

# Hochdruck-Schraubenverdichteranlagen im Off-Shore-Einsatz

Dr.-Ing. J. Haasler, Wien

## Zusammenfassung

Es wird über Erfahrungen mit zweistufigen Schraubenkompressoren im weltweiten Off-Shore-Einsatz, speziell unter tropischen Klimabedingungen, berichtet. Kondensatbildung im Verdichtersystem kann zu Lager-schäden und zum Ausfall der Anlagen führen. Die Notwendigkeit, Betriebstemperaturen über 100°C einzuhalten, stellt Anforderungen an die Schmiermittel, denen die derzeit erhältlichen Öle noch nicht immer gewachsen sind.

## 1. Einleitung

Die Leobersdorfer Maschinenfabrik AG/Wien (LMF) ist Hersteller von Hochdruckverdichtern. Ihr Produktprogramm ist im Leistungsbereich zwischen 3 und 1000 kW bei Enddrücken bis 400 bar angesiedelt und besteht damit naturgemäß überwiegend aus Hubkolben-Verdichtern. Daneben werden auch Compound Units gefertigt, zu deutsch "Verbundanlagen", die so benannt sind, weil sie eine Kombination von Schrauben- und Kolbenverdichtern darstellen. Sie bestehen aus einem mittig angeordneten Antriebsaggregat - Diesel oder E-Motor -, mit dessen Hauptabtriebsseite üblicherweise ein frei ansaugender Schraubenverdichter verblockt wird, während das andere Wellenende des Motors über ein Untersetzungsgetriebe den nachgeschalteten Kolbenverdichter antreibt. In Bild 1 sind die genannten Hauptkomponenten, dazu Kühl- und Rückkühlsystem, gut zu erkennen.

Mit Verbundanlagen, speziell mit ihrer Schraubenverdichterseite, befaßt sich dieses Referat. Es geht dabei um den Leistungsbereich von 200 bis ca. 1000 kW, wovon durchschnittlich 60 % auf den Schrauben- und 40 % auf den Kolbenverdichter entfallen.

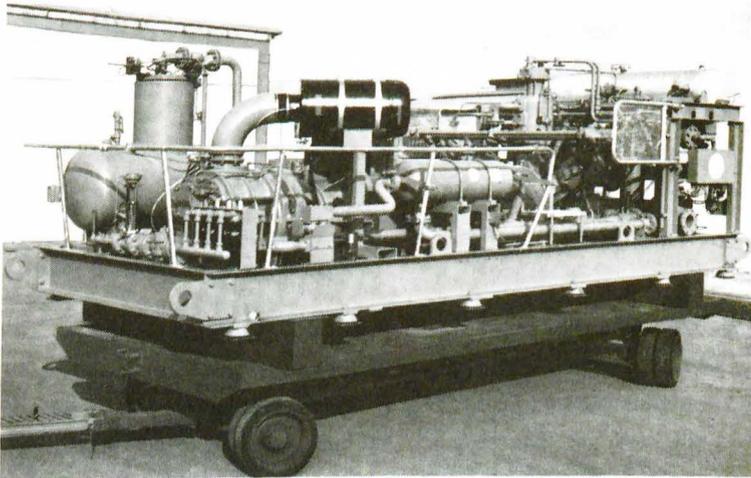


Bild 1

Verbundanlagen haben gegenüber Kolbenkompressoren u.a. einen großen Vorteil: sie brauchen weniger Platz. Bild 2 zeigt eine 1000 PS-Anlage. Sie ist kompakt, anschlussfertig und ohne Überbreite auf Straße und Schiene transportabel.

