

## Verdichterschäden an Schraubenverdichtern

**Stichwörter:** Klimageräte; Kaltwassersatz; Schraubenverdichter;

**Streitpunkt:** Mehrere Verdichterausfälle in kurzer Zeit

### GUTACHTEN (Kurzfassung)

**Gegenstand der Untersuchung** ist die Ermittlung der Ausfallursachen von Schraubenverdichtern, die in Kaltwassersätzen eingebaut waren. Außerdem sollte die Eignung der eingesetzten Komponenten für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft werden.

**Anlass der Untersuchung** sind die relativ häufigen Ausfälle der eingesetzten Schraubenverdichter innerhalb von fünf Jahren.

**Fazit des Gutachtens:** Die Verdichterausfälle sind auf ungenügende Schmierung zurückzuführen. Die Ursachen dafür können zum einen in der Anlagenkonzeption, zum anderen in Schwachpunkten der Regelung liegen. Auch Mängel in der Verdichterkonstruktion werden nicht ausgeschlossen.

Die eingesetzten Komponenten sind grundsätzlich für den Anwendungsfall geeignet.

Das ausführliche Gutachten finden Sie umseitig.

# Verdichterschäden an Schraubenverdichtern

**Stichwörter:** Klimageräte; Schraubenverdichter; Kaltwassersatz

**Streitpunkt:** Mehrere Verdichterausfälle in kurzer Zeit

## G U T A C H T E N

### 1. Anlass des Gutachtens

Anlass des Gutachtens sind Schäden an 3 Schraubenverdichtern... , die in Klimageräten Fabrikat ....., eingebaut sind. Betreiber der Geräte ist die ....., wo sich die Geräte befinden.

### 2. Zweck des Gutachtens

Zweck des Gutachtens ist die Ermittlung der Schadensursachen und eine Überprüfung der Komponenten auf Eignung.

### 3. Auftragserteilung

Die Auftragserteilung erfolgte durch ....

### 4. Grundlagen des Gutachtens

Dem Gutachten liegen zugrunde:

- Die Feststellungen anlässlich des am ... abgehaltenen Ortstermins bei ... (Protokoll s. Anlage 1)
- „Krankenakte Kältemaschinen WDF03“, erstellt von .. (Anlage 2)
- Schadensbericht des Verdichterherstellers... (Anlage 3)
- Service-Manual des Klimagerätes ..., Anlagenschema und Geräteansicht s. Anlagen 4a und 4b
- Projektierungs-Handbuch des Verdichterherstellers...  
Auszüge hieraus: Technische Daten (Anlage 5), Einsatzgrenzen (Anlage 8),
- Messprotokolle der .... für die Zeit vom  
.. (tabellarische Zusammenstellung s. Anlage 6)
- Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes (Anlage 7)
- Ölanalyse der Fuchs Europa Schmierstoffe GmbH (Anlage 9)
- Verdampferberechnung: Slipčević, B. Wärmeübergang beim Sieden von R-Kältemitteln in horizontalen Rohren. Kältetechnik – Klimatisierung, 24, 345-351. Verlag C.F. Müller (Anlage 10)
- Auslegungsdaten für Elektrische Regelventile Alco Controls EX4 bis EX8 (Anlage 11)
- Produkt Informationen der Fuchs Europa Schmierstoffe, Reniso Triton SE 170 / R 134A-Gemisch (Anlagen 12a bis 12d)
- Stoffdaten für R 134a und R 407C (Programm der Solvay Fluor GmbH).

Rücksprache gehalten wurde u.a. mit verschiedenen Firmen/Personen:

Ein mit dem Verdichterhersteller ...vereinbarter Besuch zwecks Schadensklärung musste abgesagt werden, da sich die Firma dazu verweigerte. Das Verhalten ist unerklärlich und unerwartet.

## **5. Ortstermin vom ...**

Es sei auf das zugehörige Protokoll (Anlage 1) verwiesen. Hierin sind alle Einzelheiten und die in Erfahrung gebrachten Daten aufgeführt. Zugehörig sind vom Unterz. angefertigte Lichtbilder:

Lichtbild 1: Schaltschrank

Lichtbild 2: Technische Daten

Lichtbild 3: Verdichtergehäuse mit Magnetventilen der Leistungsregelung

Lichtbild 4: Verdichterunterteil mit Ölheizung

Lichtbild 5: Verdichtergehäuse mit LI-Anschluss

Lichtbild 6: Gerät Seitenansicht mit Verdichter und Anlaufschaltschrank

Lichtbild 7: Gerät-Vorderansicht mit den Verdichtern, Filtertrocknern und Pressostaten

Lichtbild 8: Verdampfer mit Kaltwasseranschluss

Lichtbild 9: Seitenansicht mit luftgekühlten Verflüssigern

Lichtbild 10: Driver neuen Typs

Lichtbild 11: Driver alten Typs,

sowie ... angefertigte Schadensbilder:

Lichtbild 12: Späne in Gehäuseinnern

Lichtbild 13: Defekte Schalen der Axiallager

Lichtbild 14: Defekte Hauptschraube

Lichtbild 15: Defekte Nebenschraube.

