Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 10 927) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.