

## Produktions- und Betriebserfahrungen mit Schraubenvakuumpumpen

### Experiences in production and application of screw vacuum pumps

Dr.-Ing. T. Dreifert, Leybold Vacuum GmbH, Köln

#### Kurzfassung

Seit ca. 20 Jahren werden Schraubenvakuumpumpen angeboten. Sie haben einen hohen technischen Stand erreicht und sind in vielen Applikationen fest etabliert. Es wird ein Überblick über die technischen Lösungen der europäischen Anbieter gegeben.

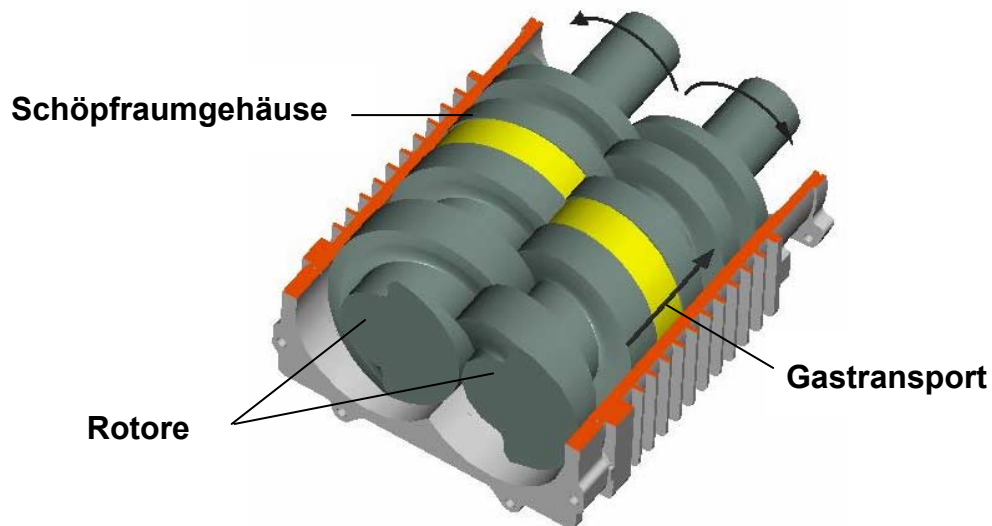


Abb. 1: Funktionsprinzip einer Schraubenvakuumpumpe, Rotore mit variabler Steigung

Fig. 1: Operating principle of a screw vacuum pump, rotors with variable pitch

Seit 2003 werden von der Leybold Vacuum GmbH Schraubenvakuumpumpen der Baureihe „ScrewLine“ produziert und erfolgreich in Industriemärkten vertrieben. Kennzeichen der ScrewLine sind fliegend gelagerte Rotore. Dadurch werden Wellendichtungen und Lager auf der Eintrittsseite der Pumpe – also im Vakuum – vermieden. An einigen Beispielen wird gezeigt, dass Pumpen dieser Bauform sehr robust gegenüber Stäuben und aggressiven Dämpfen sind. Dabei wird auch auf konstruktive Details wie Wellendichtungen und Geräuschreduzierung eingegangen.

Erfahrungen aus der Produktion der ScrewLine bestätigen erneut die Erkenntnis, dass spaltgedichtete, trocken verdichtende Vakuumpumpen sehr sensibel auf Änderungen der Spalthöhen reagieren. Für die Produktion ergibt sich daraus die Notwendigkeit, mit sehr engen Toleranzen zu arbeiten.

### **Abstract**

Since about 20 years screw vacuum pumps are available on the market. In between they reached a high technical level and are well established in many applications. The article gives an overview about technical solutions of different European supplier.

Since 2003 also Leybold Vacuum produces and successfully sells ScrewLine screw pumps into industrial markets. A significant design feature of ScrewLine pumps is the cantilevered rotor design, making bearings and shaft seals on the vacuum side of the rotors obsolete. It is shown that this design concept is extremely robust against dust, particles and aggressive vapours. Some design features as shaft seals and means for noise reduction are discussed. Experiences with the ScrewLine again prove, that dry-running, gap-sealed vacuum pumps react very sensitive towards changes in the clearances between rotors and housing. This results in small tolerances that have to be controlled by the production.

## **1 Technischer Stand von Schraubenvakuumpumpen für industrielle Anwendungen**

Nachdem Schraubenvakuumpumpen seit ca. 20 Jahren im Markt sind, haben sie eine große Verbreitung und einen hohen technischen Stand erreicht. Nach der Halbleiterindustrie und der chemischen Industrie [1 bis 2] werden nun auch zunehmend industrielle Vakuummärkte, wie z.B. Oberflächenbeschichtung, Metallurgie, Verpackungstechnologie und Trocknungsprozesse, erschlossen [3 bis 4]. Der Trend zu trockenverdichtenden Lösungen wird in diesen Märkten vor allem von dem Wunsch nach erhöhter Betriebssicherheit sowie nach Wegfall des Öls als Betriebsmittel getrieben. Die Einsparungen bei den „cost of ownership“ (Wartung, Öl, Ölfilter, ÖlentSORgung, Anlagenstillstand usw.) können erheblich sein.