Materialproben von Schadensteilen, wie dies vom Unterz. vorgeschlagen wurde, konnten mangels Zurverfügungstellung nicht angefertigt werden.

## **6. Anlagenbeschreibung**

### **6.1 Allgemeines**

Die Anlage wurde am...in Betrieb genommen. Hersteller war die .... Installiert sind 4 auf dem Dach im Freien aufgestellte Geräte, ...

Die Geräte dienen zur Kälteversorgung des Rechenzentrums. Der statische ganzjährige Kältebedarf beträgt 1000 kW, die im Sommer zusätzlich abzuführende dynamische Last 300 kW. Jedes Gerät verfügt über 2 voneinander getrennte Kältekreisläufe mit jeweils eigenem Verdichter. Die Kälteleistung je Verdichter beträgt 325 kW, somit die Kälteleistung jedes Gerätes 650 kW.

Je 2 Geräte decken somit die Gesamtlast ab. 2 Geräte dienen als Reserve. Aus abzudeckender Last und Geräteleistung folgt, dass die Anlagen nahezu im Dauerbetrieb laufen.

Kältemittel ist R 134a. Ursprünglich war R 407C vorgesehen. Da die ... auf R 134a bestand, wurde kurzfristig umgestellt (die Betriebsunterlagen lauten jedoch sämtlich auf R 407C). Schmieröl ist BSE 170, ein Ester-Öl mit hohem Lösungsvermögen für R 134a. Hauptdaten des Verdichters gehen aus dem Datenblatt von Anlage 5 hervor. Das (theoretische) Fördervolumen bei 50 Hz beträgt 535 m<sup>3</sup>/h.

Wie aus dem Protokoll der Besichtigung zu entnehmen ist, traten schon gleich zu Beginn Schwierigkeiten auf. So musste eine Anlaufschaltung nachgerüstet werden, es fehlte Öl, das nachgefüllt wurde, dann wurde Öl abgelassen. Zudem wurde eine ungleiche Belastung der Kältekreise festgestellt (sogen. „Schieflast“), die vor allem im Sommer auftrat. Manches spricht dafür, dass die Geräte nicht ausgereift waren.

## 6.2 Funktion

Hierzu und zu den Komponenten sei wie folgt ausgeführt: Vom Prinzip her handelt sich um einfache, einstufige Kältekreisläufe. Gekühlt wird Kaltwasser von 16 auf 10°C, die Wärmeabgabe erfolgt über luftgekühlte Lamellenverflüssiger. Jeder Verdichter (in Anlage 4a, Pos. 1) ist mit einem eigenem Ölabscheider und einer Ölheizung (7) ausgestattet und verfügt über die 4 Leistungsstufen 25%, 50%, 75% und 100%. Aussagegemäß werden nur die Stufen ab 50%, tatsächlich aber die Stufen 25%, 50% und 100% (vgl. Lichtbild 3).

Das aus dem Verdampfer (21) angesaugte und verdichtete Kältemittel gelangt in den darüber angeordneten Verflüssiger (13). Die Verflüssigereinheiten sind mit jeweils eigenem stufenlos regelbarem Lüfter versehen (14), s. auch Anlage 4b, Draufsicht. Die Einspritzung in den Verdampfer erfolgt mittels elektronischem Expansionsventil, Fabr. Alco, Typ EX8 (20). Vor dem Expansionsventil befindet sich ein Magnetventil (18). Weiterhin sind vorhanden: Hoch- und Niederdruckschalter (2 und 3), Ölstandskontrolle (6), Manometer (8 und 9), Sicherheitsventile (12), Filtertrockner (17) sowie hier nicht extra genannte Bauteile.

Ein Economizer ist im Schema der Anlage 4a nicht eingetragen. Den Aussagen des Betreibers nach zu schließen, wird angenommen, es seien welche vorhanden. Dabei dürfte es sich jedoch um das am Economizeranschluss angeschlossene LI-System handeln (Liquid-Injection-System, s. Projektierungs-Handbuch Seite 26). Dieses dient zur Temperatursenkung bei hoher Verflüssigungs-, bzw. sehr niedriger Verdampfungstemperatur (was in Anbetracht der eher gemäßigten Betriebsbedingungen selten der Fall sein dürfte).

## 6.3 Wartung/Protokollierung

In Halbjahresabständen wurden von ... die Wartungen durchgeführt. Diese liegen als Protokolle dem Unterz. vor (mit Ausnahme derjenigen für ....). Die Hauptdaten sind tabellarisch als Anlagen 6 zusammengefasst. Sie bilden eine wesentliche Grundlage nachfolgender Untersuchungen. Die letzten Messungen mit Datum vom ... (Blatt 7 der Anlage 6) bleiben in der Schadensbewertung unberücksichtigt, da sie nach den letzten beiden Verdichterausfällen aufgenommen wurden.

