



Dr. Hans O. Spauschus (rechts), Präsident des Forschungs- und Entwicklungszentrums Spauschus Associates, Inc. in Stockbridge, Georgia (USA) und Dr.-Ing. Ullrich Hesse (links), Senior Associate im Spauschus-Institut. Diese Aufnahme entstand während der IIR-Konferenz B 2 vom 10.–13. 5. 1994 in Hannover.

Nicht kondensierbare Gase sind in einer Kälteanlage unerwünscht. Neben Luft oder Stickstoff aufgrund ungenügenden Evakuierens oder einer Leckage bei saugseitigem Unterdruck kann es sich bei den nicht kondensierbaren Gasen auch um Reaktionsprodukte aufgrund von Instabilitäten handeln. Gelingt es geringe Mengen frühzeitig zu selektieren und deren Vorhandensein zu signalisieren, können rechtzeitig Maßnahmen eingeleitet werden, um umfangreiche Folgeschäden zu vermeiden. Ein einfacher Monitor, der diese Funktion erfüllt, ist entwickelt und untersucht worden. Das frühzeitige Identifizieren von Reaktionsprodukten ist in Versuchen an stationären Anlagen nachgewiesen worden. Darüber hinaus wurde der Monitor erfolgreich als Diagnosegerät an Automobil-Klimaanlagen eingesetzt. Die Ergebnisse werden vorgestellt.

* Als Vortrag von Dr.-Ing. Ullrich Hesse gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klimatagung 1996 des DKV vom 20.–22. 11. 1996 in Leipzig.

Ein Monitor für Kälteanlagen*

Ullrich Hesse und Hans Spauschus, Atlanta

Einleitung

In dem Kreislauf einer Kompressionskälteanlage kommt das Kältemittel mit verschiedenen Materialien wie Metallen, Elastomeren, Wicklungslacken und dem Kältemaschinenöl in Kontakt. Es ist über die Betriebsdauer zum Teil hohen Temperaturen und Drucklagen ausgesetzt. Zusätzlich können Verunreinigungen, Feuchte oder Luft im Kreislauf vorhanden sein. Damit kann es zu unerwünschten thermisch/chemischen Reaktionen innerhalb des Kältemittel-Kreislaufs kommen.

Meist sind derartige Zersetzungen mit dem Entstehen nicht kondensierbarer Gase verbunden. Gelingt es frühzeitig bereits geringe Mengen dieser Gase zu dedektieren, kann eine Warnung erfolgen, bevor Leistungseinbußen und größere Folgeschäden auftreten. Aus der Zusammensetzung der Gase kann auf das vorliegende Problem geschlossen werden. Eine Aufstellung möglicher Probleme und der möglicherweise entstehenden Gase ist in *Tabelle 1* gezeigt.

Die Idee für einen „Monitor“, der diese Funktion erfüllt, ist bereits vor einiger Zeit veröffentlicht worden [1, 2]. Das Risiko des Auftretens nicht kondensierbarer Gase ist in Kälteanlagen, die auf Ersatzkältemittel umgerüstet wurden, besonders hoch. Die Notwendig-

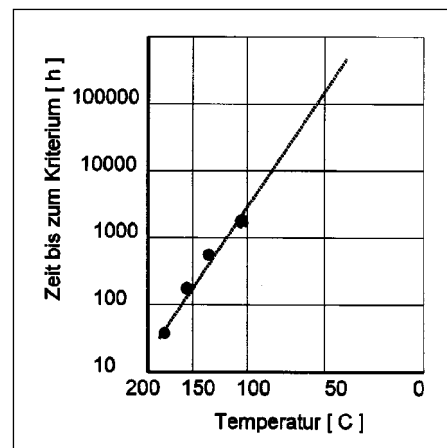


Abb. 1 Diagramm zur Bestimmung der voraussichtlichen Lebensdauer als Funktion der Temperatur.

