

# Trockenlaufende Schraubenspindelvakuumumpen in der Prozessindustrie Anforderungen an die Thermodynamik und deren Umsetzung

Dr. rer. nat. **H. Kösters**, Itzehoe

## Abstract

Dry running vacuum pumps became more and more used in the pharmaceutical and fine chemistry during the last years. In this applications the pumps handle corrosive chemicals and explosive mixtures. The pumps are resistant against corrosion because there is no condensation during the compression, due to the high temperature. In parallel the temperature must be low enough to avoid ignition and polymerisations. This results not only in a special design of the screw, also in the cooling design, additional mechanisms like rotor and gas cooling are used.

## Einleitung

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie finden trockenlaufende Vakuumpumpen eine immer größere Verbreitung. Die Anwendungen sind hier im allgemeinen durch die Förderung korrosiver und explosionsgefährdeter Stoffe charakterisiert.

Bei trockenlaufenden Vakuumpumpen wird die Korrosionsfestigkeit nicht durch den verwendeten Werkstoff, sondern durch die Kondensationsvermeidung während der diabaten Verdichtung erreicht. Gleichzeitig erfordert der Explosionsschutz und die Vermeidung von Polymerisationen und Crackprodukten innerhalb der Pumpe, niedrige Temperaturen im Verdichtungsraum.

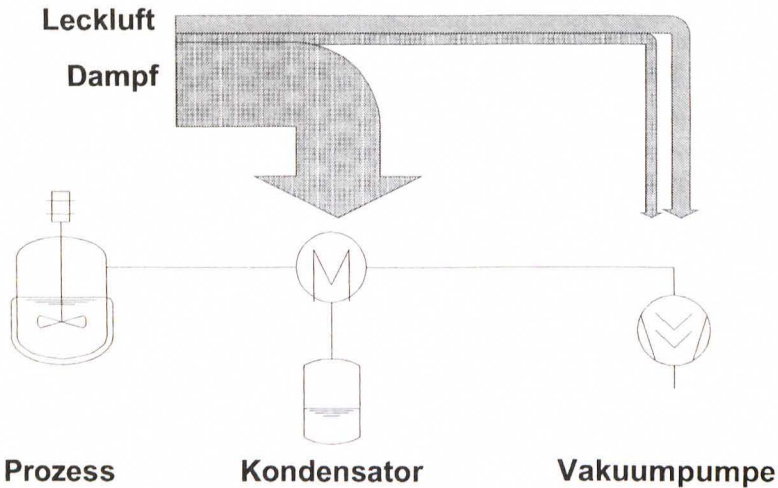
Dies hat Auswirkungen sowohl auf die Auslegung der Schrauben, als auch auf die zusätzlichen Maßnahmen zur thermischen Prozeßführung in der Pumpe, wie Rotorkühlung, Gaskühlung und Auslaßgestaltung.

## Applikationen in der Prozeßindustrie

Vakuum wird in der chemischen Prozeßindustrie fast ausschließlich eingesetzt, um die thermischen Grundoperationen Eindampfen, Destillationen oder Trocknung bei niedrigeren Temperaturen und somit produktschonend ablaufen zu lassen.

Grundfunktion der gesamten Anlage ist daher die Verdampfung bei möglichst niedriger Temperatur und das Absaugen bzw. Kondensieren des Dampfes.

Da die effektivste Methode zur Dampfabsaugung und Kondensation nach wie vor ein Kondensator darstellt, ist dieser in fast allen Applikationen vor geschaltet. Dieser Aufbau ist, stark vereinfacht, in Bild 1. dargestellt.



[Bild1: Vakuumanlagen in der chemischen Industrie]

Wie in diesem Bild ersichtlich, ist die Hauptaufgabe der Vakuumpumpe die Absaugung der dampfgesättigten Inertgase (Leckluft), während der größte Teile des Dampfes durch den Kondensator abgepumpt wird. Dadurch ist der tatsächliche Dampfanteil, der von der Vakuumpumpe abgesaugt wird, sehr stark von den Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur, Leckluft etc.) als auch von der

Abstimmung zwischen Kondensator und Vakuumpumpe abhängig. Die im realen Betrieb auftretenden Abweichungen führen meistens dazu, dass der tatsächliche Dampfanteil in der Pumpe wesentlich höher ist, als bei der Auslegung zu erwarten. Hierdurch unterscheidet sich der Einsatz von Vakuumerzeugern in der Prozeßtechnik erheblich von anderen Applikationen für Verdichter und Vakuumpumpen, da vorwiegend Dämpfe bzw. dampfgesättigte Gasgemische gefördert werden.

