

Kühlsysteme für Schraubenvakuumpumpen

Cooling systems for screw vacuum pumps

Dr.-Ing. U. Friedrichsen, Dipl.-Ing. O. Kohlstedt

Kurzfassung

Seit 1992 werden von der Dr.-Ing. K. Busch GmbH Schraubenvakuumpumpen für verschiedenste Anwendungen und Zielmärkte vertrieben. Es wird die technische Entwicklung von Schraubenvakuumpumpen der drei Hersteller Oerlikon Leybold Vacuum GmbH, Sterling SIHI GmbH und Dr.-Ing. K. Busch GmbH vorgestellt und der Zusammenhang mit den jeweiligen Kühlsystemen diskutiert.

Die Vor- und Nachteile verschiedener Kühlsysteme und Ausführungen für unterschiedliche Anwendungen werden beleuchtet. Es wird eine technisch besonders einfache Lösung mit einer COBRA Schraubenvakuumpumpe in einer Industrie-Reinigungsanlage vorgestellt. Die Reinigungsflüssigkeit durchströmt hier direkt den internen Kühlkreislauf der Schraubenvakuumpumpe und wird nicht nur zum Kühlen eingesetzt, sondern kann auch zum Aufheizen der Reinigungsflüssigkeit genutzt werden.

Abstract

Since 1992 Dr.-Ing. K. Busch GmbH has sold screw vacuum pumps for all kinds of applications and target markets. The technical development of screw vacuum pumps manufactured by Oerlikon Leybold Vacuum GmbH, Sterling SIHI GmbH and Dr.-Ing. K. Busch GmbH will be presented and the respective cooling systems will be discussed.

The advantages and disadvantages of different cooling systems and types of various applications will be reconsidered. An exceptionally easy technical solution is introduced with a COBRA screw vacuum pump in an industrial cleaning plant. The cleaning fluid directly passes through the internal cooling circuit of the screw vacuum pump and is not only used for cooling but can also be used to heat the cleaning fluid.

1. Einführung

Vakuumpumpen sind Verdichter, die saugseitig fast beliebige Gase oder Dämpfe aus einem Gefäß- oder einem ebenso beliebigen Prozess absaugen und anschließend druckseitig zumeist auf ein Druckniveau um oder wenig über dem Umgebungsdruck anheben. Dieser Vorgang lässt sich thermodynamisch in guter Näherung mit den idealen Gasgesetzen beschreiben. Die Temperatursteigerung des Fördermediums infolge der Verdichtung lässt sich ebenso den Poisson-Gleichungen für isentrope Zustandsänderungen entnehmen.

Bild 1 zeigt diesen Zusammenhang in einer einfachen Darstellung und macht rasch deutlich, warum beispielsweise Klauenvakuumpumpen, Seitenkanalgebläse oder auch trocken laufende Drehschieber-Vakuumpumpen, die üblicherweise einen zulässigen Enddruck oberhalb von 100 hPa abs. aufweisen, auch bei großen Saugvermögen ($\geq 250 \text{ m}^3/\text{h}$) mit Luftkühlung betrieben werden.

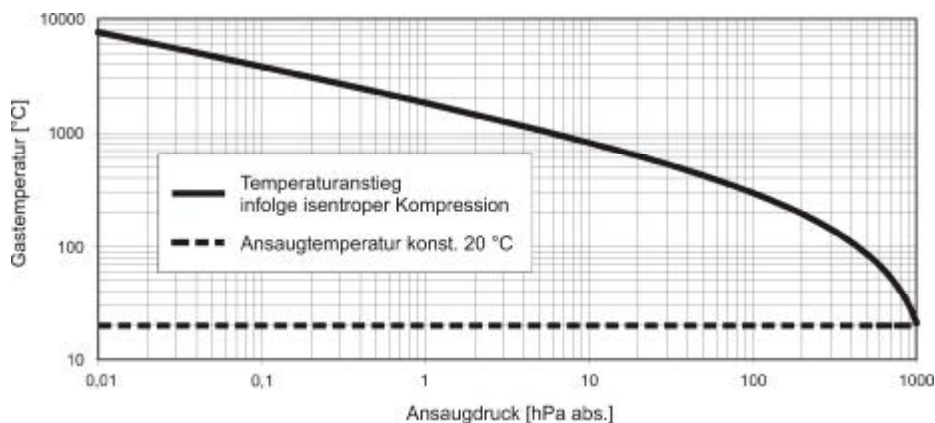


Bild 1: Gastemperaturen saug- und druckseitig zur Vakuumpumpe bei isentroper Kompression

Bekannte Schraubenvakuumpumpen der Baugrößen von $70 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ werden bis auf einzelne Ausnahmen mit Öl- oder Wasserkühlung betrieben, um die Kompressionswärme aus dem Arbeitsraum abzuführen. Eine Übersicht zu den Arbeitsbereichen der vorgenannten Vakuumpumpen ist in Bild 2 dargestellt.