## 7. Schadensereignisse

Der erste Verdichterschaden wurde am ... am Gerät 1, Verdichter 2, festgestellt. Der Verdichter wurde ausgetauscht. Ein Schadensbericht wurde von ... mit Datum vom ... erstellt (Anlage 3). Zerstörungen wurden u.a. an den Schrauben und den Lagern, ausgehend vom Hauptrotor-Axiallager, festgestellt. Die Ursache war nicht eindeutig auszumachen; die im Schadensbericht geäußerte Vermutung geht dahin, die Schaltfrequenz sei zu hoch gewesen. Da die Geräte jedoch so gut wie im Dauerbetrieb laufen, dürfte die Vermutung nicht zutreffen.

Der 2. Verdichterschaden betraf am .... den Verdichter 1 von Gerät 1. Ein Schadensbericht liegt nicht vor. Kurz danach, am ..., wurden am Verdichter 1 von Gerät 4 Geräusche festgestellt und der Verdichter außer Betrieb gesetzt. Gemäß Aufzeichnungen wurde der Öltest als „schlecht“ bezeichnet. Das Schadensbild dürfte dasselbe sein wie zuvor.

Da die letzten beiden Schäden in die kalte Jahreszeit fielen, lag die Vermutung nahe, dass hierin die allgemeine Ursache zu sehen sei. Dem stand jedoch entgegen, dass der 1. Schaden im ..., also in der warmen Jahreszeit, eintrat. Wie noch auszuführen ist, liegen jedoch verschiedene Ursachen vor.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Ausfall von 3 der insgesamt 8 Verdichter innerhalb von 5 Jahren außergewöhnlich hoch ist. In Anbetracht der günstigen Betriebsbedingungen, wie niedriges Druckverhältnis  $p_c/p_o$  (s. Anlagen 6) und nahezu Dauerbetrieb, dürfte normalerweise ein Schaden erstmals nach wesentlich längerer Zeit, etwa 10-15 Jahren, auftreten. Die hohe Ausfallquote deutet darauf hin, dass entweder Schwachstellen an den Verdichtern oder/und innerhalb der Kältekreise vorliegen.

## 8. Schadensursachen

### 8.1 Verdichterschäden

#### 8.1.1 Erster Verdichterschaden

Bezüglich des am ... aufgetretenen ersten Schadens (2. Verdichter des 1. Gerätes) werden die Messdaten vom ... herangezogen (Blatt 1 von Anlage 6). Hieraus folgt, dass die Druckgastemperatur viel zu niedrig war, sie lag nur 11 K über der Verflüssigungstemperatur ( $t_2 = 57^\circ\text{C}$  zu  $t_c = 46^\circ\text{C}$ ), anstatt um mindestens 20 K (s. Projektierungshandbuch SH-170-3, Kapitel 3, Seite 17). Die Druckgastemperatur hätte demgemäß mindestens  $66^\circ\text{C}$  betragen müssen. Die Übertemperatur gegenüber der Verflüssigungstemperatur war nur etwa halb so hoch wie gefordert. Dabei stellt lt. Projektierungshandbuch der untere Grenzwert der Druckgastemperatur von  $60^\circ\text{C}$  lediglich einen Anhaltswert dar. Die Übertemperatur am Druckstutzen war eindeutig zu niedrig; der Verdichterschaden ist mit großer Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen. Die Ursache dürfte in einer Fehleinstellung des Drivers des Expansionsventils zu suchen sein. Ein rechtszeitiges Umprogrammieren hätte den Schaden verhindert.

Die Auswirkungen auf die Schmierölverhältnisse gehen aus der Anlage 12a hervor. Sie stellen die Verhältnisse im Ölabscheider dar. Im Druck-Temperaturschaubild (unten) ist zu erkennen, dass bei dem Mindest-Sollwert von  $66^\circ\text{C}$  die Ölkonzentration 82% betragen hätte. Im Istfall von  $57^\circ\text{C}$  betrug sie jedoch nur 71%. Damit erhöhte sich die Kältemittelmenge im Öl auf nahezu das Doppelte, wie aus einer Konzentrationsbetrachtung folgt. Es reduziert sich die Viskosität von 12 auf  $6 \text{ mm}^2/\text{s}$ , d.h. auf die Hälfte (oberes

Diagramm). Weiterhin erhöhte sich die Flashgasmenge des auf die Niederdruckseite übertretenden Öles mit der Folge einer Ölverdrängung (Austrocknung der Lager).

Da gemäß Projektierungs-Handbuch S. 6, 3. Absatz von oben, die Lagerkammer mit einer Druckentlastung ausgestattet ist, ist davon auszugehen, dass das aus dem Ölabscheider in die Lagerkammer gelangende Öl-Kältemittelgemisch unter einem niedrigeren Druck (mit entsprechend niedrigerer Temperatur) steht als im Ölabscheider. Inwieweit damit eine Verbesserung der Schmierbedingungen verbunden ist, kann nicht beurteilt werden (wäre in Besprechung abzuklären gewesen). Jedenfalls spricht vieles dafür, dass die zu niedrige Druckgastemperatur die Schmierverhältnisse in einem Maße verschlechterten, dass dadurch die Drucklager zu Schaden kamen.

### 8.1.2 Zweiter und dritter Verdichterschaden

Der 2. und 3. Verdichterschaden lagen zeitlich nur wenige Tage auseinander, der Schaden im 1. Verdichter von Gerät 1 wurde am ... festgestellt, der Schaden am Verdichter 1 von Gerät 4 am .... Das Zusammenfallen der beiden Schäden in der Winterzeit dürfte die Vermutung belegen, dass ein direkter diesbezüglicher Zusammenhang besteht.