Trockenlaufende Vakuumpumpen werden heute bevorzugt in der Pharmazie und Feinchemie eingesetzt. In diesen Bereichen dominieren sogenannte Multipurpose Anlagen, also Produktionsanlagen die für die Produktion oder Aufarbeitung unterschiedlicher Stoffe ausgelegt sind. Daraus ergibt sich auch die Anforderung an das angeschlossene Vakuumsystem, einen weiten Bereich von Einsatzbedingungen abzudecken. Gleichzeitig ist auch eine einfache Umstellung auf verschiedene Stoffe erforderlich, dazu gehört eine weitgehende Unabhängigkeit des Vakuumsystems von dem zu fördernden Stoffgemisch. Der zunehmende Einsatz trockenlaufender Vakuumpumpen ist also nicht nur durch die Sauberkeit des Vakuums, sondern auch durch die bessere Eignung für Vielzweckanlagen motiviert.

Der Arbeitsdruck einer prozeßtechnischen Anlage wird im wesentlichen durch die Temperatur im Kondensator und die Saugvermögenskurve der Vakuumpumpe bestimmt. Aus dem Arbeitsdruck ergibt sich wiederum die erforderliche Temperatur im Reaktor, um den Prozeß in wirtschaftlicher Zeit ablaufen zu lassen.

Ausgehend von den zunehmend höher werdenden Anforderungen an die Qualität der Endprodukte, werden immer niedrigere Arbeitsdrücke gefordert, damit die Prozeßtemperatur gesenkt werden kann. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Kondensatortemperatur, sondern auch auf den erreichbaren Arbeitsdruck der Vakuumpumpe.

### **Auswirkungen auf die Vakuumpumpe**

Da die üblichen Arbeitsdrücke am Saugflansch der Pumpe in der Pharmazie und Feinchemie heute bei 1 bis 10mbar(abs.) liegen und die wechselnden Produkte große Schwierigkeiten mit Kontamination und Entsorgung von Betriebsflüssigkeiten

in der Vakuumpumpe bereiten, werden hier zunehmend trockenlaufende Vakuumpumpen eingesetzt.

Bei der konstruktiven und thermodynamischen Auslegung dieser Pumpen, sowie der späteren Betriebsweise, ist besonders der Dampfförderung Rechnung zu tragen. Da diese Dämpfe im allgemeinen das gesamte Spektrum der eingesetzten Stoffe enthalten, können hier sowohl Wasserdampf, als auch leichtentzündliche Dämpfe, sowie stark korrosive und belagbildende Bestandteile vorliegen.

Durch die niedrigen Ansaugdrücke ergeben sich typische Druckverhältnisse von 100 bis 1000 bei sehr kleinen Massen- und hohen Volumenströmen.

Dies führt natürlich zu hohen Verdichtungstemperaturen, die mit Rücksicht auf den Explosionsschutz und ansonsten auftretender Vercrackungen im Förderraum sicher begrenzt werden müssen. Gleichzeitig eröffnen die hohen Temperaturen, bei richtiger Auslegung, die Möglichkeit, die Kondensation der korrosiven Dämpfe zu vermeiden und somit eine wirksame, kostengünstige Korrosionsbeständigkeit zu erreichen.

### **Aufbau der SIHI<sup>dry</sup>**

Wie die oben beschriebenen Anforderungen an die Vakuumpumpe realisiert werden, soll hier am Beispiel der **SIHI<sup>dry</sup>** gezeigt werden. Der Schwerpunkt wird hierbei auf die Gestaltung der Schrauben und die Kühlung gelegt. Die Baureihe der **SIHI<sup>dry</sup>** Vakuumpumpen ist seit der Markteinführung 1997 kontinuierlich erweitert worden und weltweit in vielen Applikationen, hauptsächlich in der Pharmazie und Feinchemie, im Einsatz.