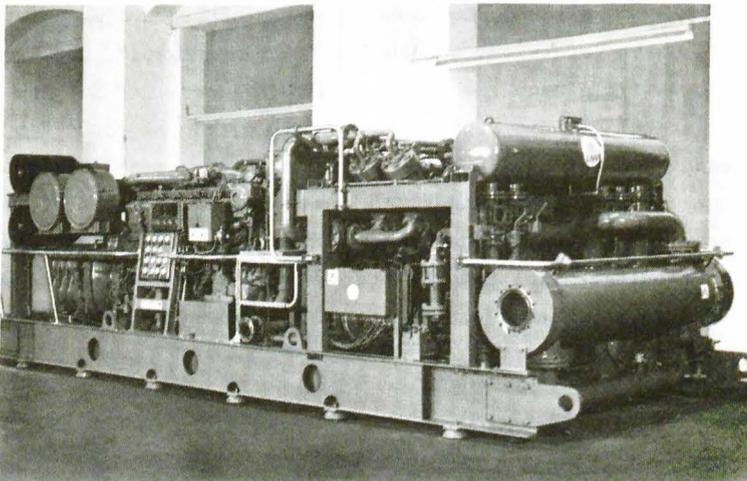


Bild 2

Klar ist, daß die größte Platzeinsparung dann eintritt, wenn die klein bauende Schraube in Bezug auf ihren Enddruck ausgereizt wird. Daher hat sich als Standard-Bauprinzip die Kombination eines 2-stufigen öl-eingespritzten atmosphärisch ansaugenden Schraubenblocks mit einem ebenfalls 2-stufigen nachgeschalteten Kolbenverdichter herauskristallisiert.

In der "Off Shore Exploration", d.h. auf Forschungsschiffen, die bei der Suche nach Erdgas und -öl für ihr bordeigenes "Air Gun System" sehr viel hochverdichtete Druckluft benötigen, hat sich die Verbundanlage weltweit durchgesetzt und die LMF konnte mit diesem Produkt eine starke Marktstellung erringen.

Da im europäischen Raum nur die MAN-GHH eine komplette Reihe zweistufiger öleingespritzter Schraubenblöcke anbietet, lag es für die LMF nahe, bei den Verbundanlagen eine Kooperation mit der GHH zu verwirklichen. Diese Zusammenarbeit brachte für beide Partner neben dem Erfolg auch einige Probleme, die bis heute nicht als vollständig gelöst angesehen werden können. Das wird im Verlauf des Referats klar werden. Vielleicht können Diskussionsbeiträge aus dem Auditorium - ich denke an die Mineralöl- bzw. Wälzlagerindustrie - uns weiterhelfen.

## 2. Der Drucktaupunkt und seine Bedeutung

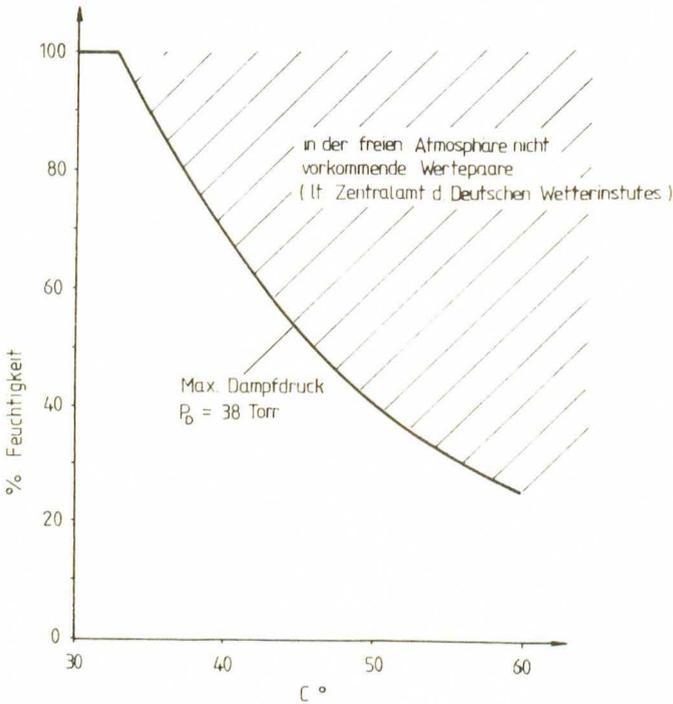
Kehren wir zurück zum Problem des Off-Shore-Einsatzes zweistufiger öleingespritzter Schraubenverdichter mit Drücken bis 25 bar, die dann nötig sind, wenn man mit einem nachgeschalteten zweistufigen Kolben 350 bar Enddruck erreichen will. 25 bar stellen also den "Worst Case", aber notwendigerweise auch den Ausgangspunkt aller weiteren Überlegungen dar.