Als Ursachen kommen infrage:

#### a) Niedrige Außentemperatur

Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes für die fragliche Zeit (Anlage 7) zeigen, dass kurz zuvor zwei Frostperioden nennenswerten Ausmaßes auftraten, die erste vom ... mit einer Tiefsttemperatur von  $-10,7^{\circ}\text{C}$ , die zweite vom ... mit einer Tiefsttemperatur von  $-9,6^{\circ}\text{C}$ .

Die Messdaten ... zeigen, dass die Verdampfungstemperatur  $t_0$  des 1. Gerätes, Kreis 1,  $6,5^{\circ}\text{C}$  betrug. Am 4. Gerät, Kreis 1, betrug sie  $1^{\circ}\text{C}$ . Der Vergleich mit der zulässigen Einsatzgrenze (Seite 66 des Projektierungs-Handbuches) ergibt für das 1. Gerät den zulässigen Minimalwert von  $t_c$  zu  $31^{\circ}\text{C}$ , für das 4. Gerät zu  $27^{\circ}\text{C}$  (Anlage 8, oben bzw. unten).

Messwerte für Frosttemperaturen liegen nicht vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei den genannten Frostwerten die Kondensationstemperaturen unter die zulässigen Grenzwerte abfielen. Folgen waren ungenügende Druckverhältnisse für die Ölversorgung und damit die Verdichterausfälle.

#### b) Kondensatorregelung

Zur Ursachenfindung werden in der Anlage 6 die Verflüssigungstemperaturen ( $t_c$ ) mit den Außentemperaturen Werte (Temp. Kond. ein) verglichen. Der Übersichtlichkeit wegen erfolgt dies über die jeweiligen Mittelwerte. Das Ergebnis ist in nachstehende Tabelle 1 eingetragen.

Wie man sieht, ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Ein wie zu erwartender direkter Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der Kondensatortemperatur besteht nicht. Für niedrige Außentemperaturen ergeben sich hohe Kondensationstemperaturen, für hohe Außentemperaturen niedrige. Die Regelung erfolgt willkürlich. So beträgt z.B. bei einer Außentemperatur von  $3^{\circ}\text{C}$  die Kondensationstemperatur  $42^{\circ}\text{C}$  (Blatt Nr. 6), bei

einer solchen von 18°C dagegen nur 32°C (Blatt Nr. 5). Der Normalfall wäre genau umgekehrt gewesen. Die Regelung war fehlerhaft.

#### c) Verflüssigungstemperaturen

Aus den Daten für ..., 2. Gerät, Kreis 2 (Anlage 6, Blatt 5) geht hervor, dass bei der Verdampfungstemperatur von 2°C die Verflüssigungstemperatur 29,1°C betrug. Der zulässige Wert lag nur knapp darunter, nämlich bei 28°C. Es wurde somit ganz eng am Limit gefahren. Infolge üblicher Regelschwankungen konnte die zulässige Grenze ohne weiteres unterschritten werden. Die Folgen liegen auf der Hand.

Tabelle 1: Vergleich von Außentemperatur und Kondensationstemperatur

Anlage 6 Blatt Nr.	Temp.Kond.ein/°C (Außentemperatur)	t <sub>c</sub> /°C
1	12	45
2	16	37
3	14	41
4	13	40
5	18	32
6	3	42
7	22	38

#### d) Übertemperatur Druckgas-, Verflüssigungstemperatur

Aus den Messwerten lässt sich weiterhin zeigen, dass außer den vorgenannten Fällen auch sonst die geforderte Übertemperatur zwischen Druckgas und Verflüssigung von 20 K nicht eingehalten wurde. In Tabelle 2 sind solchen Fälle aufgelistet.

Anlässlich der regelmäßigen Wartungen hätte dies auffallen müssen.

Es ist nicht auszuschließen, dass auch hier fehlerhafte Einstellungen der Ventildriver mitverantwortlich waren.

Darüber gibt es noch weitere, hier nicht aufgenommene Fälle, in denen die Abweichungen klein waren, wie z.B. bei für die ..., Gerät 1, Kreis 2, mit einem Wert für  $\Delta t_{2c}$  von 18 K. Dennoch stellen auch solche einen Fehler dar.