Inzwischen bieten nahezu alle führenden europäische Hersteller von Vakuumpumpen eigene Modelle an (Tab. 1) [5 bis 23]. Auch in Japan und Korea finden sich mehrere Anbieter. Dagegen scheint die technische Entwicklung bei anderen Technologien für große Trockenläufer, wie vielstufige Klauen- und Rootspumpen, zu stagnieren. Die Vorteile der Schraubenvakuumpumpen gegenüber diesen Pumpen sind für Hersteller und Kunden demnach überzeugend. Diese sind vor allem:

- Geringe Zahl von Bauteilen bei hoher Stufenzahl (Abb. 1)
- Keine Umlenkung des Gasstromes und damit gute Förderfähigkeit für Partikel

➤ Niedriger Schallpegel

Die Pumpengröße reicht von Saugvermögen  $S=70\text{m}^3/\text{h}$  bis zu  $1000\text{m}^3/\text{h}$ . In den industriellen Märkten findet man die größte Modellvielfalt bis etwa  $350\text{m}^3/\text{h}$ . Im Bereich sehr großer Saugvermögen dominieren Kombinationen aus Schraubenvakuumpumpen und Wälzkolbenpumpen (Abb. 4). Bei kleineren Saugvermögen sind der nach wie vor große preisliche Abstand zu Drehschieberpumpen sowie die oft einfacheren Applikationen der Grund für den noch kleinen Marktanteil der Trockenläufer.

Tab. 1: Technische Merkmale verschiedener Schraubenvakuumpumpen europäischer Anbieter [5 bis 23]

Tab. 1: Technical features of different screw vacuum pumps of European supplier [5 to 23]

Anbieter	Baureihe	$S_{\max}$ @ 50Hz [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Innere Verdichtung	Kühlung	Rotor- lager- ung	Rotordreh- zahl [1/min]
Edwards	IDX	950	Variable Steigung	Wasser	2-flutig	3000- 5000
Busch	Cobra N - A	70 - 770	Endplatte	Wasser	2-seitig	3000- 5000
Busch	Cobra NC - B	110 - 720	Variable Steigung	Wasser o. Luft/Wasser	2-seitig	3000- 5000
Leybold	ScrewLine	250 - 630	Variable Steigung	Luft/Öl o. Wasser/Öl	fliegend	5000- 8000
Rietschle	Twister VSA	105 - 650	Endplatte	Wasser	2-seitig	3000- 5000
Rietschle	Twister VSB	80 - 500	Variable Stg. + Endplatte	Wasser	2-seitig	3000- 5000
Sterling SIHI	SIHdry	160 - 1000	Variable Steigung	Wasser	fliegend	> 8000

Der prozentuale Unterschied der Marktpreise zwischen Schraubenvakuumpumpen und Drehschieberpumpen [24 bis 27] ist bei Saugvermögen oberhalb von  $350\text{m}^3/\text{h}$  deutlich geringer als in den kleineren Pumpenklassen. Das liegt vor allem daran, daß Drehschieberpumpen unter  $350\text{m}^3/\text{h}$  in sehr großen Stückzahlen produziert werden und dementsprechend optimiert sind (vgl.  $m/S_{\max}$  in Abb. 2). Zudem wirkt sich der bauliche Aufwand von Schraubenvakuumpumpen (hoch genaue Bauteile, Schraubengeometrie, Lagerung, Getriebe, Dichtungen, Kühlung, Schalldämpfung usw.) bei kleinen Baugrößen überproportional auf die Herstellkosten aus.