Die trockenlaufende Vakuumpumpe **SIHI<sup>dry</sup>** ist eine vertikal angeordnete, schnell laufende Schraubenspindelvakuumpumpe, bei der die Schrauben im Förderraum berührungsfrei laufen. Die Synchronisation erfolgt elektronisch. Hierzu ist jede Welle mit ihrem eigenen Motor und einer Winkelerfassung ausgestattet. Über eine eingebaute Elektronik wird dann der erforderliche berührungsfreie Gleichlauf sichergestellt. Der konstruktive Aufbau und die Umsetzung verschiedener Teilaspekte, ist an anderer Stelle schon beschrieben worden.[1,2]

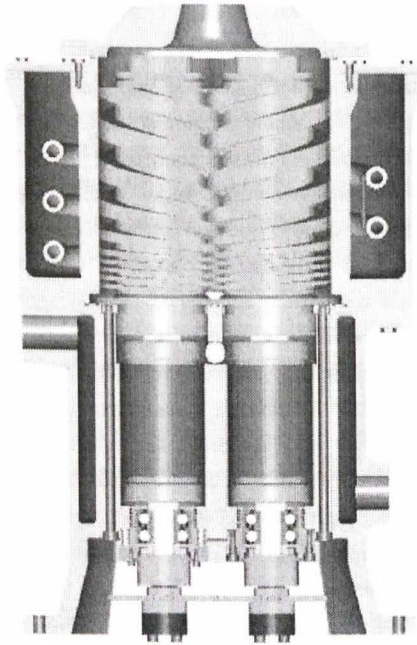
## Schraubengestaltung

Der Gestaltungsprozeß der Schrauben für eine trockenlaufende Vakuumpumpe wird im allgemeinen durch gänzlich andere Randbedingungen dominiert, als dies für Schraubenverdichter der Fall ist. Als erstes ist hier der Enddruck der Pumpe zu nennen, der für die hier beschriebenen Anwendungen unter 1mbar und für andere Vakuumanwendungen noch wesentlich darunter liegen muß. Da der Betrieb bei Enddruck, d.h., bei Liefergrad =0 durchaus ein üblicher Arbeitspunkt für den Dauerbetrieb der Pumpe ist, muß nicht nur auf den Wert, sondern auch auf die Betriebssicherheit der Pumpe an diesem Punkt höchste Aufmerksamkeit gelegt werden. Andererseits ist, gerade in der Verfahrenstechnik, auch der dauerhafte Betrieb bei sehr hohen Ansaugdrücken (bis zu Atmosphärendruck) üblich. Dies bedeutet für die Optimierung der Schrauben, dass neben den Leistungsdaten (Saugvermögen und Enddruck), vor allem die Breite des möglichen Arbeitbereiches (Druckverhältnisse von 1 bis  $\gg 1000$ ) in den Vordergrund tritt.

In dem gesamten Arbeitsbereich müssen die Drücke und Temperaturen innerhalb der Maschine so beherrscht werden, dass die oben beschriebenen Anforderungen bezüglich Zündtemperaturen, Vercracking und Kondensation erfüllt werden.

Entscheidend ist hierfür nicht nur die Beherrschung der Spaltströmungen, die natürlich entscheidenden Einfluß auf Enddruck, Saugvermögen und Temperaturen hat und immer noch Gegenstand aktueller Grundlagenforschung ist [3,4], sondern auch die Verteilung der Verdichtungsarbeit entlang der Schraubenachse.

Hier haben sich in den letzten Jahren Schrauben mit hohem Umschlingungswinkel und veränderlicher Steigung bewährt. Die veränderliche Steigung ermöglicht nicht nur ein inneres Volumenverhältnis zu realisieren, welches die Leistungsaufnahme und somit auch die Temperaturen reduziert, sondern auch die Verteilung der Verdichtungsarbeit und den Wärmeübergang zu optimieren.



[Bild 2: Aufbau **SIHI<sup>dry</sup>** m160]

Die besten Ergebnisse wurden mit einer Schraubengeometrie erzielt, bei der der erste Abschnitt mit konstanter Steigung gefertigt ist, die nach einer Windung kontinuierlich verkleinert wird, woran sich dann wieder zwei Windungen mit konstanter, kleiner Steigung anschließen. Hierdurch wird einerseits ein hohes saugseitiges Kammervolumen erreicht, andererseits steht eine große Oberfläche für die Wärmeabfuhr bei der Verdichtung zur Verfügung. Da die wesentliche Kammerverkleinerung innerhalb der Schraube erfolgt und sich danach noch zwei Umschlingungen mit kleiner Steigung anschließen, ergibt sich zudem eine hohe Zahl von hintereinander geschalteten Kammern und somit ein hoher volumetrischer Wirkungsgrad.