Tabelle 2: Übertemperatur Druckgas-, Verflüssigungstemperatur

Datum	Gerät	Kreis	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_c/^\circ\text{C}$	$\Delta t_{2c}=t_2-t_c/\text{K}$
.....	2	1	61	46	15
.....	2	2	56	46	10
.....	3	1	59	43	16
.....	4	1	56	45	11
.....	4	2	57	42	15
.....	2	1	58	41	17
.....	3	2	58	41	17
.....	2	1	57,3	43,0	14,3
.....	2	2	59,4	43,4	16

e) Druckgastemperaturen

Weiterhin ergibt sich aus den Aufzeichnungen, dass der geforderte untere Grenzwert der Druckgastemperatur mit ca.  $60^\circ\text{C}$  in vielen Fällen unterschritten wurde (Projektierungs-Handbuch Seite 17). Lässt man eine Toleranz von -2 K zu, so traf dies in den untenstehende Tabelle 3 eingetragenen Fällen zu, was zu Gegenmaßnahmen hätte führen müssen.

f) Schmieröl

Für den 3. Schadensfall (Gerät 4, 1. Verdichter) ist anhand der Anlage 12b (analog zum 1. Schaden, Anlage 12a) gezeigt, in welchem Umfang sich die Schmierverhältnisse infolge der unzulässigen Betriebsverhältnisse verschlechterten. Hätte im Sollfall die Ölkonzentration 81% betragen, sank sie im Istfall auf 74%. Der Kältemittelanteil im Öl erhöhte sich um ca. 75%, die Viskosität sank von 15 auf  $7,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ , d.h. auf nahezu den halben Wert. Die Folgen sind weiter vorn beschrieben.

Tabelle 3: Druckgastemperaturen

Datum	Gerät	Kreis	Druckgastemperatur ( $t_2$ )
.....	1	2	57
.....	2	2	56
.....	4	1	56
.....	4	2	57
.....	1	1	57
.....	3	2	56
.....	2	2	57
.....	4	1	54,6
.....	4	2	57,1
.....	1	1	54
.....	2	1	57,3
.....	4	1	56,8



## **8.2 Öldruckstörungen**

Aus Anlage 2 ist zu entnehmen, dass es mehrfach zu Öldruckstörungen kam. So trat am Gerät 2, Kreis 1, am ... eine Öldruckstörung auf, die offensichtlich nicht geklärt werden konnte. Nach erfolgter Prüfung durch den Servicetechniker trat an beiden Verdichtern nach 30 Minuten Laufzeit wieder Ölmenge auf. Dasselbe ereignete sich am Gerät 2, Kreis 2, am .... und am .... Am ... kam es am 4. Gerät, 1. Kreis, zu Öldruckstörungen und Ölverlagerungen. Gründe sind keine ausgewiesen. Ölverlagerungen sind jedoch stets ein generelles Zeichen für Schwächen des Ölmanagements, mit der Folge von Verdichterschäden.

Auch wenn vorgenannte Mängel schon 3 Jahre her sind, liegen keine Angaben darüber vor, dass Änderungen vorgenommen wurden. Derartige Störungen können sich somit wiederholen.

## **8.3 Viskositätsabfall**

Die Ölprobe des Herstellers Fuchs (Anlage 9) weist aus, dass eine deutliche Viskositätsverringerung erfolgte, von  $170 \text{ mm}^2/\text{s}$  auf  $140,73 \text{ mm}^2/\text{s}$  (Probe 1 der KM 1-1) und  $141,32 \text{ mm}^2/\text{s}$  (Probe 2 der KM 1-2). Ein Grund ist nicht genannt. Sofortiger Ölwechsel wurde angeraten.

Da die übrigen Analysewerte nicht zu beanstanden waren (telefonische Rückfrage) ist denkbar, dass anlässlich einer Ölnachfüllung ein Öl mit zu niedriger Viskosität eingefüllt wurde. Folge war der sich eingestellte niedrige Mischwert. Möglicherweise ist darin eine der Schadensursachen zu sehen. In jedem Fall liegt ein ungeklärter Fehler vor. Zudem verwundert der krasse Unterschied der 1. Probe gegenüber den Proben 2 bis 4 bezüglich der Neutralisationszahl, die mit dem Wert von  $0,12 \text{ mg KOH/g}$  um mehr als eine Zehnerpotenz größer ist als die übrigen mit  $0,01 \text{ mg KOH/g}$ . Hierauf sei zumindest hingewiesen, ohne weitere Schlüsse ziehen zu können.

## **8.4 Schadensbericht ... (1. Verdichterschaden)**

In dem Schadensbericht (Anlage 3) wird als mögliche Ursache ein zu häufiges Starten genannt. Wie bereits weiter vorn ausgeführt, entspricht dies nicht den tatsächlichen Gegebenheiten, da die Verdichter praktisch im Dauerbetrieb laufen. Es stellt sich zudem die Frage, ob ein Interesse daran bestand, alle Schadensursachen darzulegen.

## **8.5 Fehlende Wärmedämmung des Ölabscheiders**

Die im Projektierungs-Handbuch (Seite 21) vorgeschriebene zusätzliche Isolierung des Ölabscheiders fehlt. Die Notwendigkeit ist gegeben, da die Verdichter im Freien aufgestellt und damit den Witterungsverhältnissen ausgesetzt sind. Für die anlässlich der Schadensfälle 2 und 3 herrschenden Frostwerte ist somit nicht auszuschließen, in diesem Fehlen eine weitere Schadensursache zu erkennen.

## **8.6 Regelbereich**

Das 3. Lichtbild zeigt anhand der angeschlossenen Magnetventile, dass die Leistungsstufen 25%, 50% und 100% betrieben werden, somit der gesamte verfügbare Leis-

tungsbereich genutzt wird (entgegen der geäußerten Meinung, es handle sich nur um den Bereich ab 50%, s. Protokoll des Besichtigungstermins).