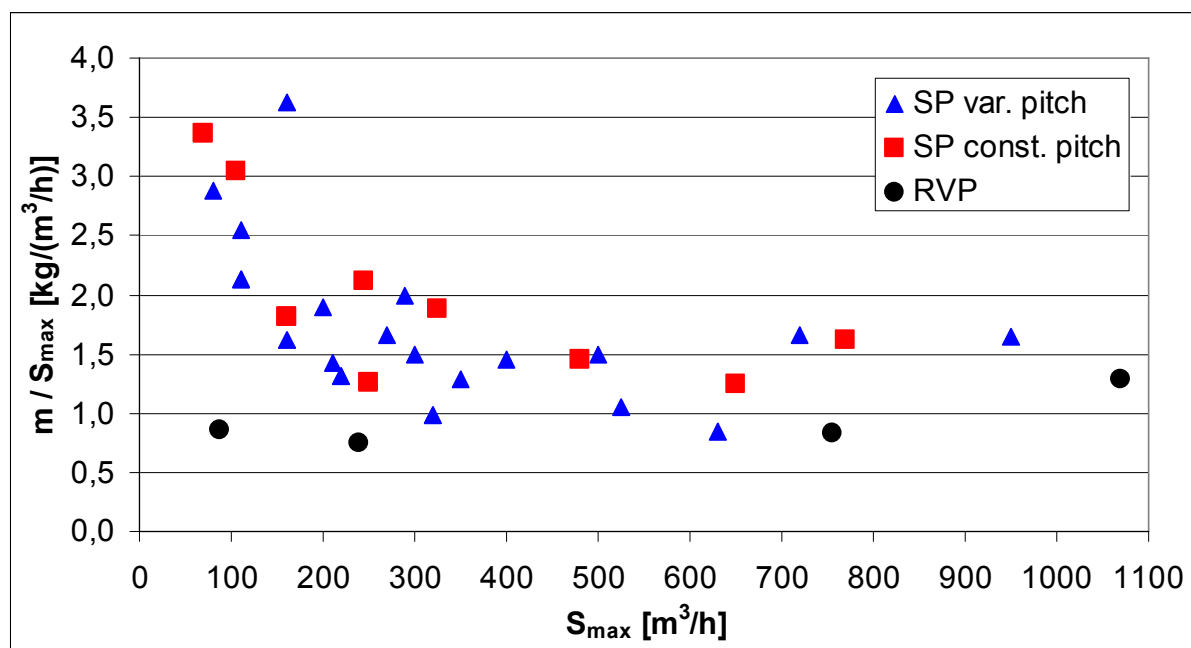


Abb. 2: Pumpenmasse / maximales Saugvermögen  $m/S_{max}$  bei 50Hz in Abhängigkeit von  $S_{max}$ . [5 bis 27] (SP var. pitch: Schraubenpumpe mit variabler Steigung, SP const. pitch: Schraubenpumpe mit konstanter Steigung, RVP: Drehschieberpumpe)

Fig. 2: Mass of pump / maximum pumping speed  $m/S_{max}$  at 50Hz versus  $S_{max}$ . [5 bis 27] (SP: Screw pump, RVP: Rotary vane pump)

In Bezug auf die Leistungsdaten gibt es nur noch geringe Unterschiede zwischen Drehschieber- und Schraubenpumpen. Die meisten Baureihen von Schraubenpumpen werden inzwischen mit innerer Verdichtung durch variable Steigung der Gewindegänge gebaut (Tab. 1, Abb. 6). Dadurch kann die Motor-Nennleistung gegenüber Modellen mit konstanter Steigung reduziert werden (Abb. 3).

Bei der Kühlung überwiegt die Wasserkühlung (Tab. 1), was sich zumindest bei kleineren Saugvermögen nicht mit den Marktgepflogenheiten für Drehschieberpumpen deckt. Hauptgrund für die Wasserkühlung ist denn auch, die hohen Wärmeströme im Bereich der Auslassseite des Verdichtungsraumes zu beherrschen. Im Falle der luftgekühlten ScrewLine von Leybold Vacuum wird dieses Problem vor allem durch die Innenkühlung der Rotoren mit Öl sowie durch die Verwendung von Aluminium für Rotore und Gehäuse gelöst [3, 4, 22, 23]. Schraubenpumpen mit Luftkühlung benötigen aufgrund der Maßnahmen zum Wärmetausch (Kühler, Verrippung, Lüfter, Luftführung etc., Abb. 4) i.d.R. auch einen größeren Bauraum als Pumpen mit Wasserkühlung. Die ScrewLine von Leybold erreicht trotz Luftkühlung den Bauraum von vergleichbaren wassergekühlten Pumpen, was auf die relativ hohen Rotordrehzahlen (Tab. 1) und die integrierte Bauweise zurückgeführt werden kann.