Die Verdichtung innerhalb der Schraube ermöglicht es, auf eine axiale Steuerscheibe zu verzichten und somit die hiermit verbundenen Nachteile zu vermeiden.

## **Kühlung**

Die Arbeitsweise trockenlaufender Vakuumpumpen ist charakterisiert durch die nahezu adiabate Verdichtung sehr geringer Massenströme (bzw. ohne Massenstrom bei Enddruckbetrieb), bei hohen Verdichtungsverhältnissen und niedrigen Ansaugdrücken. Da im Förderraum kein Betriebsmittel vorhanden ist, welches die Verdichtungswärme abführen könnte, gehören trockenlaufende Vakuumpumpen zu den thermisch anspruchsvollen Maschinen.

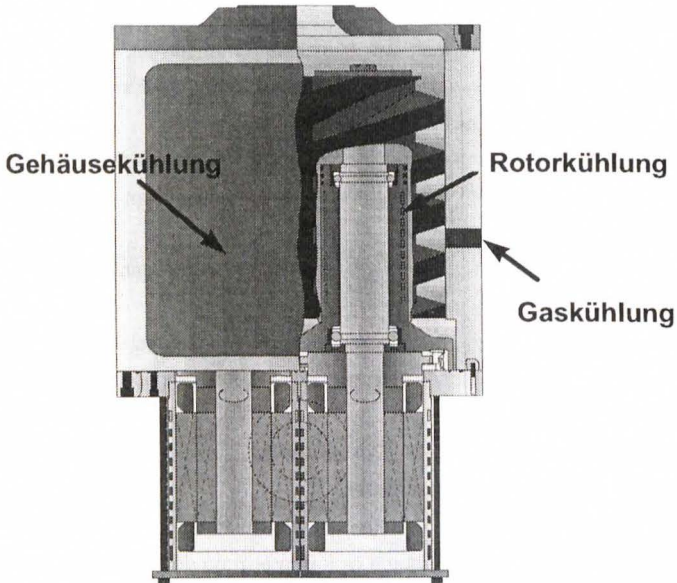
Hieraus ergeben sich folgende Randbedingungen für die Auslegung der Kühlung:

1. Die Abführung der zugeführten Leistung muß unabhängig vom geförderten Massenstrom erfolgen (Enddruckbetrieb).
2. Der Wärmetransport von den Rotoren zum Gehäuse ist durch das vorliegende Vakuum sehr gering.
3. Die Temperaturdifferenzen der Bauteile müssen beherrscht werden, um die Spalte während des Betriebes sicher einzuhalten. Dies betrifft insbesondere den Gehäusespalt.
4. Die Kühlung muß eine maximale Gastemperatur, zur Vermeidung von Zündquellen und Verrackungen sicherstellen.
5. Um die Korrosionsbeständigkeit zu erhalten, ist die Kondensation innerhalb der Pumpe zu vermeiden. Zum Beispiel, durch eine Begrenzung der Wärmeabfuhr im Auslaßbereich der Pumpe.

Ausgehend von diesen Randbedingungen werden heute drei verschiedene Kühlmechanismen genutzt.

Die naheliegende und immer eingesetzte Möglichkeit, ist die Kühlung des Pumpengehäuses. In den Vakuumpumpen für die chemische und pharmazeutische Industrie ist diese Kühlung durchgängig durch eine direkte oder indirekte Flüssigkeitskühlung realisiert.

Insbesondere bei höheren Saugvermögen oder bei besonderen Anforderungen an niedrige Gastemperaturen reicht die Wärmeabfuhr aus dem Rotor alleine über die Wärmeleitung der Welle nicht mehr aus. Hier sind die Pumpen dann zusätzlich mit einer Rotorinnenkühlung ausgestattet. Durch die Rotorinnenkühlung wird nicht nur über den Rotor zusätzliche Wärme abgeführt, gleichzeitig kann auch das Gehäuse wesentlich intensiver gekühlt werden, ohne das hierbei der Gehäusespalt aufgezehrt wird.