In Frage zu stellen ist, ob innerhalb eines derart großen Leistungsbereichs eine zuverlässige Ölrückführung gewährleistet ist. Ist dies z.B. bei 25% nicht der Fall und wird der Verdichter auf die Stufe 50% hochgeschaltet, bei der der Ölrückfluss wieder erfolgt, so kann bei entsprechend großer Ölverlagerung im Verdichter ein Ölschlag eintreten, der zu dessen Beschädigung, ggfs. sogar zum Ausfall, führen kann.

Zudem würde bei nicht mehr gegebener Ölrückführung in der 25%-Stufe die Ölversorgung ausfallen, der Verdichter liefe trocken und würde blockieren.

Es sei auf das Projektierungs-Handbuch S. 22 verwiesen, worin darauf aufmerksam gemacht wird, ggfs. eine Aufteilung in mehrere Kreisläufe vorzunehmen. Bei 2 Kreisläufen anstelle eines einzigen würde sich die Sauggasgeschwindigkeit verdoppeln, und das Öl würde mitgerissen.

Allerdings betrifft dies zunächst lediglich den anlässlich der Besichtigung in Augenschein genommenen Verdichter. Ob dies auch für die übrigen 7 Verdichter gilt, entzieht sich der Kenntnis des Unterz. und wäre zu prüfen.

## **8.7 Verdampferanordnung**

Der Verdampfer ist auf gleicher Höhe wie der Verdichter angeordnet. Dadurch ist nicht auszuschließen, dass beim Anfahren flüssiges Kältemittel in den Verdichter gelangt, und zu Flüssigkeitsschlägen führt. Inwieweit durch geeignete Rohrführung Gegenmaßnahmen getroffen sind, ist nicht bekannt und wäre zu prüfen.

Es sei diesbezüglich wiederum auf das Projektierungs-Handbuch verwiesen, Seite 19, worin als Maßnahme gegen derartige Flüssigkeitsschläge empfohlen wird, den Verdichter oberhalb des Verdampfers anzubringen, in der Weise, wie dies auf Seite 20 in der Abb. 8 gezeigt ist.

## **8.8 Sonstige Feststellungen**

### 8.8.1 Verflüssigungstemperaturen

Tabelle 1 zeigt, dass im Verhältnis zu den Außentemperaturen die Kondensationstemperaturen sehr hoch lagen, z.B. betrug sie bei 12° Außentemperatur 45°C, bei 3°C Außentemperatur 42°C. Dies wäre damit zu begründen, dass bereits mit gedrosselten Lüftern gefahren wurde, wozu allerdings kein Anlass zu sehen ist. Allerdings käme auch ein zu kleiner Kondensator als Ursache in Frage. Mangels Daten ist eine Nachprüfung nicht möglich. Bekanntlich haben hohe Kondensationstemperaturen einen Leistungsverlust zur Folge. Auch diese Feststellungen lassen an der ordnungsgemäßen Funktion der Kondensatorregelung zweifeln.

### 8.8.2 Verdampfungstemperaturen

Ebenfalls fällt auf, dass die Verdampfungstemperaturen sehr niedrig lagen. Für eine Abkühlung des Kaltwassers auf 10°C sind Verdampfungstemperaturen um ca. 5°C üblich. Im vorliegenden Fall liegen sie häufig wesentlich niedriger, bis zu -3°C (Blatt 2 von

Anlage 6). Wiederum ist damit ein Leistungsverlust verbunden. Die Feststellungen lassen wiederum Zweifel an der Regelung zu.

### 8.8.3 Kältemittelunterkühlung

Wiederum aus den Aufzeichnungen folgt, dass die Unterkühlung der Flüssigkeit nach dem Kondensator ungewöhnlich hoch ist. Aus Blatt 1 der Anlage 6 ergeben sich Werte von bis zu 16 K ( $t_c - t_3$ ), aus Blatt 3 der Anlage 6 von bis zu 14,9 u.a.

Im Gegensatz dazu sind im Betriebshandbuch auf Seite 6, Kap. 5.1, Werte der Unterkühlung von 4-8°C angegeben. Diese sind ausreichend.

Die großen Unterkühlungswerte stellen die Frage, wie diese zustande kommen. Grund könnte eine Überdimensionierung des Kondensators sein, was allerdings im Widerspruch steht zu den weiter vorn genannten hohen Kondensationstemperaturen.

Auch hieraus ergeben sich begründete Zweifel am Regelsystem.

### 8.8.4 Lüfterwärmung

Aus den Aufzeichnungen gemäß Tabelle 6, letzte Zeile (Temp. Kond. ein/aus) ergeben sich sehr große Temperaturspreizungen der Kühlluft, mit Werten von z.T. über 20 K (z.B. Blatt 1 von Anlage 6, Gerät 3, Kreise 1 und 2: 23 K; Blatt 3, Gerät 2, Kreis 2: 24,2 K). Auch wenn die Werte verringert wurden, so liegen sie bei den beiden letzten Messungen (Blatt 6 und 7) immer noch bei bis zu 16 K (Blatt 7 von Anlage 6, Gerät 4, Kreis 2). Ursache könnte wiederum der Betrieb mit gedrosselten Lüftern sein. Jedenfalls sind auch hier Zweifel zu äußern.