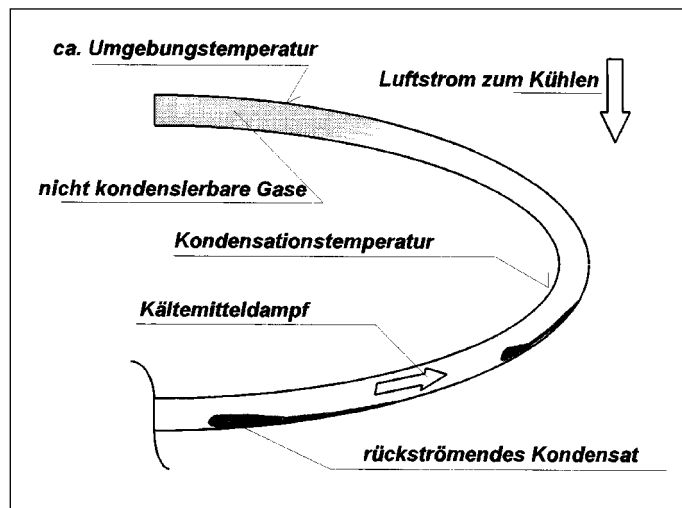
keit, Kälteanlagen von FCKW-Kältemitteln wie R 12 oder R 502 auf Ersatzkältemittel und Ersatzschmierstoffe umzustellen besteht jedoch aufgrund der gesetzlichen Vorgaben und der begrenzten Verfügbarkeit der FCKW-Kältemittel bzw. deren hohen Preis. Das erhöhte Risiko unerwünschter Reaktionen in einer umgerüsteten Kälteanlage und damit des Auftretens von nicht kondensierbaren Gasen beruht auf den im Kreislauf noch vorhandenen Restmengen an FCKW-Kältemittel und den zugehörig-

Tabelle 1:	
Problem	Zusammensetzung der nicht kondensierbaren Gase
unvollständiges Evakuieren	Luft, N ₂ , Argon, ..
Leckage auf der Niederdruckseite bei Unterdruck	Luft, N ₂ , Argon, ..
Motor / Verdichter Stress:	
Motor Isolierung	CO, CO ₂ , N ₂ , ..
Schmierstoff	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ or CO and CO ₂ ..
Schmierstoff / Lager	H ₂ ..
Kältemittelersetzung	CO ₂ , HCl, HF ..

gen Schmierstoffen. Beide müssen als zusätzliche Verunreinigungen angesehen werden. Darüber hinaus sind die im bestehenden Kreislauf verwendeten Materialien zum Teil nicht mit den neuen Schmierstoffen und Kältemitteln ausreichend verträglich.

Vorbeugende Untersuchungen zur Verträglichkeit mit der neuen Kältemittel/Öl-Kombination können aufwendig sein. Für die Umstellung von mehreren bestehenden Anlagen bei einem Betreiber mit einem spezifischen Anwendungsfall mußten ca. 100 unterschiedliche verwendete Materialien mit vier in Frage kommenden Schmierstoffen untersucht werden. Dazu wurden zunächst Sealed Tube Tests unter quasi Standardbedingungen (14 Tage, 175 °C) durchgeführt. Für die Untersuchung wurde reines R 134a, sowie mit Restmineralöl, Rest-R 12 und Feuchte gezielt verunreinigtes R 134a verwendet. Als Vergleichsgröße wurden die Tests auch mit R 12/Mineralöl durchgeführt. Nach Eingrenzung des geeigneten POE wurden die verbliebenen kritischen Materialien, die den Sealed Tube Test auch mit diesem am besten geeigneten Schmierstoff nicht bestanden hatten, einer „Rate Study“ zum Ermitteln der zu erwartenden Lebensdauer unterzogen. Dabei wurde Testdauer oder Feuchtegehalt variiert. Die Ergebnisse solcher Rate Studies sind in Diagrammen wie *Abb. 1* darstellbar, wobei z. B. Säurezahl (TAN) oder die Zeit bis zu dem Eintreten eines Ereignisses, das die Instabilität signalisiert, aufgetragen wird. Auf der Grundlage solcher Un-

Abb. 2 Abscheiden von nicht kondensierbaren Gasen aus dem Kältemittel in einer Standrohrspirale.



tersuchungen sind dann z. B. auch die Zeitwechselintervalle zum Austausch des Trockners vorausbestimmbar. Der Aufwand für diese Untersuchungen ist jedoch erheblich und nur zu rechtfertigen, wenn aufwendige, teure Anlagen, größere Serien, oder Anlagen für kritische Einsatzfälle umgerüstet werden sollen. Dennoch bleiben die Ergebnisse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Für die Bestimmung der Lebensdauer muß auf die jeweiligen Betriebsbedingungen extrapoliert werden und die exakte Situation in der Anlage und deren „Historie“ sind oft unsicher. Unter diesen Voraussetzungen besteht zusätzlicher Bedarf an einem Monitor, der mögliche Schäden insbesondere bei aufwendigen und teuren Anlagen nach einer Retrofit-Prozedur frühzeitig erkennen läßt.