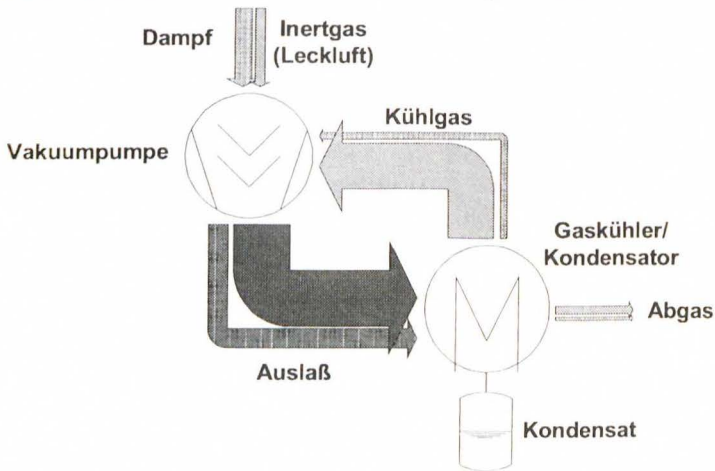
[Bild 3: Kühlung der **SIHI<sup>dry</sup>**]

Die dritte Möglichkeit eine trockenlaufende Vakuumpumpe zu kühlen, besteht in dem Einsatz einer Direktgaskühlung. Hierzu wird in die Förderkammern oder in den Auslaßbereich der Pumpe kaltes Gas gegeben, welches dann einen Teil der Verdichtungswärme aufnimmt. Dieses Gas kann zusätzlich eingespeistes Inertgas sein. Besonders bei größeren Pumpen wird jedoch meistens das Prozeßgas genutzt,



welches vom Auslaß über einen nachgeschalteten Wärmetauscher/Kondensator zurückgeführt wird.

Mit dieser Methode läßt sich auch die scheinbar widersprüchliche Anforderung erfüllen, eine niedrige Gastemperatur in der Pumpe sicherzustellen und gleichzeitig Kondensationen in der Pumpe zu vermeiden. Gerade in den modernen Anlagen der Pharmazie und Feinchemie liegen oft sowohl thermisch instabile, als auch, bei Kondensation, stark korrosive Dämpfe nebeneinander vor. Hier bietet die Gaskühlung eine optimale Lösung. Zum einen wird die Temperatur gesenkt und gleichzeitig über die Verdünnung im Auslaß die Kondensation verhindert, bzw. gezielt im nachgeschalteten Kondensator durchgeführt. Der nachgeschaltete Kondensator muß dann natürlich korrosionsfest ausgeführt sein.



[Bild 4: Funktionsprinzip Gaskühlung]

Ein Nebeneffekt der Gaskühlung ist, dass auch im Enddruckbetrieb der Vakuumpumpe ein ausreichender Massenstrom durch die Pumpe gefördert wird, um mitgeförderte Flüssigkeiten und Verunreinigungen heraus zu fördern. Bei kleinen Fördermengen kann der gleiche Effekt, auch ohne Rückführung, durch Zugabe von Inertgas im Auslaßbereich der Pumpe erreicht werden.

## Auslaßgestaltung

Der kontinuierliche Betrieb mit Dämpfen nahe am Enddruck der Pumpe und die gelegentlich mitgeführte Flüssigkeit (aus dem Prozeß oder zur Reinigung im Betrieb), erfordert besondere Maßnahmen bei der konstruktiven Gestaltung des Auslaßbereiches. Dem wurde bei der **SIHI<sup>dry</sup>** in mehrfacher Hinsicht Rechnung getragen.