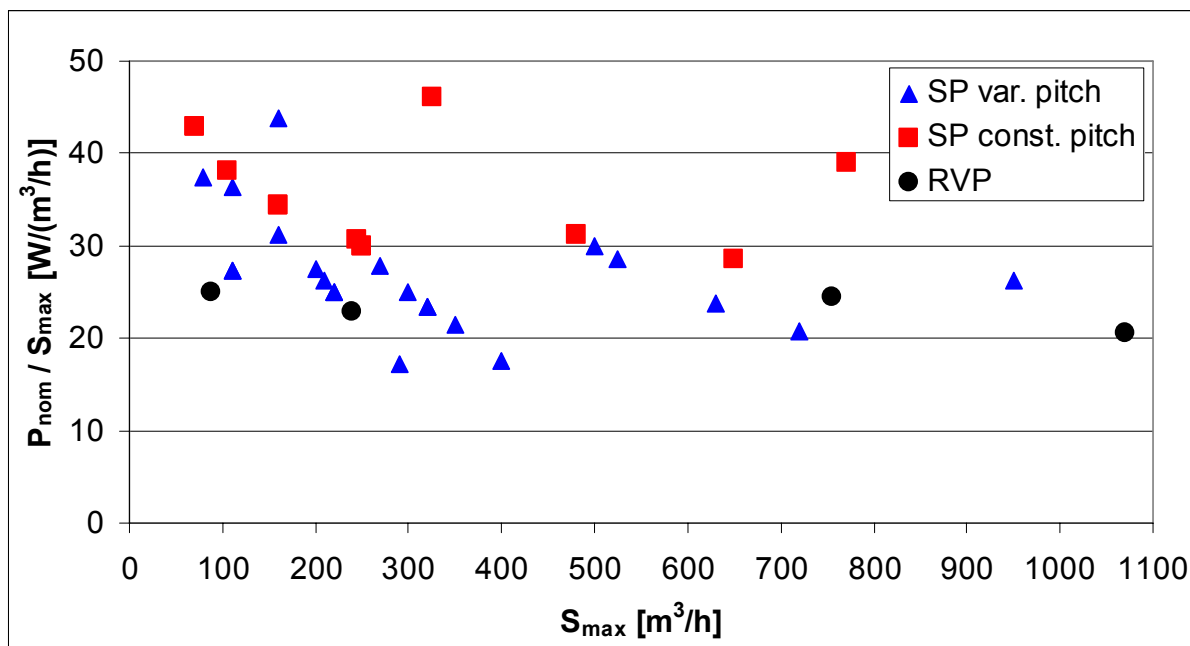


Abb. 3: Motornennleistung / maximales Saugvermögen  $P_{nom}/S_{max}$  für 50Hz in Abhängigkeit von  $S_{max}$ . [5 bis 27] (SP var. pitch: Schraubenpumpe mit variabler Steigung, SP const. pitch: Schraubenpumpe mit konstanter Steigung, RVP: Drehschieberpumpe).

Fig. 3: Nominal motor power / maximum pumping speed  $P_{nom}/S_{max}$  at 50Hz versus  $S_{max}$ . [5 bis 27] (SP: Screw pump, RVP: Rotary vane pump)

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der Baureihen verschiedener Hersteller ist nach wie vor die Bauform der Rotoren bzw. die Lageranordnung (Abb. 5). Fliegend gelagerte Rotore (c) sowie zweiflutige Rotore (b) machen es möglich, auf Lager und Wellendichtungen auf der Saugseite der Pumpe zu verzichten.

Bei der zweiseitigen Lagerung (a) ist an diese Stelle ein höherer Bauaufwand notwendig. Oft werden mehrere Radialwellendichtringe in Reihe eingebaut [13, 14], um eine ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen. Die saugseitigen Lager werden entweder mit Öl [5, 6] oder mit Fett [13, 14] geschmiert.

## 2 Anwendungsbeispiele

Der Erfolg der Schraubenpumpen erklärt sich in vielen Fällen aus ihrer großen Robustheit und den niedrigen Betriebskosten. Zwei Einsatzbeispiele zeigen dies anhand der ScrewLine von Leybold Vacuum.



Abb. 4: ScrewLine SP630 mit direkt geflanschter Wälzkolbenpumpe WAU2001 (eine Verkleidungsseite ist geöffnet).

Fig. 4: ScrewLine SP630 with directly coupled WAU2001 blower (one side of the enclosure is opened)

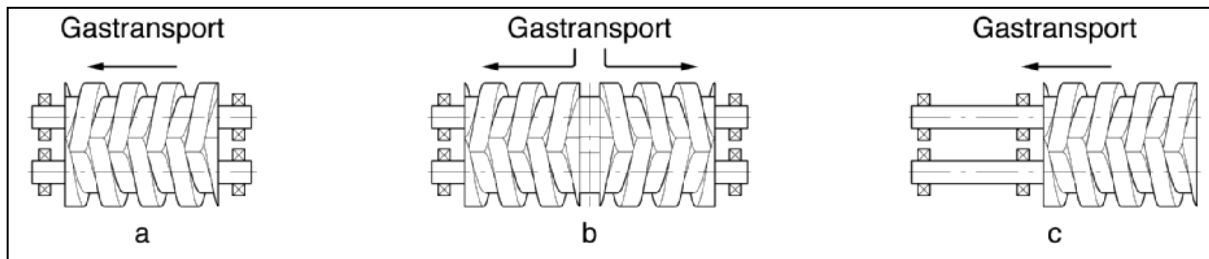


Abb. 5: Lagerungskonzepte von Schraubenvakuumpumpen, a: „zweiseitig“, b: „zweiflütig“ und c: „fliegend“

Fig. 5: Bearing options of screw vacuum pumps, a: double sided, b: herringbone, c: cantilevered

## 2.1 Einsatz der ScrewLine in Metallurgieprozessen

Viele metallurgische Schmelzprozesse finden heute unter Vakuum statt. Die dabei abgesaugten Gase, Dämpfe und Stäube werden zwangsläufig durch die Vakuumpumpen gefördert. Auf Grund dieser extremen Beanspruchung, fordert der Einsatz von ölgedichteten Pumpen meist aufwendige Einlassfilter und sehr häufige Ölwechsel (ggf. sogar mehrmals pro Woche).

Abb. 6: Rotoren einer SP630 nach Förderung großer Mengen feinen Staubes vor der Reinigung

Fig. 6: Rotors of a SP630 after pumping of large amounts of dust before cleaning



Auch aggressive Chemikalien sind nicht selten. So müssen bei der Gewinnung von Titan Chloride und Wasserdampf in erheblichen Mengen gefördert werden. Selbst Sperrschieberpumpen mit vorgeschaltetem Staubfilter erfordern einen wöchentlichen Ölwechsel und erreichen trotzdem nur Standzeiten von unter zwei Jahren.