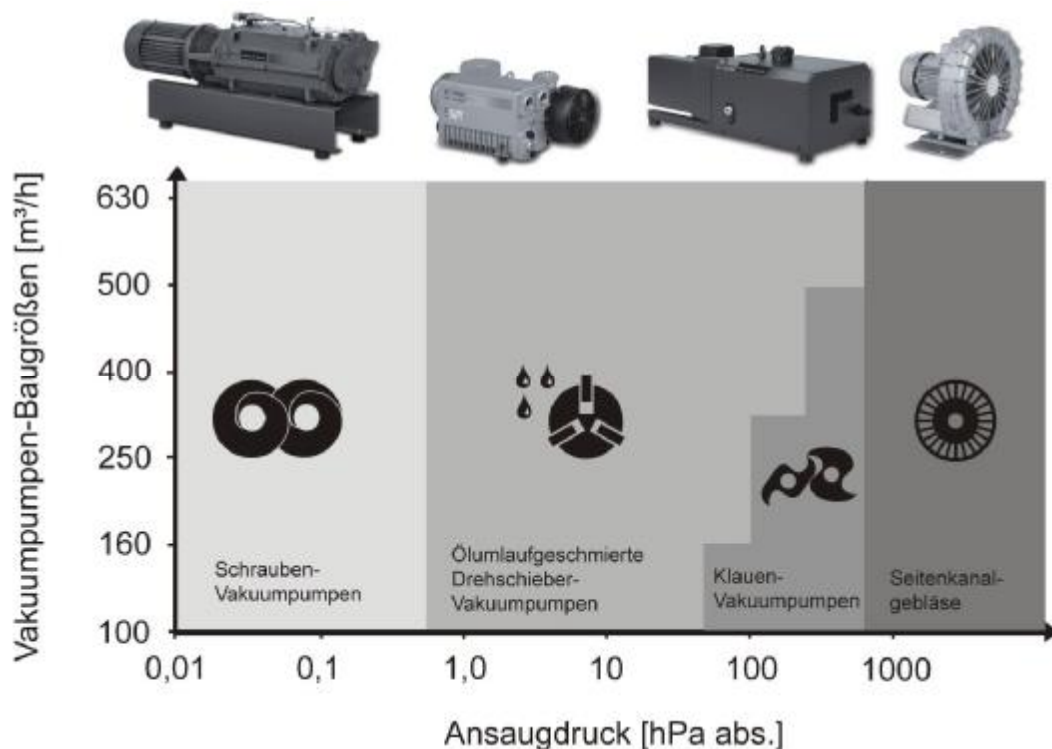


Bild 2: Vakuumpumpen-Bauarten mit den Grenzen ihrer Arbeitsbereiche (Ölumlauf geschmierte Drehschieber-Vakuumpumpen, Klauenvakuumpumpen und Seitenkanalgebläse nur einstufig)

Darüber hinaus lässt sich die erforderliche Leistung zum Erzeugen des benötigten Saugdruckes und die damit korrespondierende Kompressions-Wärmemenge mit dem Verdichtungsverhältnis in der Vakuumpumpe weitgehend einstellen. Diese Möglichkeit, die in der Praxis verschiedenen Einschränkungen unterworfen ist [1], zeigt Bild 3 für auf der Basis einer ideal und verlustfrei arbeitenden Schraubenvakuumpumpe mit einem Fördervolumen von 630 m³/h [2,3,4].

Die untere Grenzkurve zeigt die Leistungsaufnahme ohne Betrachtung der Ausschubarbeit und ohne festgelegtes Verdichtungsverhältnis. Die obere Grenzkurve entspricht der isochoren Verdichtung. Die eingezeichneten Kurven mit festgelegtem Verdichtungsverhältnis veranschaulichen, warum seit Jahrzehnten bei üblichen Vakuumpumpen, beispielsweise Ölumlauf geschmierten Drehschiebervakuumpumpen oder auch Klauenvakuumpumpen Verdichtungsverhältnisse von um 1:2 realisiert wurden und werden.