Ansatz

Standrohre oder Standrohrspiralen können verwendet werden, um nicht kondensierbare Gase abzuscheiden. *Abb. 2* zeigt eine Prinzipskizze. Ein solches Standrohr bzw. Standrohrspirale kann in der Druckgasleitung eingebaut und durch Umgebungsluft gekühlt werden. Überhitzter Kältemitteldampf steigt auf, wird auf Sättigungstemperatur gekühlt, kondensiert und fließt im Gegenstrom zurück zur Druckgasleitung. Wegen des guten Wärmeübergangs bei der Kondensation und des schlechten Wärmeübergangs auf der Luftseite stellt sich als Wandtemperatur in guter Näherung die Kondensationstemperatur ein. Erst wenn nicht kondensierbare Gase mit dem Kältemittel in das Standrohr gelangen, die mit dem Kondensat nicht

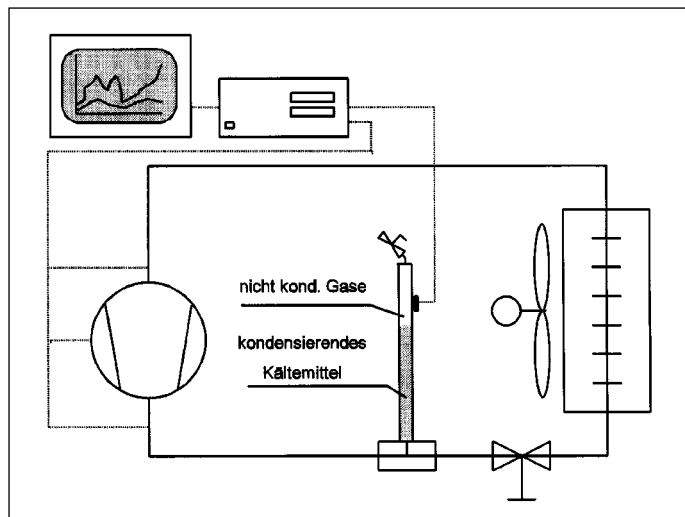


Abb. 3 Gaskreislauf.

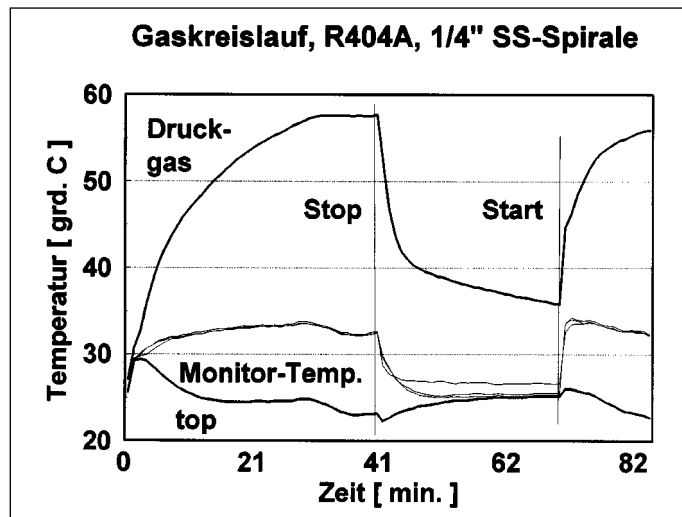


Abb. 4 Temperaturverlauf (Temperatur am Monitor ca. auf Umgebungstemperatur).

wieder abfließen und sich daher anreichern fehlt der „heat pipe Effekt“ und die Wandtemperatur sinkt auf etwa Umgebungstemperatur ab. Das Prinzip wurde mit unterschiedlichen geometrischen Anordnungen erprobt. Ein einfacher Gaskreislauf entsprechend dem Schema in Abb. 3 wurde zur Erprobung verwendet. Erwartungsgemäß wurden nicht kondensierbare Gase, die in den Kältemittelkreislauf eingebracht worden waren, abgeschieden und deren Vorhandensein konnte durch Abnahme der Temperatur auf etwa Umgebungstemperatur im oberen Bereich des Standrohres signalisiert werden. Abhängig von der Gestalt des Standrohres ergab sich bei wechselnden Betriebsbedingungen (wechselnde Drucklage; Start/Stop) oder hoher Druckgastemperatur eine mehr oder weniger stabile Abscheidung.