In einem konkreten Fall ersetzt eine ScrewLine SP630 drei 250'er Sperrschieberpumpen. Die Pumpe wird mit Gasballast und Sperrgas für die Wellendichtungen betrieben. Sie wird 1-

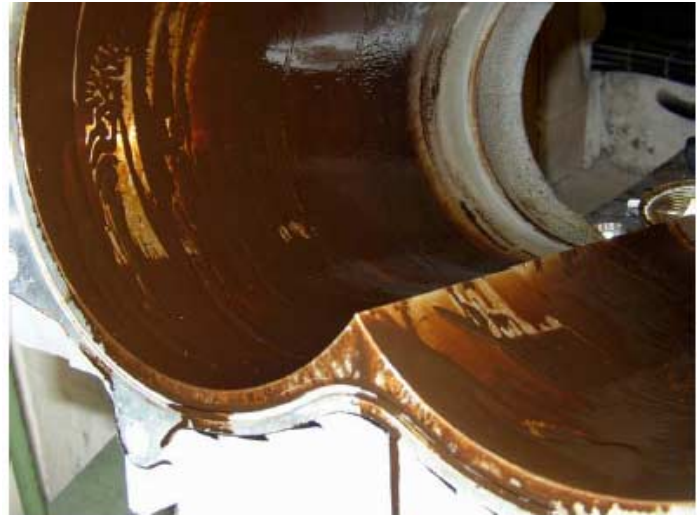
bis 2-mal pro Jahr von angelagerten Stäuben gereinigt. Dies ist aufgrund der fliegenden Lagerung der Rotoren problemlos vor Ort möglich (Abb. 6, Abb. 7). Für die Demontage, Reinigung und Wiedermontage der Pumpe wird etwa eine Stunde beansprucht. Weitere Wartungsarbeiten waren bislang nicht notwendig. Korrosion und Verschleiß werden dabei durch die hart anodisierten Rotoroberflächen und durch die Lackierung der Gußoberflächen wirkungsvoll vermieden.

## 2.2 Einsatz in Sinterprozessen

Sinterprozesse zur Herstellung von Hartmetallteilen (Bohrer, Schneidplatten, Halbzeuge etc.) beinhalten Prozessschritte unter Vakuum bei denen große Mengen von Bindemittel abdampfen. Hierbei handelt es sich zumeist um Paraffine oder Polymere (z.B. PEG, PP, PE) die sich, ähnlich dem zuvor beschriebenen Beispiel, in der Vorvakuumpumpe wiederfinden.

Abb. 7: Rotorgehäuse einer SP630 nach Förderung von Sinterwachs vor der Reinigung

Fig. 7: Rotor housing of a SP630 after pumping of sintering wax before cleaning



In ölgedichteten Pumpen bewirken die vercrackten Kohlenwasserstoffe des Bindemittels ein Eindicken des Öls und als Folge dessen ein Verstopfen der Ölkänae. Das kann zu unerwarteten Pumpenausfällen führen, die sich letztlich nur durch häufige Ölwechsel verhindern lassen.

In trockenverdichtenden Pumpen führen die Polymere über die Betriebsdauer hinweg zu einer anwachsenden Belagsbildung. Bei Einsatz der ScrewLine können ungeplante Stillstände durch übermäßige Beläge jedoch sicher vermieden werden. Dazu wird die Pumpe mit dem Monitoring-System SP-Guard ausgestattet, dessen kontinuierliche Auswertung des Körperschalls die Bildung von Belägen frühzeitig erkennen läßt. Nach Überschreiten einer Warnschwelle kann eine Reinigung der Pumpe gezielt geplant werden. Die Durchführung der Reinigung erfolgt dann mit wenig Aufwand vor Ort.





Abb. 8: Rotor einer ScrewLine SP630 nach Förderung von Sinterwachs vor (links) und nach der Reinigung mit Wasser im Betrieb (rechts)

Fig. 8: Rotor of a ScrewLine SP630 after pumping of sintering wax before (left) and after (right) cleaning by water flushing

Die Reinigung kann durch Handreinigung nach der Demontage des Rotorgehäuses oder durch Spülen erfolgen. Das Spülen findet bei laufender Pumpe mit wenigen Litern Leitungswasser statt und erzielt schon bei einmaliger Anwendung beachtliche Resultate (Abb. 8). Der Spülprozess kann so sehr einfach automatisiert werden.

### 3 Technische Details am Beispiel der Leybold ScrewLine Baureihe

Die Leybold ScrewLine Modelle (s. Abb. 4, 10) nutzen die Vorteile der Schraubenpumpen und sind auf die Anforderungen der industriellen Märkte hin optimiert. Das wirkt sich auch auf einige der technischen Detaillösungen aus, von denen einige hier kurz erläutert werden sollen.

### 3.1 Gestaltung der Wellendichtungen

Durch die fliegende Lagerung der Rotoren der ScrewLine brauchen nur an der Auslassseite der Rotoren Dichtungen vorgesehen werden. Die wichtigsten Anforderungen an diese Dichtungen sind:

- Vermeidung von Ölleckage aus dem Getriebe in den Schöpfraum
- Vermeidung des Austritts von Prozessmedien in die Umgebung und ins Getriebe
- Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 35 m/s
- Niedrige Herstellkosten
- Druckdifferenz bis zu 200mbar
- Hohe Robustheit

Diese Anforderungen werden durch eine berührungsfrei arbeitende Dichtung erfüllt, die mehrere Dichtungsprinzipien kombiniert (Abb. 9). In der Mitte der Dichtung ist eine zur Umgebung belüftete Drainagekammer angeordnet. Dadurch ist die Dichtung zum ebenfalls belüfteten Getriebe frei von Differenzdruck. Ein mehrstufiges Fanglabyrinth hält das Öl im Getriebe.