## **9. Überprüfungen**

Auftragsgemäß wurden die Hauptkomponenten auf ihre Eignung überprüft, vor allem vor dem Hintergrund der Umstellung von R 407C auf R 134a.

### **9.1 Verdampfer**

Die Überprüfung erfolgte durch rechnerischen Vergleich von Siedezustand und Wärmeübergangskoeffizienten für R 134a und R 407C. Angewendet wurde das in Anlage 10 beigefügte Rechenverfahren.

Auf Einzelheiten der Berechnung wird des Umfangs wegen verzichtet. Als Ergebnis folgt, dass sich beide Kältemittel ganz ähnlich verhalten. Dies äußert sich darin, dass sowohl der gleiche Siedezustand herrscht (konvektives Sieden) als auch die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  in etwa gleich groß sind.

Das Ergebnis ist in nachstehende Tabelle 4 eingetragen. Den größeren Wert des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  erhält man für beide Kältemittel für das konvektive Sieden. Dabei ergibt sich für R 134a mit 3213 W/(m<sup>2</sup> K) ein geringfügig größerer Wert als für R 407C mit 3108 W/(m<sup>2</sup> K), was der Umstellung entgegenkommt. Der Verdampfer ist somit von der rechnerischen Überprüfung her auch für R 134a geeignet.

Damit ist jedoch nicht auszuschließen, dass andere Mängel vorliegen, die, wie weiter vorn ausgeführt, zu Ölverlagerungen führen. Anhand vorstehender Berechnung wurde lediglich die Eignung für die beiden Kältemittel bestätigt.

Tabelle 4: Stoffwerte K, B und Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  für R 134a und R 407C

Kältemittel	Konvektives Sieden		Blasensieden	
R 134a	K <sup>1)</sup>	0,193	B <sup>3)</sup>	0,171
	$\alpha$ <sup>2)</sup>	3213	$\alpha$ <sup>4)</sup>	1189
R 407 C	K <sup>1)</sup>	0,187	B <sup>3)</sup>	0,195
	$\alpha$ <sup>2)</sup>	3108	$\alpha$ <sup>4)</sup>	1633

Erläuterungen:

- 1) Stoffgröße K für das konvektive Sieden, in  $W s^{1,4} m^{1,3} kg^{-1,4} K^{-1}$
- 2) Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für konvektives Sieden, in  $W/(m^2 K)$
- 3) Stoffgröße B für Blasensieden, in  $W^{0,3} m^{0,1} kg^{-0,1} K^{-1}$
- 4) Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  für Blasensieden, in  $W/(m^2 K)$ .

## 9.2 Verflüssiger

Da bei der Verflüssigung analoge Stoffeigenschaften bestimmend sind wie bei der Verdampfung, ist davon auszugehen, dass der Verflüssiger ebenfalls für R 134a geeignet ist.

## 9.3 Kältemittelverdichter

Lt. Herstellerunterlagen sind die Verdichter für R 407C, R 22 und für R 134a zugelassen. Die rechnerische Überprüfung beschränkt sich daher auf den Liefergrad  $\lambda$  (Verhältnis des tatsächlichen Volumenstroms zum theoretischen Volumenstrom), unter Zugrundelegung folgender Bedingungen:

Kältemittel R 134a

$t_o = 5^\circ C$  (Verdampfungstemperatur)

$t_c = 40^\circ C$  (Verflüssigungstemperatur)

$\Delta t_{\bar{u}} = 10 K$  (saugseitige Überhitzung)

$\Delta t_{\bar{u}} = 10 K$  (Unterkühlung der Flüssigkeit)

Fördervolumenstrom bei 50 Hz:  $535 m^3/h$  (Projektierungs-Handbuch Seite 64)

Kälteleistung:  $\dot{Q}_{o,eff} = 325 kW$

Stoffwerte:

$h_1 = 410,41 kJ/kg$  (spezifische Enthalpie im Ansaugzustand)

$h_4 = 241,83 kJ/kg$  (spezifische Enthalpie am Verdampfereintritt)

$v_1 = 61,37 \times 10^{-3} m^3/kg$  (spezifisches Volumen am Ansaugstutzen)

$q_o = h_1 - h_4 = 168,58 kJ/kg$  (spezifische Kälteleistung).

Für das theoretische Fördervolumen ergibt sich die Kälteleistung  $\dot{Q}_{o,th}$  zu 408 kW.

Bei identischen Werten von  $v_1$  und  $q_o$  errechnet sich  $\lambda$  aus dem Verhältnis der effektiven zur theoretischen Kälteleistung  $\dot{Q}_{o,eff} / \dot{Q}_{o,th}$  zu  $\lambda = 325 \text{ kW} / 408 \text{ kW} = 0,796$ .

Der Wert ist realistisch, der Verdichter geeignet.