Damit kommen wir zum entscheidenden Stichwort, nämlich zum "Drucktaupunkt". Dieser ist bekanntlich definiert als die Temperatur, bei deren Unterschreiten Kondensat aus dem verdichteten Medium, in unserem Fall Luft, ausfällt. Er ist abhängig von zwei Größen:

- dem atmosphärischen Taupunkt, d.h. der absoluten Luftfeuchte und
- dem Systemdruck, d.h. dem Enddruck der Schraube.

Bei ständigem Unterfahren des Drucktaupunktes kumuliert logischerweise Kondensat im System. Die praktisch als "Mixer" wirkenden Schraubenrotoren verquirlen dann Kondensat und Einspritzöl zu einer Emulsion mit ständig steigendem Wasseranteil. Das führt zwangsläufig nach kurzer Zeit zu schweren Schäden und zum Ausfall der Anlage. Fazit: Der Drucktaupunkt darf keinesfalls unterfahren werden.

Wie hoch kann der Drucktaupunkt liegen?



Maximal gleichzeitig auf der Erdoberfläche vorkommende Temp und Feuchtigkeitswerte

Bild 3

Das wollen wir mit Hilfe der Kurve feststellen, die in Bild 3 gezeigt wird. Sie stammt vom Zentralamt des Deutschen Wetterinstitutes und besagt, daß in der freien Atmosphäre kein Dampfdruck über 38 Torr oder 50 mbar auftreten kann. Dieser Wert stellt also den Auslegungspunkt

für in tropischen Gebieten operierende Schiffe dar. Wird atmosphärische Luft mit einem Dampfdruck von 50 mbar auf 25 bar verdichtet, so ergibt sich in der Druckluft ein Wasserdampfpartialdruck von 1,25 bar. Den dazugehörigen Siedepunkt entnehmen wir der Dampftafel mit ca. 105°C. Das ist auch gleichzeitig unser gesuchter maximaler Drucktaupunkt.

Eine kleine Randbemerkung: Die Unfallverhütungsvorschrift VBG 16 limitiert wegen der Selbstzündungsgefahr für öleingespritzte Schraubenverdichter die Betriebstemperatur mit max. 100°C. Die Beachtung der VBG 16 beim Tropeneinsatz würde in unserem Falle zu schweren Schäden führen. Da ihr Geltungsbereich sich aber auf das Gebiet der Bundesrepublik beschränkt, bleibt bestenfalls noch die semantisch-juristische Frage offen, ob ein in den Tropen operierendes und unter deutschen Flagge fahrendes Schiff an diese Unfallverhütungsvorschrift gebunden und daher bei gewissen Wetterlagen nicht einsatzfähig ist.

Diese nicht ganz ernst gemeinte Randbemerkung hilft aber, die eigentliche Problematik deutlich zu machen: Es gibt heute keine Schraubenverdichteröle, die bei Betriebstemperaturen über 100°C Standzeiten und andere Eigenschaften aufweisen, die unsere Kunden akzeptieren können.

Die Betreiber der Anlagen befinden sich bei Tropeneinsatz der Schiffe auf einer ständigen Gratwanderung: Einerseits die Gefahr von Ausfällen der Anlage bei Fahrweise unter dem oder zu nahe dem Drucktaupunkt, andererseits fast unzumutbare Betriebsmittelkosten, verbunden mit erhöhter Selbstzündungsgefahr.

Dazu eine kleine Nebenrechnung:

Erfahrungsgemäß erschöpft sich im Tropenbetrieb ein synthetisches Öl nach ca. 300 Stunden, im Dauereinsatz also nach ca. 2 Wochen; bei einem Literpreis von ca. DM 10,--, einer Füllmenge von 300 l/Anlage und 3 Anlagen an Bord ergibt das wöchentliche Kosten in der Größenordnung von DM 5.000,--. Dazu kommen die Lager- und Entsorgungsprobleme.

Eine Faustregel besagt, daß eine um 10°C höhere Betriebstemperatur die Standzeit eines Öles halbiert. Aus diesen Fakten wird klar, daß die Betreiber versuchen müssen, die Maschinen so kalt wie vertretbar, d.h. so knapp wie möglich über dem Drucktaupunkt zu fahren.