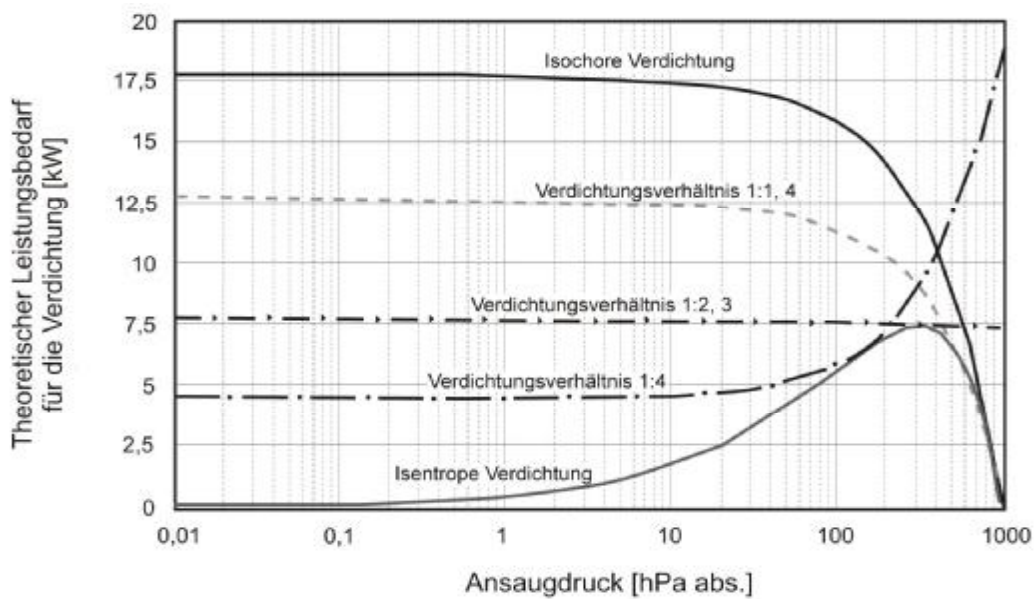


Bild 3: Theoretischer Leistungsbedarf für die Gaskompression über dem Ansaugdruck für verschiedene Verdichtungsverhältnisse

Ein typisches Beispiel hierfür sind die in [Bild 4](#) abgebildeten Betriebskurven einer Klauenvakuumpumpe der Baugröße 250 m³/h.

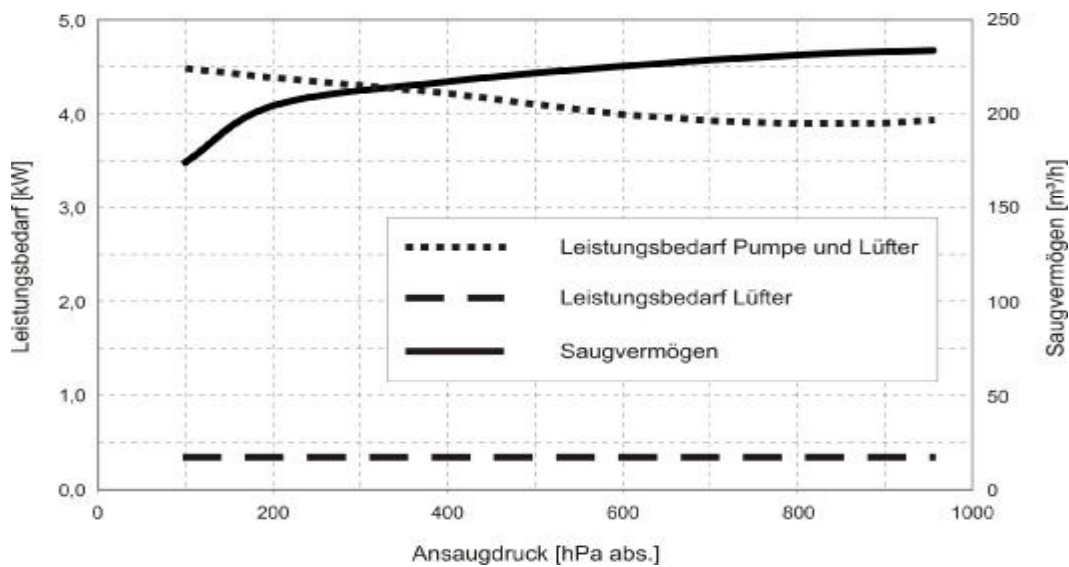


Bild 4: Wellenleistung und Lüfterleistung sowie das Saugvermögen einer Klauenvakuumpumpe vom Typ Mink MM1252 AV

Dargestellt ist der reale Leistungsbedarf, das Saugvermögen und der im realen Leistungsbedarf der Vakuumpumpe bereits enthaltene Anteil des Leistungsbedarfs für den

Kühlluftventilator. Der Betriebsbereich der Klauenvakuumpumpe wird ausschließlich durch den zunehmenden Temperaturanstieg unterhalb des Ansaugdruckes von 100 hPa abs. begrenzt.