Abb. 4 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf. Das Abscheiden von nicht kondensierbaren Gasen ist durch die Differenz zwischen den Wandtemperaturen im unteren Bereich des Standrohres, die etwa Sättigungstemperatur aufweisen, und der niedrigeren Temperatur am oberen Ende des Standrohres signalisiert.

Erprobung des Konzeptes an einer stationären Kälteanlage

Die Funktion wurde an einer stationären Kälteanlage mit vollständiger Verflüssigung und Verdampfung überprüft. Abb. 5 zeigt das Konzept der Anlage. Sie war mit einem Kältemittelsammler in der Flüssigkeitsleitung ausgestattet, der zunächst als kritisch für das Passieren der nicht kondensierbaren Gase angesehen werden mußte. Das Monitorrohr war im Bypass zu der Druckleitung installiert. Eine Kapillare begrenzte den Massenstrom. Ein Vorkühler wurde zur Teilverflüssigung verwendet. Als Probengase wurden dem Kältemittel geringe Mengen CO₂ und Stickstoff zugegeben. In Abb. 6 ist die Abscheidung als Funktion der Betriebszeit aus dem Verlauf der Temperaturen, die an 10 Positionen über die Länge des Standrohres verteilt gemessen wurde, zu erkennen. Während die Temperaturen zunächst einheitlich gleich der Sättigungstemperatur sind, nehmen die Temperaturen im oberen Bereich des Standrohres mit der Betriebszeit ab. Die Abscheidung der Gase wurde von dem hierfür entwickelten Controller erkannt, angezeigt und bei

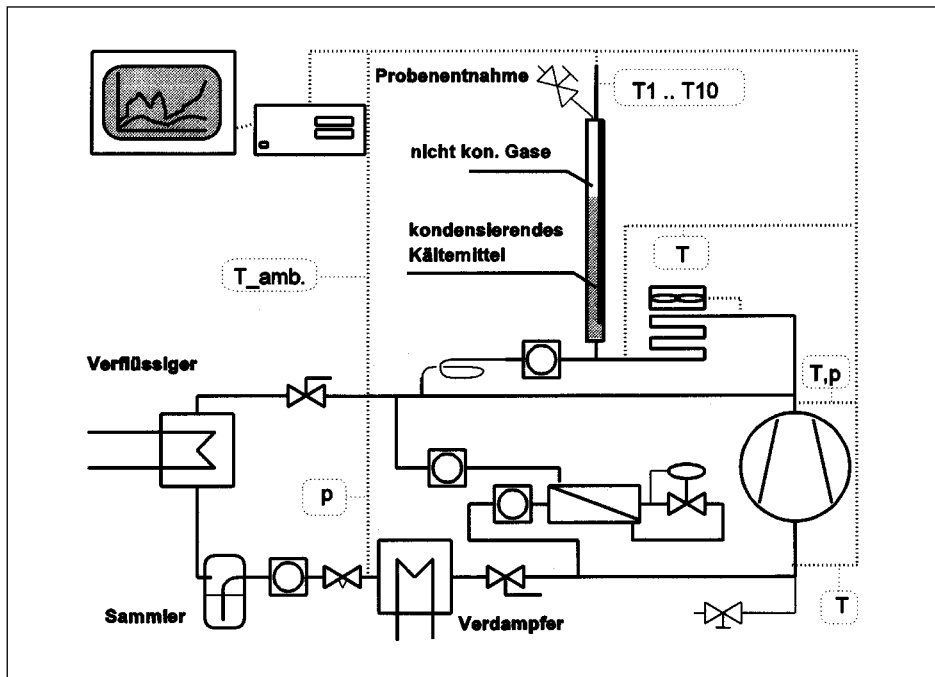


Abb. 5 Testkreislauf mit vollständiger Verflüssigung und Flüssigkeitssammler.