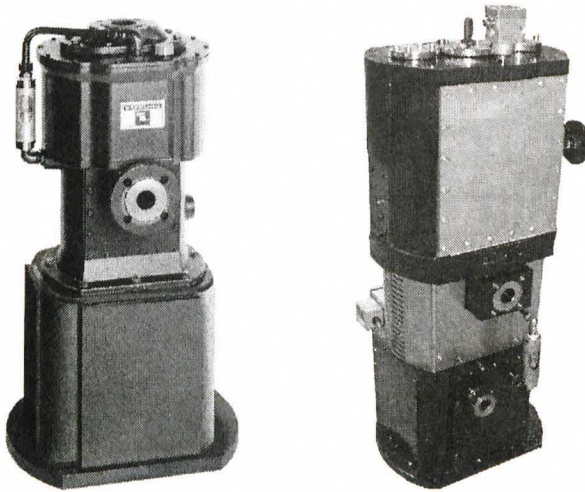
Der freie Ausgang der Schraubenkammern (ohne Steuerscheibe oder Steuerkanten), bei vertikaler Anordnung der Rotoren, ermöglicht den freien Ablauf der mitgeführten Flüssigkeiten, die dann frei zum geodätisch tiefer liegenden Auslaß abfließen können. Darüber hinaus wird durch die Gestaltung der Schraubenausläufe und des Auslaßraums eine intensive Durchmischung und Verteilung des Gases auch im Enddruckbetrieb sichergestellt. Dies ist unabdingbar, um lokale Ablagerungen, Korrosionen und Temperaturspitzen zu vermeiden.

## Auslegung und Betriebsweise

Da die Hauptaufgabe der Vakuumpumpe in verfahrenstechnischen Anlagen das Abpumpen der Leckluft ist, die tatsächliche Leckage einer Anlage aber keinen gut definierbaren Parameter darstellt, wird die Vakuumpumpe immer auf einen zu erwartenden Maximalwert ausgelegt, der auf Erfahrungswerten basiert. Dies führt generell zu einer Überdimensionierung der eingesetzten Vakuumpumpen, die auch erwünscht ist, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit der gesamten Anlage zu erreichen. Auf der anderen Seite ist jedoch ein zu niedriger Ansaugdruck zu vermeiden, damit das Übersaugen zu hoher Dampfanteile aus dem Kondensator und Siedeverzüge bzw. Aufschäumen im Prozeß vermieden wird. Daher wird fast immer das Vakuum auf der Saugseite der Pumpe geregelt. Hier bietet sich an, die Einstellung des Betriebspunktes über die eingebaute Drehzahlregelung zu realisieren und dadurch Betriebskosten zu sparen.

Über den Betriebspunkt hinaus wird die Auslegung und Ausstattung im wesentlichen durch den Explosionsschutz (maximal zulässige Temperaturen) und das Verhalten der Dämpfe innerhalb der Pumpe (Kondensation, Bildung von Belägen etc.)

bestimmt. Um eine möglichst hohe Verfügbarkeit zu erreichen, hat sich die regelmäßige Reinigung der Pumpe, durch Förderung einer geeigneten Flüssigkeit bei niedriger Drehzahl, sowie das Nachspülen mit Inertgas beim Abschalten der Pumpe bewährt.

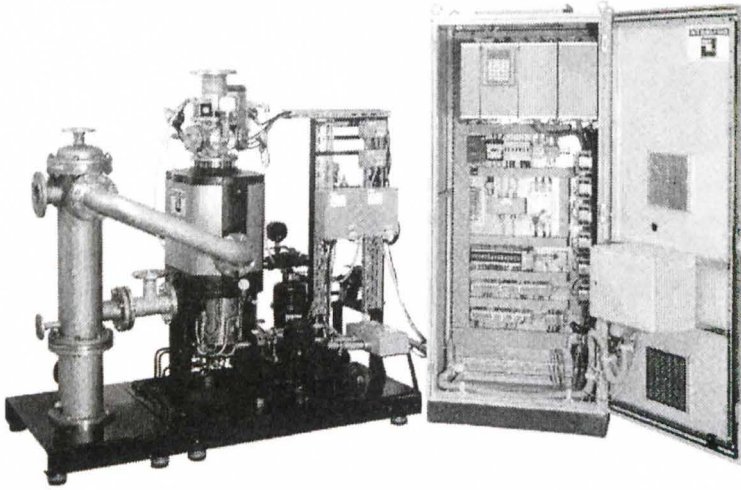


[Bild 5: **SIHI<sup>dry</sup>** 160 ohne und mit Rotorkühlung]

Um diese zusätzlichen Funktionen zu realisieren stehen in der **SIHI<sup>dry</sup>** Familie nicht nur unterschiedliche Pumpentypen für verschiedene Saugvermögen und thermische Auslegungen zur Verfügung, es wird auch ein System von standardisierten und bewährten Zubehörmodulen angeboten. Hiermit kann zusammen mit der integrierten Steuerung, ein auf die jeweiligen Prozeßanforderungen angepasstes System zusammengestellt werden.