### 3. Schäden und ihre Entstehung

Ohne zu quantifizieren sei hier lapidar festgestellt, daß die Anzahl der Frühschäden an den Schraubenverdichtern von Verbundanlagen bei Tropeneinsatz ein unvertretbares Maß erreicht hat. Trotz technischer Gegenmaßnahmen und intensiver Kundeninformation sind die Probleme bis heute nicht restlos beseitigt.

Welche Schadensbilder gibt es und wie entstehen sie?

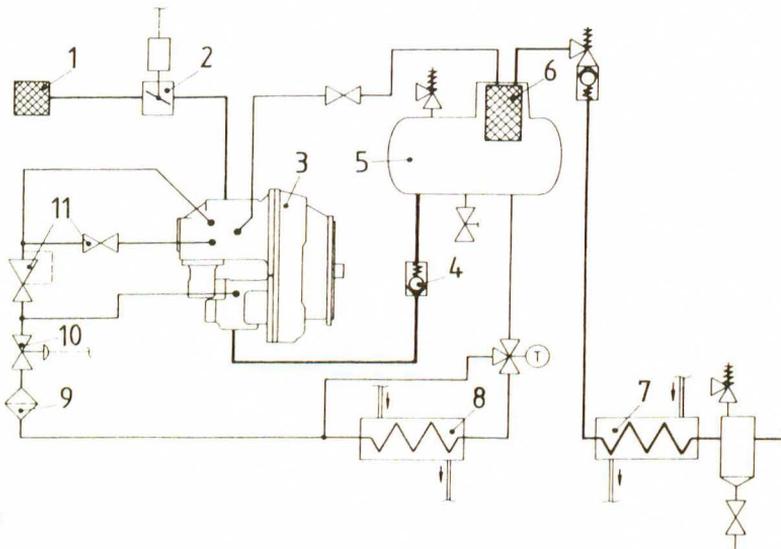


Bild 4

Dazu zunächst ein Blick auf Bild 4, ein Fließschema. Die wichtigsten Punkte im Hauptluftweg und Ölkreislauf sind Luftfilter (1), Drosselklappe (2), Schraubenblock (3), Rückschlagventil (4), Abscheidebehälter (5), Abscheidepatrone (6), Nachkühler (7), Ölkühler (8), Ölfilter (9), Ölstopventil (10) und Reduzierventile für die Öleinspritzung (11).

Die Regelung ist eine reine Mengenregelung durch die Drosselklappe. Der Schraubenenddruck ist mit Ausnahme der kurzen Startphase in engen Grenzen konstant, es gibt keine Druckabsenkung im Leerlauf. Damit ist der Drucktaupunkt eine konstante Größe, solange die Luftfeuchtigkeit sich nicht ändert.

Falls der Drucktaupunkt ständig unterfahren wird, d.h. per definitione die Öltemperatur im Abscheidebehälter unter dem Drucktaupunkt liegt, bildet sich kumulierend Kondensat, das mit dem Öl zu einem mayonnaiseartigen, klebrigen Gemisch emulgiert, welches sich wiederum - wahrscheinlich unter Sauerstoff- und Temperatureinfluß - zu einer dunklen wachsartigen Masse wandelt, die sich an den Rohrwandungen absetzt und u.a. die Funktion des Ölstopppentils behindert. Erste Indikatoren für das Unterfahren des Drucktaupunktes sind daher Ölaustritt aus dem Luftfilter nach Abstellen der Anlage, Verstopfen der Abscheidepatrone bis zu deren mechanischem Kollaps und vorzeitiges Erreichen des Grenzdifferenzdruckes am Ölfilter. Wird nicht rechtzeitig gegengesteuert, kommt es schließlich zum Ausfall des Schraubenverdichters; üblicherweise ein Axiallagerschaden in der zweiten Stufe, der in Folge zum Anlaufen des Rotors am Verdichtergehäuse und somit zum Totalschaden der Stufe führt. Grund für den Lagerschaden ist die Verminderung der Lagerlebensdauer bei der Verunreinigung des Schmieröls durch Wasser. So viel zum Unterfahren des Drucktaupunktes.