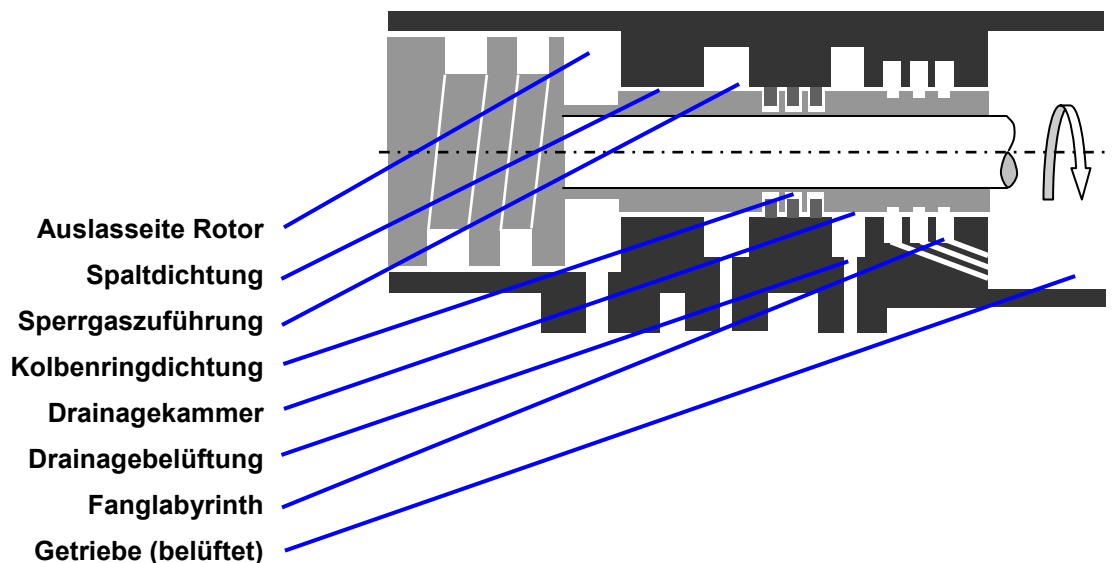


Abb. 9: Prinzip der Wellendichtung der ScrewLine

Fig. 9: Principal drawing of a ScrewLine shaft seal

Zum Schöpfraum hin drosseln mehrere Kolbenringe die Leckage bei Auslassdrücken, die bis zu 200mbar vom Umgebungsdruck abweichen können. Vor den Kolbenringen ist noch eine Nut und eine Spaltdichtung zum Schutz der Dichtung mit Sperrgas vorhanden.

Die unter 2. aufgeführten Anwendungsbeispiele zeigen, dass diese Dichtungsanordnung auch unter sehr schwierigen Verhältnissen äußerst zuverlässig funktioniert. Radialwellendichtungen hat sie voraus, dass sie auch bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten sowie bei hoher Staubbelastung über mehrere Jahre zuverlässig arbeitet. Gegenüber der Gleitringdichtung hat sie Vorteile bei den Kosten und der Standzeit sowie dadurch, dass sie keine Ölleckage in den Arbeitsraum zur Folge hat.

### 3.2 Schallreduzierung

Wie alle Verdrängermaschinen erzeugen auch Schraubenvakuumpumpen erhebliche Schalleistung. Bei den Schraubepumpen der ersten Generation (Tab. 1, „Endplatte“), ist das Problem sehr ausgeprägt, weil die Verdichtung gegen eine Endplatte mit einem kleinen Auslassfenster und Steuerkanten erfolgt. Dabei wird der Auslass schlagartig bei jeder Rotordrehung geöffnet. Maschinen mit einer offenen Rotordruckseite sind hier günstiger, weil das Ausschleiben kontinuierlich erfolgt (Abb.1).

Abb. 10: ScrewLine SP250 mit Verkleidung  
und Schalldämpfer

Fig. 10: ScrewLine SP250 with enclosure and  
silencer



Jedoch ist auch bei solchen Maschinen ein Schalldämpfer notwendig, wenn die Pumpe mit offenem Auslass betrieben werden soll (Tab. 2). Durch einen Absorptionsschalldämpfer kann jedoch eine sehr gute Schalldämmung erreicht werden.

Im Falle von luftgekühlten Maschinen, wie der ScrewLine, ist zusätzlich die Kühlluft eine Geräuschquelle, während der Wassermantel bei wassergekühlten Maschinen dämpft. Im Falle der ScrewLine führt die Pumpenverkleidung die Kühlluft und dämpft auch den Schall

(Tab. 2). So erreicht die ScrewLine die Schallpegel der wassergekühlten Wettbewerber und den gleich großer Drehschieberpumpen.