Da die Temperatur und daher auch die Auslegung der Kühlung naturgemäß vom Saugvermögen und der Verdichtungsleistung abhängt, stehen insbesondere bei den kleinen und mittleren Saugvermögen verschiedene Pumpenausführungen zur

Verfügung. Daher kann bei kleinen und mittleren Saugvermögen wahlweise auch auf die Rotorkühlung bzw. Gaskühlung verzichtet werden.



[Bild 6: SIHI<sup>dry</sup> Anlage mit Gaskühler/Kondensator (1000 m<sup>3</sup>/h)]

## Betriebserfahrungen

In den letzten Jahren wurde eine große Anzahl von Systemen mit Saugvermögen von 160 bis 1000m<sup>3</sup>/h (teilweise noch höhere Saugvermögen durch vorgeschaltete Wälzkolbenpumpen) installiert. Der Hauptanwendungsbereich liegt hierbei in der Pharmazie und Feinchemie. Man kann heute sagen, dass die Technik ihre Bewährungsprobe bestanden hat und zunehmend auf dem Weg zu einer etablierten Standardtechnologie in der Vakuumherzeugung ist.

Die meisten Betriebsprobleme entstehen, wenn bei der Umrüstung von Anlagen von Flüssigkeitsringpumpen auf trockenlaufende Vakuumpumpen das andere Betriebsverhalten (niedrigerer Enddruck, höher Temperaturen etc.) nicht berücksichtigt wird. Eine falsche Auslegung oder nicht angepaßte Fahrweise, kann dann, insbesondere beim Ab- oder Anfahren der Pumpe, zu Produktansammlungen bzw. Belägen innerhalb der Pumpe führen, die zu Betriebsstörungen führen. Darüber hinaus ist bei der Ausführung der Abgasleitung ebenfalls die Kondensationsgefahr zu berücksichtigen, die zu Flüssigkeitsrückstau, Ablagerungen sowie Korrosion in der Abgasleitung führen kann

## Zusammenfassung

Der Einsatz von Vakuumherzeugern in der Prozeßtechnik unterscheidet sich erheblich von anderen Applikationen für Verdichter und Vakuumpumpen, da vorwiegend Dämpfe bzw. dampfgesättigte Gasgemische gefördert werden.

Die Förderung von Dämpfen aus modernen Mehrzweckanlagen stellt hohe Anforderungen nicht nur an die Betriebsmittelfreiheit, sondern auch an die Korrosionsbeständigkeit und an die Sicherheit.

Bei trockenlaufenden Vakuumpumpen wird die Korrosionsfestigkeit nicht durch den verwendeten Werkstoff, sondern durch die Kondensationsvermeidung während der diabaten Verdichtung erreicht. Gleichzeitig erfordert der Explosionsschutz und die Vermeidung von Polymerisationen und Crackprodukten innerhalb der Pumpe

niedrige Temperaturen im Verdichtungsraum. Wie diese gegensätzlichen Forderungen, parallel zu den üblichen Forderungen an Verdichter und Vakuumpumpen (z.B. hoher Liefergrad bei sehr hohem Druckverhältnis) erfüllt werden können, wird im einzelnen beschrieben.

Hierbei wird sowohl auf die Auslegung der Schrauben, als auch auf die zusätzlichen Maßnahmen zur thermischen Prozeßführung in der Pumpe, wie Gaskühlung und Auslaßgestaltung eingegangen.

## Literatur

- [1] Kösters, H.        Neues Konzept für Schraubenvakuumpumpen  
                          in der Prozeßtechnik  
                          In: VDI-Berichte Nr. 1391, 1998, S. 95-105
- [2] Kösters, H.        Leckfreiheit durch neues Konzept für  
                          trockenlaufende Vakuumpumpen  
                          In: Leckfreie Pumpen, Verdichter und Vakuumpumpen  
                          Gerhard Vetter (Hrsg.) - Essen: Vulkan-Verl., 1998
- [3] Wenderott, D.     Spaltströmungen im Vakuum  
                          VDI Fortschrittsberichte, Reihe 7, Nr. 423  
                          VDI Verlag Düsseldorf, 2001
- [4] Kauder, K.,        Spaltproblematik in Schraubenspindel-Vakuumpumpen  
    Wenderott, D.     In: VDI-Berichte Nr. 1391, 1998, S. 77-94