2. Zusammenwirken zwischen Schraubentyp und Kühlsystem

Moderne Schraubenvakuumpumpen erreichen Endvakua unter 0,01 hPa abs. Man ist daher bemüht, gerade in diesem Betriebsbereich eine niedrige Leistungsaufnahme zu erreichen, und legt diese Vakuumpumpen mit einem höheren Verdichtungsverhältnis aus.

Die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses wird letztlich infolge der bei hohen Saugdrücken stark ansteigenden Überverdichtung begrenzt. Die damit einhergehende ebenso steigende Leistungsaufnahme der Vakuumpumpen macht sehr starke Antriebsmotoren erforderlich, oder zwingt die Hersteller der Vakuumpumpen zu einer Reduzierung der Antriebsdrehzahl in diesem Betriebsbereich.

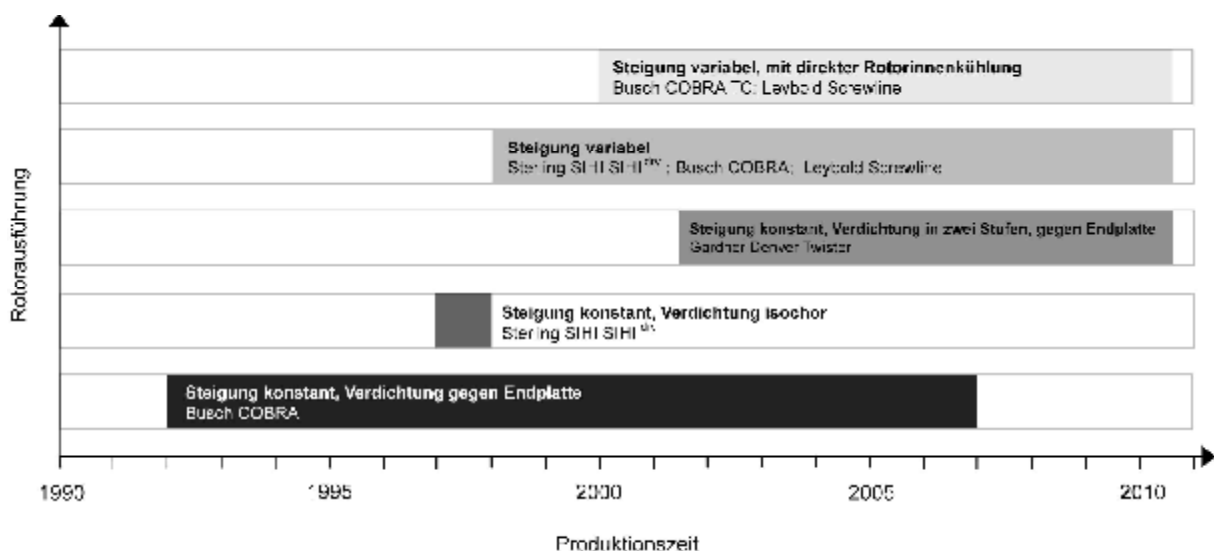


Bild 5: Entwicklung der Rotorbauformen in den letzten 20 Jahren

Die Herstellung von Schraubenvakuumpumpen mit einer inneren Verdichtung hat sich erst in den letzten 25 Jahren entwickelt. Erste Schraubenvakuumpumpen hatten eine konstante

Steigung und verdichteten das angesaugte Fördermedium gegen eine Steueröffnung in der stirnseitigen Endplatte. Diese ersten Schraubenvakuumpumpen mit asymmetrischem Zahnprofil wurden Ende der 90er Jahre des 20sten Jahrhunderts, vorrangig bedingt durch bessere fertigungstechnische Möglichkeiten von symmetrischen- und asymmetrischen Schraubenprofilen mit variabler Steigung ergänzt. Heute dominieren Schraubenvakuumpumpen mit derartig profilierten Rotoren die Portfolios der Hersteller.

Bild 5 zeigt die Entwicklung der verschiedenen Rotorbauformen in den letzten 20 Jahren ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder punktgenaue zeitliche Zuordnung.

Auch durch die hinzu gewonnene Möglichkeit die innere Verdichtung bedarfsgerecht auszulegen, d.h. einzustellen sind die Aufwendungen für die Kühlung der Schraubenvakuumpumpen tatsächlich leicht zurückgegangen.