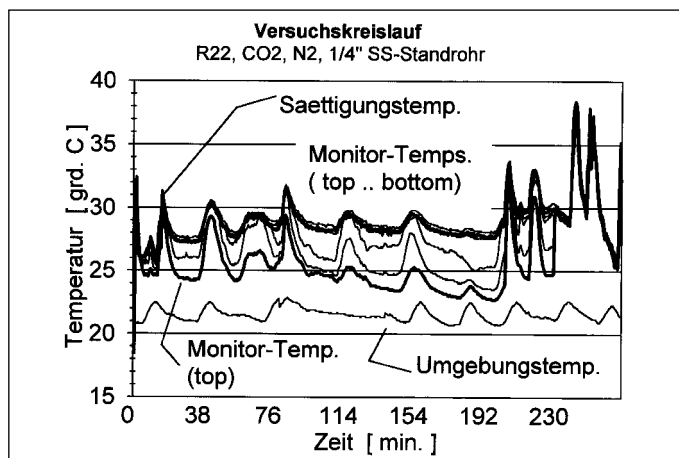
Überschreiten eines Grenzwertes signalisiert. Versuche mit verschiedenen Kältemitteln ergaben eine zuverlässige Funktion mit Reinstoffkältemitteln, azeotropen Kältemitteln und mit einigen nahezu azeotropen Kältemitteln wie R 404A. Bei zeotropen Gemischen wie R 134a/R 32 oder R 407C ergab sich dagegen eine Anreicherung der tiefer siedenden Komponente (R 32) deutlich über das einfache Phasengleichgewicht hinaus. Diese extreme Anreicherung ist mit einem Rektifikationseffekt zwischen aufsteigendem Dampf und rückfließendem Kondensat zu erklären. Es sollte untersucht werden, inwieweit sich möglicherweise Konsequenzen

aus diesem Effekt für die Konzeption von Kälteanlagen mit diesen zeotropen R 32-haltigen Gemischen ableiten. Bei zeitweise nicht von Kältemittel durchströmten Steigleitungen sind entsprechende Effekte denkbar. Anreicherung von R 32 bis zu brennbaren Konzentrationen bei dem Einsatz von R 32-haltigen Gemischen könnten sich ergeben.

Dauerlaufversuche im Gaskreislauf mit R 22/POE und R 134a/POE

Die Funktion des Abscheidens, Erkennens und Signalisierens von während der Betriebszeit durch thermisch/chemische Instabilität hervorgerufene Fremdgase wurde an einem Gaskreis-

Abb. 6 Temperaturverlauf während der Abscheidung am Versuchskreislauf (Probenentnahme nach ca. 230 min).



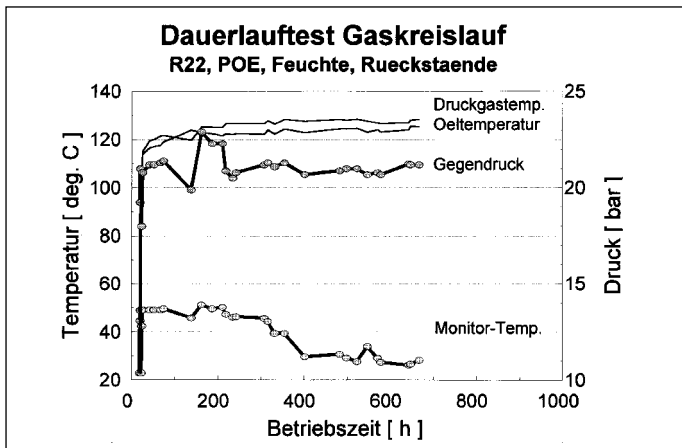


Abb. 7 Dauerlaufversuch mit R 22 und POE.

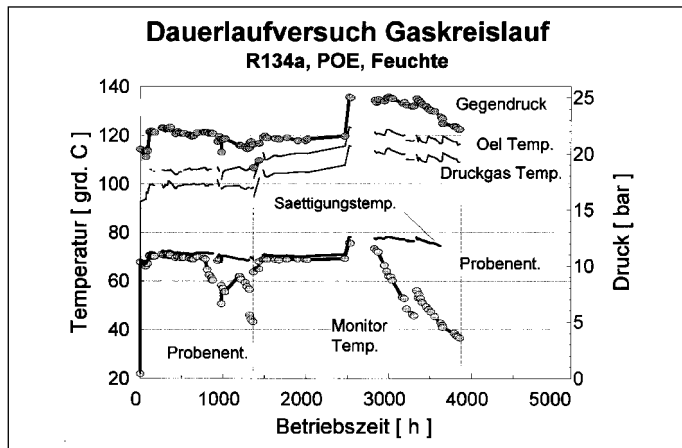


Abb. 8 Dauerlaufversuch mit R 134a und POE.