Das Hauptproblem liegt aber woanders: Es sind auch Lagerschäden beobachtet worden, wenn die Logbücher des Bordpersonals keine Rückschlüsse auf ein Unterfahren des Drucktaupunktes zuließen. Diese Schäden traten nach durchschnittlich 2000 - 4000 Betriebsstunden auf. Messungen auf dem Prüfstand der LMF zeigten, daß auch bei Betriebstemperaturen über dem Drucktaupunkt Kondensat anfällt, naturgemäß umso mehr, je näher man dem Drucktaupunkt kommt.

Jedem Betreiber von Schraubenverdichteranlagen ist die Drainage von Kondensat vor dem Start nach längerem Stillstand geläufig. Solange die Menge in Grenzen bleibt, kann man offensichtlich damit leben.

Erklärt wird die Kondensatbildung bei Fahren über dem Drucktaupunkt - durch örtliche Kältepole im Abscheidesystem,

- durch den obligaten Kaltstart,
- durch Regelvorgänge und
- durch das zwangsläufige Durchfahren des Drucktaupunktes im Ölkühler, wobei sich Kondensat aus der mitgeführten Luft abscheidet.

Bei der Untersuchung schadhafter Lager wurden häufig kleine lochfraß-ähnliche Korrosionen beobachtet, die aufgrund ihrer regelmäßigen Anordnung eindeutig als Stillstandskorrosionen identifiziert werden konnten. Der Nachweis von Chloriden machte klar, daß es sich um ein "Off-Shore-Phänomen" handelt: Feine Salzkristalle werden vom Verdichter angesaugt, lösen sich im Kondensat, setzen sich im Stillstand als Tropfen an den jeweils tiefsten Stellen ab und wirken dort lokal korrosiv. Welche Rolle diese Stillstandskorrosion bei späteren Lagerschäden spielt, ist strittig. Wir halten sie aber schon deshalb für nicht unerheblich, da vergleichbare Lagerschäden im weltweiten On-Shore-Einsatz praktisch unbekannt sind. Darüber gibt es jedoch Auffassungsdifferenzen.

Unbestritten wiederum ist, daß Kondensat bei allen vorzeitigen Lagerschäden - auch dann, wenn die Betriebstemperatur über dem Drucktaupunkt lag - eine wichtige Rolle gespielt haben muß.

#### 4. Schmierstoff-Probleme

Wo ist jetzt der Hebel anzusetzen?

Leider gibt es weder aus der Wälzlagerindustrie noch von den Mineralölfirmen verlässliche Kurven über die Abhängigkeit der Lagerlebensdauer vom Kondensatgehalt des Schmieröls. Dabei wäre es sehr wichtig, den "Halbwertsatz" der wichtigsten Ölsorten zu kennen, d.h. den Prozentsatz Wasser, der dem jeweiligen Öl unbedingt beigemischt werden muß, um die Lagerlebensdauer auf 50 % der Lebensdauer mit wasserfreiem Öl zu senken.

Sicher ist hingegen, daß die Stillstandskorrosion bei Verwendung von Ölsorten mit geringem Dispersionsvermögen gefördert wird, d.h. durch Ölsorten, die im Stillstand das Kondensat leicht abscheiden.

Noch ein Beispiel verdeutlicht die Wichtigkeit des Dispersionsver-

haltens: Nach dem Wechsel auf ein anderes Öl reduzierte sich auf einem Schiff die Standzeit der Ölfilterpatronen drastisch. Die Erklärung: Das Dispersionsverhalten bei beiden Ölsorten war sehr unterschiedlich, beim zweiten Öl gab es in den hängend eingebauten Filterpatronen einen Wasser-Abscheideeffekt. Das Wasser und die darin konzentrierten Chloride erhöhten den Filterwiderstand und machten das Material brüchig.

Aus dieser Sicht sollte man Ölen mit einer gewissen Dispersions- bzw. Emulgierfähigkeit den Vorzug geben. Völlig offen ist jedoch für uns, ob diese Öle auch den besten, d.h. größten, "Halbwertsatz" haben. Dazu fehlen die Zahlen der Öl- und Lagerindustrie.

Bei Betriebstemperaturen über 100°C sind die Standzeiten von Mineralölen indiskutabel; man muß Synthetiköle verwenden. Diese aber haben im allgemeinen eine nur geringe Dispersionsfähigkeit. Das aber ist aus unserer Sicht ein eindeutiger Nachteil.