Parallel zur Entwicklung der verschiedenen Rotorbauformen lässt sich auch die Entwicklung der sogen. Rotorkühlung in Schraubenvakuumpumpen beobachten. Dieser Entwicklungsprozess wird zumeist durch die Zielmärkte der Hersteller und die damit verbundenen Zielanwendungen, d.h. die Anwendungsprozesse selbst bestimmt. Beispielsweise benötigen Vakuumpumpen in der Chemischen Industrie häufig hohe Gastemperaturen, um Kondensation und infolge Korrosion in den Pumpen sicher zu vermeiden. Eine direkte Rotorkühlung, bei der gekühltes Öl zentral in die hohl ausgeführten Rotoren eingespritzt wird, wäre deshalb für solche Anwendungen nur bei sehr großen Baugrößen sinnvoll. Demgegenüber werden für Anwendungen in der Solarindustrie, beispielsweise bei der Herstellung von Photovoltaik-Panelen vergleichsweise niedrige Temperaturen benötigt, um die Bildung von Feststoffen im Bereich des Stufenaustritts und dem anschließenden Schalldämpfer ebenso sicher zu vermeiden. Eine direkte Rotorkühlung hat bei dieser Anwendung Vorteile. Trotzdem bleiben für Schraubenvakuumpumpen ohne direkte Rotorkühlung genug technische Möglichkeiten, um die Gastemperaturen im Arbeitsraum niedrig zu halten.

Es wird daher deutlich, dass die verschiedenen modernen und erfolgreichen Vakuumpumpen mit ihren unterschiedlichen technischen Konzepten und Kühlungsvarianten immer für bestimmte Anwendungen besonders geeignet sind für andere Anwendungen hingegen weniger.

Die Schlüsselfaktoren für die Betreiber, wie Investitionskosten, Gesamtbetriebskosten und die technische Eignung einer Vakuumpumpe für die jeweilige Anwendung bleiben direkt abhängig vom Kühlkonzept und von der Flexibilität dieses Kühlkonzeptes.

3. Anforderungen an Kühlsysteme von Schraubenvakuumpumpen

Grundsätzlich und damit unabhängig von der Anwendung müssen moderne Kühlsysteme folgenden Anforderungen genügen:

- Das Kühlsystem muss die im Arbeitsraum der Vakuumpumpe entstehende Kompressionswärme so beherrschen, dass die sich einstellenden unterschiedlichen Spalte zwischen den Rotoren und zwischen den Rotoren und dem umgebenden Zylinder nicht gegen Null gehen und damit ein ‚Anlaufen‘ der Vakuumpumpe ausgeschlossen ist.
- Der Energieverbrauch des Gesamtsystems Vakuumpumpe und Kühlsystem muss so gering wie möglich sein.
- Das Kühlsystem muss für eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung um den Arbeitsraum der Vakuumpumpe herum sorgen, um sogen. hot spots aber auch allgemein große Temperaturgradienten zu vermeiden.
- Im Zusammenhang mit dem gewählten Verdichtungsverhältnis sollte das Kühlsystem und der Antrieb so ausgelegt werden, dass eine Drehzahlabenkung bei hohen Ansaugdrücken nicht mehr erforderlich ist. Ansonsten bleiben Schraubenvakuumpumpen, die aufgrund der immer auftretenden Spaltaufzehrung zwischen ‚kalter‘ Pumpe und dem betriebswarmem Zustand einer Pumpe bezüglich des sich erst langsam einstellenden Endvakuums schon immer für schnelle und getaktete Anwendungen benachteiligt waren, hierfür auch weiterhin nur begrenzt einsetzbar.
- Neben den bereits beschriebenen Anforderungen zeigt sich in der praktischen Anwendung leider häufig noch die Problematik von sehr unterschiedlicher Kühlwasserqualität. Dies betrifft nicht nur das Kühlwasser selbst mit sehr verschiedenen PH-Werten und Härtegraden sondern auch die häufige Mitförderung von kleinen Festkörpern aller denkbaren

Stoffe und nicht zuletzt die örtlichen Gegebenheiten, wie die Kühlwasser-Anschlussdrücke und die Eintrittstemperaturen. Aus diesem Grund und wegen der Gefahr ungleichmäßiger Temperaturverteilungen bis hin zu sprungartigen Temperaturschwankungen im Zylinder um den Arbeitsraum werden heute fast keine Schraubenvakuumpumpen mehr mit direkten Kühlsystemen angeboten. Bevorzugt werden indirekte Kühlsysteme, bei denen das Kühlwasser eines Anwenders nicht unmittelbar in der Vakuumpumpe, beispielsweise im Mantel des Zylinders zur Kühlung genutzt wird, sondern ein Kühlmittel-Zwischenkreis für eine gleichmäßige Temperaturverteilung bei stetiger Abfuhr der Kompressionswärme sorgt.