Tab. 2: Schalldruckpegel (nach ISO 2151) der ScrewLine SP630 im Enddruckbetrieb abhängig von Maßnahmen zur Schalldämpfung, Meßwerte: Leybold Vacuum GmbH

Tab. 2: Sound pressure level (according to ISO 2151) for ScrewLine SP630 including different noise reducing measures, Leybold Vacuum data

Mit Verkleidung, offener Auslas	88,7 dB(A)
Mit Verkleidung und Schalldämpfer	73,4 dB(A)
Ohne Verkleidung, mit Schalldämpfer	78,5 dB(A)

### 3.3 Seriensteuerung vakuumtechnischer Leistungsdaten

Es ist bekannt, dass spaltgedichtete Verdrängermaschinen sehr empfindlich auf Änderungen der Spalthöhen reagieren. Bei Vakuumpumpen ist dieses Phänomen besonders stark ausgeprägt, weil i.d.R. sehr hohe Druckverhältnisse beherrscht werden müssen. Außerdem wirkt sich der Druckbereich, in dem die Spalte dichten müssen, sehr stark auf die Leckage aus. Spalte, die bei niedrigen Drücken aufgrund von molekularer Strömungsform sehr dicht sind, werden sehr viel lässiger, wenn der Druck steigt und die Strömung viskos wird [28 bis 31].

Diese Zusammenhänge haben zur Folge, dass Schraubenvakuumpumpen sehr kritisch auf zu große Spalthöhen oder auch auf Drehzahlabenkungen reagieren. Dabei fällt auf, dass bei zu großen Spalten nicht nur der Enddruck „zusammen bricht“ sondern sich zusätzlich das maximale Saugvermögen deutlich reduziert (Abb. 11, Wertepaar ganz rechts). Bei zu engen Spalten ist die Betriebssicherheit nicht mehr gegeben (Abb. 11, Wertepaar ganz links). Für die Serienproduktion müssen die Form- und Lagetoleranzen deshalb sehr sorgfältig festgelegt werden. Pumpenkonzepte mit relativ großen Kaltspalthöhen, z.B. aufgrund hoher Rotordrehzahlen oder hoher Stufenzahl, sind hier im Vorteil. Die Problematik spiegelt sich auch in Katalog-Toleranzangaben von z.B.  $\pm 10\%$  für das Saugvermögen von Serienpumpen wieder [5 bis 10].

Verschleiß der Rotoren kann sich natürlich ebenfalls erheblich auf Enddruck und Saugvermögen auswirken, wenn sich die Spalthöhen signifikant ändern. Insofern sind Beschichtungen der Rotoren mit weichen Materialien (z.B. Gleitlacke) kritisch zu bewerten, wenn Staub und Partikel gefördert werden müssen (z.B. in metallurgischen Applikationen).

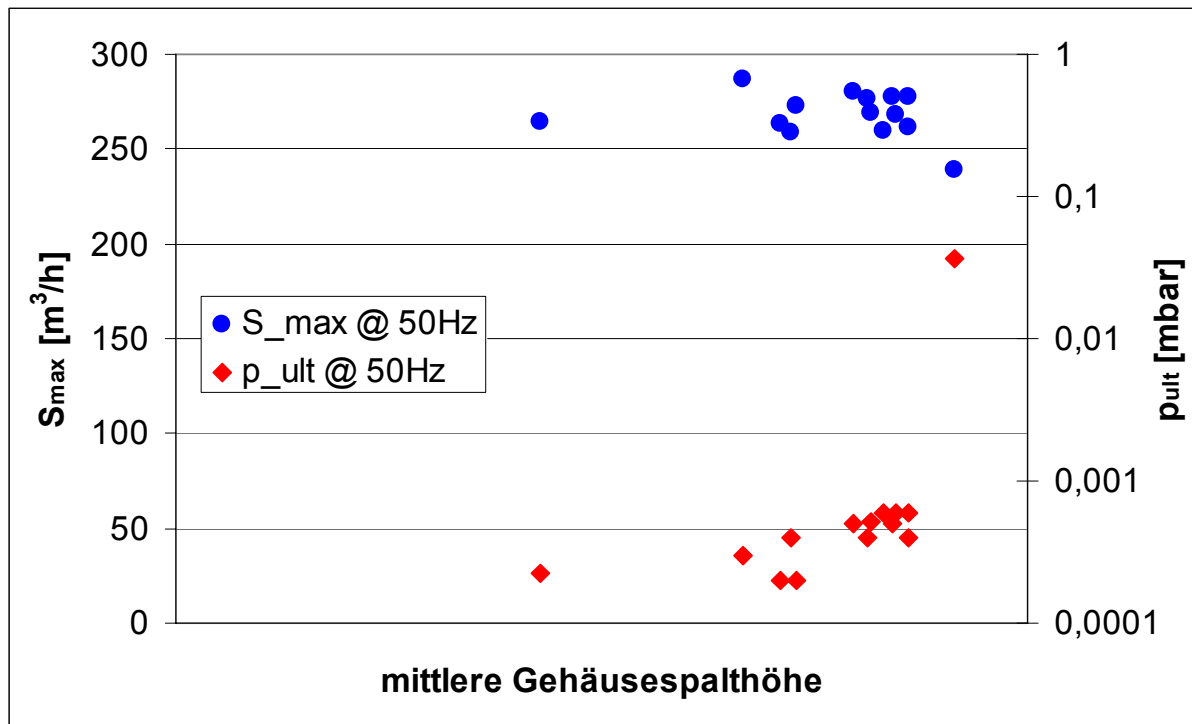


Abb. 11: Enddruck  $p_{ult}$  und maximales Saugvermögen  $S_{max}$  in Abhängigkeit von der mittleren Gehäusespalthöhe für ein Fertigungslos aus dem Serienanlauf der ScrewLine SP250, Messwerte Leybold Vacuum GmbH.