#### 9.4 Elektronisches Expansionsventil EX8

Gemäß Unterlagen der Emerson/Alco-Controls (Anlagen 11) gilt für die Leistungsbeziehung die Beziehung:

$$\dot{Q}_n = \dot{Q}_o \times K_t \times K_{\Delta p}$$

$\dot{Q}_n$  : Nennleistung

$\dot{Q}_o$  = Benötigte Kälteleistung = 325 kW

$K_t$  = Korrekturfaktor für Verdampfungs- und Flüssigkeitstemperatur = 1,03

$K_{\Delta p}$  = Korrekturfaktor für das Druckgefälle = 1,44

$$\dot{Q}_n = 325 \times 1,03 \times 1,44 = 482 \text{ kW}$$

Der Leistungsbereich wird mit 70 bis 680 kW ausgewiesen. Das Ventil ist bei Nennleistung zu 70% geöffnet. Es ist für den Anwendungsfall geeignet.

Bezüglich der Änderung der Driver (s. Protokoll des Begehungstermins) ist aus einer telefonischen Anfrage beim Hersteller zu schließen, dass die neue Drivertype Vorteile aufweist. Dies gilt bezüglich der Programmierung und der Stromversorgung. Demgemäß ist nicht auszuschließen, dass eine Fehlprogrammierung bei den alten Drivern mitursächlich für die Schäden war. Da zudem die frühere Type mittels Akku betrieben wurde, ist darin eine weitere Schadensursache nicht auszuschließen, für den Fall, dass der Akku leer war.

#### 9.5 Schmieröl

Das bereits weiter vorn behandelte Schmieröl Typ Fuchs-Öl Reniso Triton SE 170 erweist sich in der flüssigen und der gasförmigen Gemischphase innerhalb des hier vorkommenden Einsatzbereiches mit weitem Abstand von den Löslichkeitsgrenzen als vollständig (vgl. Anlagen 12c und 12d), ist demgemäß geeignet.

### 10. Zusammenfassung

#### 10.1 Schadensursachen

Aus vorstehenden Untersuchungen folgt, dass die Verdichter durch ungenügende Schmierung ausfielen. Mehrere Ursachen kommen dafür in Frage, deren Anteil im Einzelnen nur schwer zu quantifizieren ist.

Hauptursache für den 1. Verdichterschaden ... dürfte eine zu geringe Druckgasüberhitzung, wahrscheinlich infolge falscher Einstellung des Expansionsventils (Driver), gewesen sein, beim 2. und 3. Verdichterschaden ... ungenügender Druck infolge zu niedriger

Kondensationstemperatur. Auch hier sind Fehleinstellungen der Ventildriver nicht auszuschließen.

Als Ursache für die Verdichterschäden 2 und 3 kommen zudem Mängel an der Kondensatorregelung infrage. Infolge Frostwetters mit Außentemperaturen bis unter  $-10^{\circ}\text{C}$  fielen die Verflüssigungstemperaturen so weit ab, dass der Druck für eine ausreichende Schmierung fehlte.

Die fehlende Isolierung der Ölabscheider kann durchaus mitverursachend für die Verdichterschäden 2 und 3 gewesen sein.

Nicht auszuschließen ist zudem, dass die Schmierung der Verdichter selbst Schwachpunkte aufweist. Hierfür sprechen die häufigen Öldruckmängel.

Bezüglich des 1. Verdichterschadens ist zudem eine zu niedrige Viskosität des Schmieröls infolge des Nachfüllens von niedrigviskosem Öl nicht auszuschließen.

Aus den Messwerten folgt zudem, dass in vielen Fällen die für einen störungsfreien Verdichterbetrieb nötigen Randbedingungen (Druckgasverhältnisse u.a.) nicht eingehalten wurden.

Zudem sind allgemeine, die Schäden ggfs. nur indirekt beeinflussende Schwachpunkte an der Regelung festzustellen, wie zu hohe Kondensationstemperatur, zu niedrige Verdampfungstemperatur, zu große Flüssigkeitsunterkühlung u.a., die allgemein Fragen zur Regelung aufwerfen.

Da viele der genannten Mängel durch die Wartungsprotokolle zu belegen sind, hätten einige davon rechtzeitig erkannt und abgestellt werden können.

Auch Konzeptionsschwächen im Anlagenaufbau kommen infrage: Zu nennen wären der große Regelbereich von 25% bis 100% (zumindest des in Augenschein genommenen Verdichters) mit der Gefahr unzureichender Ölrückführung, die Anordnung des Verdampfers auf gleicher Höhe wie der Verdichter, mit der Gefahr von Flüssigkeitsschlägen beim Anfahren, u.a.

Da keine Verdampferzeichnung vorliegt, war eine Nachrechnung der dort herrschenden Gegebenheiten nicht möglich.

Die Weigerung der ... betreffend eines Fachgespräches verunmöglichte eine Klärung etlicher Fragen zu den Verdichtern.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die außergewöhnlich hohe Ausfallquote der 3 von 8 Verdichtern innerhalb von nur 5 Jahren beweist, dass gravierende Mängel entweder an den Verdichtern selbst oder an der Gerätekonzeption vorliegen. Vieles spricht vor allem für letzteres als Hauptursache.

## **10.2 Komponentenberechnung**

Aufgrund reiner Nachrechnungen konnten an den Hauptkomponenten keine Schwachpunkte festgestellt werden.