Die sichere Vermeidung einer ungleichen Temperaturverteilung um den Arbeitsraum einer Vakuumpumpe zeigt das System der COBRA NC 630 B in Bild 6 mit indirektem Kühlsystem und direkt von der Pumpenwelle angetriebener Umwälzpumpe des Kühlmittel-Zwischenkreislaufes.



Bild 6: COBRA NC 630 B mit integriertem Kühlkreislauf und integrierter Umwälzpumpe (rechts an der Pumpen-Stirnseite)

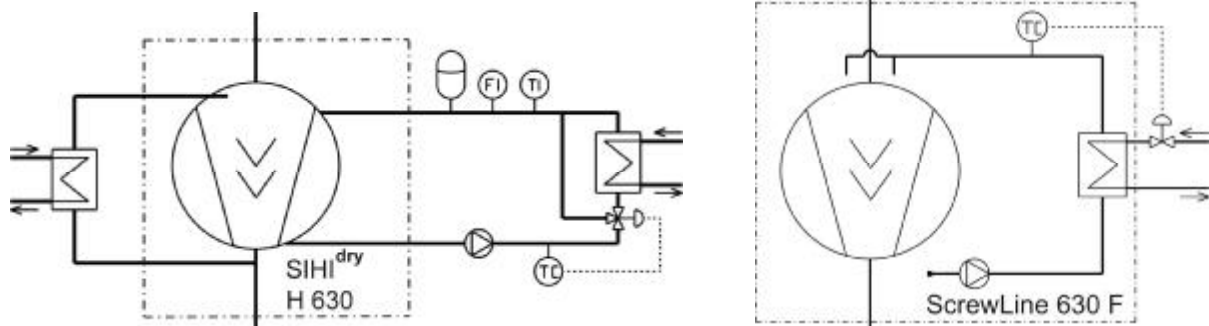
4. Vergleich der Kühlsysteme

In Anlehnung an eine Übersicht aus [5] zeigt die folgende Tabelle 1 den Stand der Technik bei Schraubenvakuumpumpen von drei Herstellern, Sterling SIHI, Leybold und Busch.

Tabelle 1: Schraubenvakuumpumpen der Hersteller Sterling SIHI, Leybold und Busch nach [5,6,7]

| Hersteller | Bezeichnung | Saugvermögen | Verdichtung | Rotor- kühlung | Kühlung | Rotor- Drehzahlen |
|------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|--|----------------------|
| | | m ³ /h | | | | min ⁻¹ |
| Busch | COBRA NC _ A/B | 70 – 2500 | variable Steigung | nein | Wasser/Luft od. Wasser/Wasser indirekt | 3000 - 7000 |
| Leybold | ScrewLine | 250 und 630 | variable Steigung | ja | Öl/Luft oder Öl/Wasser | 5000 - 8000 |
| Sterling SIHI | SIHI ^{dry} M/H/S/V | 100 – 1000 | variable Steigung | indirekt | Wasser direkt/ indirekt | 4500 - 12000 |

Für eine detailliertere Betrachtung der Kühlsysteme wird die Baugröße 630 der drei Herstellerunternehmen herangezogen. Bild 7 zeigt die Fließbilder der drei Kühlkreisläufe.



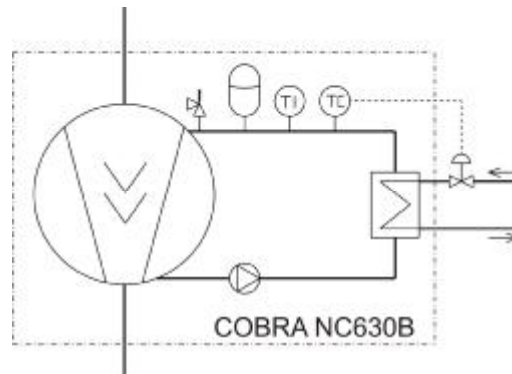


Bild 7: Fließdiagramme der drei Schraubenvakuumpumpen: Sterling SIHI
SIHI^{dry} H 630, Leybold ScrewLine 630 F und Busch COBRA NC 0630 B

Betrachtet werden: für Sterling SIHI die H 630 mit Sekundärkühlkreislauf, für Leybold die ScrewLine 630 und für Busch die NC 630 B. Alle drei Schraubenvakuumpumpen sind hinsichtlich der Kühlsysteme und der Schraubenrotoren selbst sehr unterschiedlich.