lauf entsprechend dem in Abb. 3 dargestellten Schema untersucht. Es wurde ein hermetischer Verdichter mit R 22 und POE eingesetzt. Der Verdichter war in vorherigen Versuchen mit verschiedenen Kältemitteln betrieben worden. Restmengen Mineralöl und Feuchte waren vorhanden. Ein Kältemittelrockner wurde gezielt nicht eingesetzt. Stabilitätsprobleme konnten daher erwartet werden. Als Monitorrohr wurde ein 1/4" (ca. 6 mm) Edelstahl-Standrohr von ca. 400 mm Länge verwendet.

Abb. 7 zeigt den Temperatur- und Druckverlauf während des Testzeitraums. Über die ersten 300 h folgt die Temperatur am Standrohr, die ca. 100 mm unterhalb des oberen Endes gemessen wurde, der zum Gegendruck gehörenden Sättigungstemperatur (nicht dargestellt). Dann erfolgt der Abfall auf ca. Umgebungstemperatur. Nach ca. 700 h wurden Gasproben aus dem Standrohr und dem zirkulierenden Kältemittel entnommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Probe aus dem umlaufenden Kältemittel enthält lediglich Luft, die vermutlich bei der Probenentnahme eingedrungen ist. Dagegen weist die Probe aus dem Monitor eindeutig Zersetzungsprodukte wie CO₂, CO oder H₂ auf. Die nachgewiesene Menge an R 32 kann aus Restmengen von den vorherigen Versuchen mit R 32-haltigen Gemischen oder aber aus der Umsetzung von R 22 resultieren. Die Öl-analyse wies Zersetzungsprodukte aus POE nach.

Die Versuche wurden mit R 134a und einem neuen Verdichter in einem neu erstellten Kreislauf ohne Verunreinigungen wiederholt. Es wurden 1000

ppm Feuchte zugegeben. Nach ca. 1000 Betriebsstunden fiel die Monitor-temperatur, gemessen ca. 25 mm un-

weitere Gasprobe wurde nach ca. 4000 h entnommen (Tabelle 3). Es zeigten sich in beiden Proben jeweils

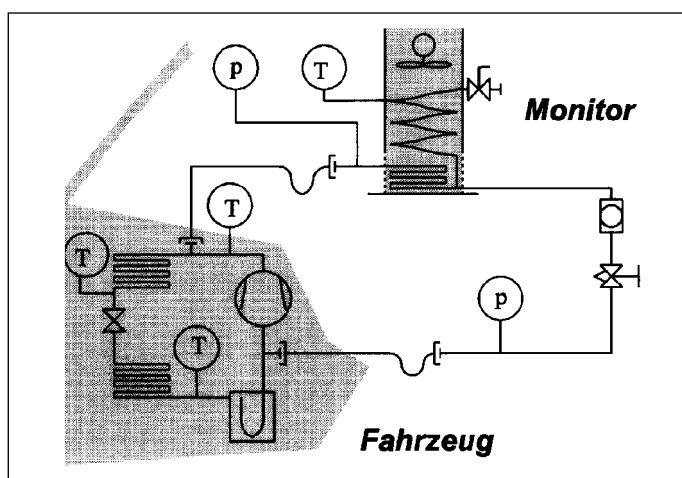
Tabelle 2:
Dauerlaufversuch mit R22, POE, Feuchte und anderen Verunreinigungen (GC-Analyse)

gas	" air "	CO ₂	R32	R 22	H ₂	O ₂	N ₂	CO
Probe des umlaufenden Kältemittels:								
area	446	-	-	42645	-	1028	3791	-
Probe aus dem Monitor:								
area	14653	16421	5581	436899	200	422	3988	12206
100.00%								
	3.09%	3.47%	1.18%	92.26%	0.04%	0.08%	0.73%	2.25%

terhalb des oberen Endes, erstmalig ab (Abb. 8). Nach ca. 1400 h wurde eine erste Gasprobe entnommen. Eine

die gleichen Zersetzungsprodukte, die auf Reaktion von Ester aus Schmierstoff oder Motorwicklung hindeuteten.