Fig. 11: Ultimate pressure  $p_{ult}$  and maximum pumping speed  $S_{max}$  by average rotor to housing gap for an early serial lot of ScrewLine SP250, Leybold Vacuum data

#### 4 Fazit

Schraubenvakuumpumpen sind aus Sicht des Produzenten weiterhin sehr anspruchsvolle Maschinen. Für den Anwender vereinfachen sie jedoch viele der Applikationsprobleme erheblich. Deshalb setzen sie sich immer weiter durch. Mit steigenden Stückzahlen und fertigungstechnischen Fortschritten wird der preisliche Abstand zu den ölgedichteten Pumpen in den nächsten Jahren weiter sinken. Dadurch wird sich die Verbreitung von Schraubenvakuumpumpen zusätzlich beschleunigen.

#### 5 Literaturverzeichnis

- [1] Kösters, H.: Neues Konzept für Schraubenvakuumpumpen in der Prozeßtechnik, VDI-Berichte 1931, S.95-105, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [2] Kösters, H.: Trockenlaufende Schraubenspindelvakuumpumpen in der Prozessindustrie; Anforderungen an die Thermodynamik und deren Umsetzung, VDI-Berichte 1715, S. 281-294, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002

- [3] Dreifert, T., Rofall, K.: Trockenlaufende Schraubenspindelvakuumumpen für industrielle Vakuumanwendungen, VDI-Berichte 1715, S. 267-280, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002
- [4] Dreifert, T. Zöllig, U. Stahlschmidt, O.: Erfahrungen mit der Leybold ScrewLine in industriellen Anwendungen, Vakuum in Forschung und Praxis, 17. Jahrgang, No. 2 2005, S. 87 - 90
- [5] Cobra N 0070 – 0900 A, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [6] Cobra NC 0100 – 0300 B, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [7] Cobra NC 250 B, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [8] Cobra NC 400 B, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [9] Cobra NC 630 B, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [10] Cobra NC 900 B, Prospekt, Dr.-Ing. K. Busch GmbH, 2006
- [11] TWISTER VSA, D 830/1, Prospekt, Rietschle Thomas GmbH Co. KG, Schopfheim, 2004
- [12] TWISTER VSB, D 831/1, Prospekt, Rietschle Thomas GmbH Co. KG, Schopfheim, 2004
- [13] Betriebs- und Serviceanleitung TWISTER VSA, B 830, Rietschle Thomas GmbH Co. KG, Schopfheim, 1999
- [14] Betriebs- und Serviceanleitung TWISTER VSB, B 831, Rietschle Thomas GmbH Co. KG, Schopfheim, 2002
- [15] IDX1000, A70901895, Prospekt, BOC Edwards, Crawley, UK, 2005
- [16] SIHIdry M160, 133.76103.53.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2002
- [17] SIHIdry H160, 133.76104.51.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2002
- [18] SIHIdry H250, 133.76104.54.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2004
- [19] SIHIdry H400, 133.76105.52.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2004
- [20] SIHIdry H750, 133.76101.54.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2002
- [21] SIHIdry H1000, 133.76106.51.01, Prospekt, Sterling SIHI GmbH, Itzehohe, 2002
- [22] ScrewLine SP630, Kat. Nr.: 117023, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006
- [23] ScrewLine SP250, Kat. Nr.: 115004, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006
- [24] SOGEVAC SV 100 B, Kat. Nr.: 960524, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006
- [25] SOGEVAC SV 300, Kat. Nr.: 10931, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006

- [26] SOGEVAC SV 750, Kat. Nr.: 95675, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006
- [27] SOGEVAC SV 1200, Kat. Nr.: 10970, Prospekt, Leybold Vacuum GmbH, Köln, 2006
- [28] Kauder, K., Wenderott, D.: Spaltproblematik in Schraubenspindel-Vakuumpumpen, VDI-Berichte 1931, S.77-94, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [29] Wenderott, D.: Spaltströmungen im Vakuum, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 7, Nr. 423, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [30] Kauder, K., Wenderott, D.: Gasspaltströmungen in Schraubenspindel-Vakuumpumpen, Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergiemaschinen, Nr. 6, S. 5-19, Universität Dortmund, 1998
- [31] Kauder, K., Wenderott, D.: Der Spaltformwiderstand von Strömungen im Vakuum, Schraubenmaschinen, Forschungsberichte des FG Fluidenergiemaschinen, Nr. 9, S. 93-103, Universität Dortmund, 2001