Die H 630 von Sterling SIHI kann mit einem geschlossenen Sekundärkühlkreislauf ausgestattet werden, der selbst wiederum über einen Wärmetauscher mit dem Kühlwasseranschluss des Anwenders verbunden wird. In diesem System sind alle üblichen Komponenten eines Kühlkreislaufes separat angeordnet, Umwälzpumpe, Ausdehnungsgefäß, Durchflussanzeiger, Thermostatventil und Wärmetauscher. Darüber hinaus bleibt die Möglichkeit mit einem nachgeschalteten Gaskühler durch Rückführung des gekühlten, trockenen Abgases die Temperatur im Arbeitsraum der Vakuumpumpe abzusenken. Die technische Lösung ist flexibel und auch für schwierige Anwendungsprozesse gut anzupassen. Dennoch, es müssen mehrere kostenrelevante Komponenten einzeln verbaut werden.

Die ScrewLine 630 F von Leybold arbeitet mit einem grundsätzlich einfachen System, bei dem der in der luftgekühlten Ausführung, der ScrewLine 630 eingebaute Luft/Öl-Wärmetauscher durch einen Wasser/Öl-Wärmetauscher mit Temperaturregelventil ersetzt wurde. Zum internen Öl-Kühlkreislauf gehören keine extern angeordnete Ölpumpe oder ein Ausdehnungsgefäß. Die Ölpumpe ist am Antriebsmotor angeordnet und der Getrieberaum stellt zugleich das Ausdehnungsgefäß dar. Der Öl-Kühlkreislauf ist nicht zuletzt durch die verwendeten Materialien (Aluminiumrotor) und der direkten Rotorinnenkühlung sehr effektiv und mit vergleichsweise niedrigen Herstellkosten zu produzieren. Dem steht die eingeschränkte Flexibilität für manche Anwendungen gegenüber.

Die COBRA NC 630 B von Busch weist ebenso einen eigenen Kühlkreislauf auf, der jedoch vollständig in die Gehäusekomponenten der Schraubenvakuumpumpe integriert ist. Die Umwälzpumpe, die dazu dient, die Temperaturgradienten in der Kühlflüssigkeit so niedrig wie möglich zu halten, wird magnetisch gekuppelt direkt von einem der Schraubenrotoren angetrieben. Als Ausdehnungsgefäß dient ein oben im Zylinder, d.h. ein hier über der Kühlflüssigkeit angeordneter Freiraum, an dem zugleich das Überdruckventil und ein Temperaturmessgerät angebracht sind. Ein spürbarer Vorteil hinsichtlich der Eignung für verschiedene Anwendungen sind die vergleichsweise großen Querschnitte des Kühlrohres in der Vakuumpumpe. Durch diese Ausführung ist es besonders einfach die Schraubenvakuumpumpe an verschiedene Prozesse anzupassen und gleichzeitig die Herstellkosten infolge der geringen Anzahl zusätzlicher externer Komponenten begrenzt zu halten.

5. Sonderausführung einer COBRA-Schraubenvakuumpumpen für Reinigungsanlagen

Als Randbemerkung soll hier kurz eine Anwendung beschrieben werden, bei der das Kühlsystem einer Schraubenvakuumpumpe eher unüblich ist. Reinigungsanlagen für die Reinigung von Teilen, beispielsweise während oder nach einem Fertigungsprozess werden in nahezu allen industriellen Produktionsbetrieben eingesetzt. Vakuum wird hier zur schnellen Trocknung der gereinigten Teile eingesetzt. Darüber hinaus dient es zur Aufbereitung der Reinigungsmedien mittels Vakuumdestillation und zur Aufrechterhaltung eines niedrigen Systemdrucks. Bei den eingesetzten Reinigungsflüssigkeiten handelt es sich vornehmlich um Lösungsmittelgemische basierend auf Kohlenwasserstoffen und modifizierten Alkoholen.

Eine Kühlwasserversorgung steht für diese Anlagen nicht immer zur Verfügung oder sie wird vom Betreiber wegen der erwarteten Betriebskosten nicht gewünscht.