Abb. 9 Monitor zur Diagnose an einer Automobil-Klimaanlage.



Das Öl wurde analysiert und der Verdichter wurde zerlegt. Die Ionenchromatography ließ keine Zersetzung des Öls erkennen. Die erwarteten C₅-Ionen fehlten. Kunststoff, der zur Isolierung der Motorwicklung eingesetzt war, war dagegen deutlich versprödet.

Erprobung als Diagnosegerät in Automobil-Klimaanlagen

Eine weitere mögliche Anwendung für den Monitor ist im Automobilklimabereich gegeben. Ein gewisser Prozentsatz der Fahrzeuge kommt mit nicht funktionierender Klimaanlage in den Service, an der kein Fehler festgestellt werden kann, die aber nach Absaugen des Kältemittels, Evakuieren und Wiederbefüllen ohne weitere Reparatur wieder funktioniert. Der Monitor kann hier eingesetzt werden, um Restluft aufgrund unvollständigen Evakuierens, Kältemittelverunreinigung oder Öl/Kältemittel-Instabilität zu erkennen.

Abb. 9 zeigt schematisch die für den Versuch verwendete Schaltung und die Position der zusätzlich verwendeten Temperatur- und Drucksensoren. Bereits nach wenigen Minuten Testbetrieb an einem Fahrzeug mit Funktionsstörung der Klimaanlage (Abb. 10) wurde das Vorhandensein von Fremdgasen signalisiert. Die Analyse einer Gasprobe aus dem Monitor ergab einen Massenanteil von 16,7 %, R 22 im R 12, das in einer Probe aus dem umlaufenden Kältemittel nicht nachgewiesen werden konnte. Das Vorhandensein von R 22 deutete auf ein Stabilitätsproblem des Systems mit R 12/Mineralöl hin, was sich bei weiterer Untersuchung bestätigte.

Schlußfolgerung

Ein Monitor basierend auf dem Konzept eines Standrohres kann verwendet werden, um in einem Kältemittelkreislauf vorhandene Fremdgase abzuscheiden und deren Vorhandensein zu signalisieren. Das Verfahren kann für Reinstoffkältemittel, Azeotrope sowie einige nahezu azeotrope Kältemittel wie R 404A benutzt werden. Bei Anlagen mit deutlich zeotropen Kältemittelgemischen wie R 407C ist die Anwendung nicht möglich. Instabilitäten können erkannt werden, bevor erhebliche Schäden auftreten und die Anlage ausfällt. Der Prototyp eines solchen

Tabelle 3: Dauerlaufversuch mit R134a, POE und 1000 ppm Feuchte (GC-Analyse)							
Probe aus dem Monitor:							
gas	" air "	CO ₂	R 134a	H ₂	O ₂	N ₂	CO
area	61902	31635	1442191	1368	1344	49330	1967
	100.00%			4.03 %			
	4.03 %	2.06 %	93.91 %	0.10 %	0.10 %	3.68 %	0.15 %

Abb. 10 Einsatz des Monitors zur Diagnose an einer Automobil-Klimaanlage.

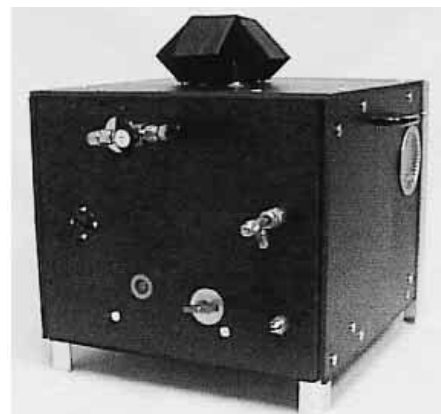


Abb. 11 Prototyp des Monitors bestehend aus Abscheide-Einheit und Controller.

Monitors bestehend aus Abscheider-Einheit und Controller (Abb. 11) ist erstellt und erprobt worden. Der Monitor kann ferner zur Fehlerdiagnose z. B. bei Automobilklimaanlagen eingesetzt werden.

Quellenangabe

- [1] Spauschus, H. O. Monitor for vapor compression refrigeration systems. Proceedings of the XVIth Congress of Refrigeration, Paris, France, Volume B-2, p274-279, 1983.
- [2] Hans O. Spauschus, U. S. Patent 4,316,364. Vapor Compression Refrigerant System Monitor.