Nur der Vollständigkeit halber soll noch hingewiesen werden auf eine weitere Öleigenschaft: die Schutzwirkung gegen Oberflächenkorrosion. So wurde auf einem Schiff nach dem Wechsel von Mineralöl auf Synthetiköl in der Druckleistung zwischen Abscheidepatrone und Nachkühler kein Rost mehr beobachtet.

Nicht hinreichend für die Brauchbarkeit eines Öles ist die Angabe der Ölviskosität in Abhängigkeit von Betriebs- bzw. Einspritztemperatur. Unrealistisch ist weiter die Forderung, die Betriebstemperatur so hoch zu legen, daß die Kondensatmenge zu Null wird. Das ist nämlich nach dem Vorgesagten erst dann der Fall, wenn die Öleinspritztemperatur über dem Drucktaupunkt liegt. Bei einer Differenz zwischen End- und Einspritztemperatur von 25°C und einem Drucktaupunkt von 105°C bedeutet das eine Öltemperatur von 130°C im Abscheidebehälter, ein ohne Frage völlig illusorischer Wert, wie Vertreter der Mineralölindustrie sicher gerne bestätigen. Fazit: Man muß also mit einer gewissen Kondensatmenge im Öl leben! Nur gibt es bis heute keine verlässlichen Grenzwertangaben.

Das führt zu folgendem Resümee: Im Off-Shore-Tropeneinsatz öleingespritzter Hochdruck-Schraubenverdichter braucht man ein Öl mit folgenden Eigenschaften:

- Mindeststandzeit 1000 Stunden bei einer Betriebstemperatur von max. 115°C,
- Dispersions-(Emulgier-)fähigkeit min. 1 %,
- min. Korrosionsgrad 1-B, DIN 51585,
- Viskositätsklasse mindestens ISO VG 68,
- Halbwertsatz von mindestens 1 % Wasser.

Die Frage an die Mineralölindustrie: Kann man in absehbarer Zeit darauf hoffen?

Ölempfehlungen für den Tropenbetrieb haben derzeit noch eine sehr unsichere Basis.

### 5. Schlußbetrachtung

Selbstverständlich hat sich die LMF nicht darauf verlassen, daß eines Tages das Öl mit den vorher präzisierten Eigenschaften da sein wird. In der Zwischenzeit könnte der gesamte Off-Shore-Explorationsmarkt verloren sein. Verständlicherweise können wir die im Versuch erarbeiteten Detailmaßnahmen, in denen viel spezifisches Know-how steckt, hier im einzelnen nicht beschreiben. Diese Maßnahmen zielen darauf, bei bereits im Betrieb befindlichen Anlagen die Lebensdauer der Schraubenverdichterlager zu erhöhen.

Parallel dazu hat die LMF eine Neuentwicklung durchgeführt: eine automatische Taupunktregelung, bei der ein Mikroprozessor aus Meßwerten den Drucktaupunkt errechnet, einen Soll-Ist-Vergleich mit der Betriebstemperatur durchführt und schließlich ein Bypassventil zum Ölkühler regelt. Diese sehr aufwendige elektronische Regelung wird zukünftig sicher helfen, Schäden durch Bedienungsfehler auszuschalten. Eines aber kann sie nicht: die Entwicklung eines verbesserten Schmierstoffes und Maßnahmen am Verdichter selbst überflüssig machen.

Zum Schluß möchte ich einer Frage zuvorkommen, die sicher gestellt werden würde: Warum trocknet man die Luft nicht saugseitig und senkt auf diese Weise den Drucktaupunkt um einen entscheidenden Betrag?

Damit wäre das Problem doch einwandfrei gelöst.

Das ist im Prinzip richtig, aber der Raumbedarf der Vorkühlung bzw. -trocknung erlaubt einen nachträglichen Einbau bei den beengten Platzverhältnissen an Bord nicht. Das würde außerdem einen großen Vorteil der Verbundanlagen gegenüber Kolbenverdichtern zunichte machen, nämlich die kompakte Bauweise.

Aus Erfahrungen wissen wir, daß in Gremien, wie sie hier und heute versammelt sind, häufig Denkanstöße und Anregungen gegeben werden, die neue Entwicklungen einleiten. Wenn uns das heute gelingen sollte, ist ein Zweck dieses Referats erfüllt.