Eine neuartige patentrechtlich geschützte Lösung der Fa. Vapic [8] mit COBRA-Vakuumpumpen zeigt Bild 8. Die in grosser Menge vorhandene Reinigungsflüssigkeit wird direkt als Kühlmedium und zur Energierückgewinnung verwendet. Die Reinigungsflüssigkeit wird durch Kühltaschen im Zylinder der Schraubenvakuumpumpe geleitet. Der eigene

Kühlkreislauf der COBRA besteht nicht mehr. Auch die intern angeordnete Umwälzpumpe wird nicht mehr verbaut. In Bild 8 ist das in den stirnseitigen Deckel der Vakuumpumpe eingearbeitete Gehäuse der Kühlflüssigkeits-Umwälzpumpe noch gut zu erkennen.



Bild 8: Reinigungsanlage der Fa. Vaptic mit einer COBRA NC 0400 B

Der Anwender kann so die in der Schraubenvakuumpumpe anfallende Kompressionswärme direkt zum Aufheizen der Reinigungsflüssigkeit nutzen und mit dieser Lösung die Energiekosten der Anlagenbetreiber spürbar senken.

Für die vorgestellte Anwendung muss die Schraubenvakuumpumpe an das Temperaturniveau der Reinigungsflüssigkeiten (70..110°C) angepasst werden. Zudem müssen alle Komponenten, die mit dem Reinigungsmittel in Berührung kommen, lösemittelkompatibel ausgeführt werden.

Die Flexibilität des Kühlsystems der COBRA hat sich hier beispielhaft bewährt, ohne zusätzliche Kosten bei der Herstellung zu verursachen.

6. Ausblick

Bei den genannten Herstellern von Schraubenvakuumpumpen ist allgemein eine Tendenz in Richtung einfacher ausgestatteter Ausführungen der Maschinen zu erkennen. Von den ursprünglich vorrangig für diejenigen Zielmärkte konzipierten Schraubenvakuumpumpen, in denen die jeweiligen Hersteller bereits etabliert waren, geht man in Richtung allgemeiner Industrieausführungen oder auch zu Ausführungen und Märkten, für die sich die Ursprungspumpen in besonderer Weise qualifiziert haben.

Die neuen überarbeiteten Generationen dieser Schraubenvakuumpumpen zeigen nicht nur Eigenschaften für neue Zielmärkte, sondern deuten indirekt auch auf die negativen Erfahrungen, die mit den Ursprungsversionen gemacht wurden. Im Fokus stehen die Antriebstechnik mit der Optimierung der Wirkungsgrade und die Überarbeitung der Kühlsysteme, wobei hier der Vereinfachung Grenzen gesetzt sind, weil die robusten Schraubenvakuumpumpen durch den Nachteil der im Gegensatz zu anderen Bauarten von Vakuumpumpen aufwendig herzustellenden Schraubenrotoren und infolge der höheren Marktpreise diese Vakuumpumpen zumeist den schwierigeren Anwendungen vorbehalten bleiben.

Schraubenvakuumpumpen sind bis heute auf dem Weg mit Herstellungstechnologien produziert zu werden, die gegenüber alternativen Vakuumpumpen-Bauarten und Kombinationen konkurrenzfähig sind. Parallel zu den noch sinkenden Produktionskosten werden wohl auch die Marktpreise noch fallen und damit für Schraubenvakuumpumpen weiterhin zunehmende Marktanteile und neue Zielmärkte bewirken. Gleichwohl bleibt wahrscheinlich der Ansaugdruckbereich im Grobvakuum, oberhalb von 10 bis 30 hPa abs. anderen Vakuumpumpen, beispielsweise den Klauenvakuumpumpen vorbehalten, die ebenso bemerkenswerte Technologiesprünge aufweisen und sich zudem durch das für diese Bauart typische besonders große spezifische Fördervolumen gegenüber Trockenlaufenden Schraubenvakuumpumpen abheben.

Literatur

- [1] Dr. Kösters, H., Dr. Eickhoff, J.: Dry Vacuum Pump with High Internal Compression. VDI-Berichte Nr. 1932, 2006, 423-428

- [2] Max Wutz: Handbuch Vakuumtechnik, 10. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2010

- [3] Cerbe, G., Wilhelms, G.: Technische Thermodynamik, 15. Auflage, Hanser Verlag, München, 2008

- [4] Tipler, P. A., Mosca, G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, 2007

- [5] Dr. Dreifert, T.: Experiences in production and application of screw vacuum pumps. VDI-Berichte Nr. 1932, 2006, 407-4421

- [6] Trockenlaufende Vakuumpumpen, online Produktbeschreibungen, Sterling SIHI, Itzehoe 2008

- [7] Dry compression vacuum pumps, online catalogue, Leybold, Köln 2010

- [8] EP 1038 992. 2002