

Vakuum Formeln

Vakuumpumpen

W. Jitschin

Wichtige Kenngrößen einer Vakuumpumpe sind ihr Saugvermögen und ihr Kompressionsverhältnis.

1 Saugvermögen

Das **Saugvermögen** einer Vakuumpumpe ist der Volumenstrom des Gases, das aus einem Vakuumgefäß durch die Pumpe entfernt wird (DIN 28400, Teil 2), also

$$S = dV/dt \quad (1)$$

Tatsächlich hängt der Volumenstrom von der Art der Einstromung des Gases in die Pumpe und damit von der Form des Vakuumgefäßes insbesondere im Bereich des Pumpenanschlusses ab [1]. um eindeutige Angaben des Saugvermögens zu erhalten, hat man Meßaufbau und Meßverfahren in Normen genau festgelegt. Als Vakuumgefäß wird ein Meßdom verwendet, der den gleichen Querschnitt wie der Pumpeneinlaß besitzt und direkt auf der Pumpe aufgesetzt wird (Abb. 1). Bei kleinem Querschnitt des Pumpeneinlasses wird ein größerer Meßdom über ein konisches Reduzierstück aufgesetzt. Der genormte Meßdom bietet ferner die Vorteile, daß er ein recht kleines Vakuumgefäß ist und daß er eine gerichtete Gassströmung in die Pumpe hinein erzeugt, wodurch sich recht hohe Werte des Saugvermögens ergeben.

Zur **Saugvermögensmessung bei beständiger Strömung** wird ein stationärer Gasstrom (pV-Durchfluß q_{pV}) in den Meßdom eingespeist und der statische eingangsseitige Druck p_{ein} der Pumpe im unteren Teil des Meßdoms gemessen. Details des Meßvorgangs

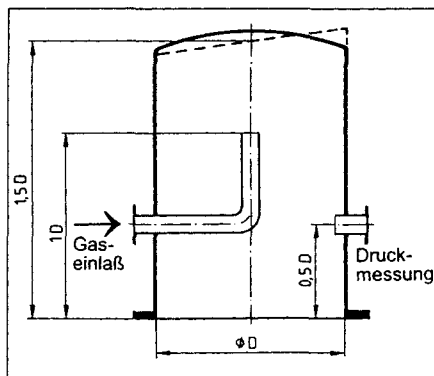


Abb. 1: Meßdom zur Messung des Saugvermögens

sind – je nach Pumpentyp – in verschiedenen Abnahmeregeln festgelegt:

Drehkolbenvakuumpumpen	DIN 28426
Treibmittelpumpen	DIN 28427
Turbomolekularpumpen	DIN 28428
Ionengerterpumpen	DIN 28429

Das Saugvermögen wird nach folgender Formel bestimmt:

$$S = q_{pV} / p_{\text{ein}} \quad (2)$$

Teilweise werden noch Korrekturen auf den **Enddruck** angebracht, also der Druckwert, dem sich der Druck bei üblichem Betrieb der Pumpe ohne Gaseinlaß nach längerer Pumpzeit asymptotisch nähert.

Im Fall von Verdrängervakuumpumpen (oszillierende oder rotierende Bewegung) läßt sich das Saugvermögen aus den Pumpendaten näherungsweise

ausrechnen. Es ergibt sich als Produkt aus dem (je Umdrehung wirksamen) Volumen des Schöpfraums und der Drehzahl n der Pumpe und wird **Nennsaugvermögen** S_N genannt (DIN 28426):

$$S_N = V \cdot n \quad (3)$$

Wegen verschiedener Verluste (z. B. unvollständige Füllung des Schöpfraums mit Gas, Rückströmung innerhalb der Pumpe) ist das tatsächliche Saugvermögen einer Vakuumpumpe kleiner als das Nennsaugvermögen.

Als **effektives Saugvermögen** S_{eff} einer Vakuumpumpe bezeichnet man das an einem Vakuumgefäß zur Verfügung stehende Saugvermögen. Dieses ist kleiner als das Saugvermögen S der Pumpe, wenn das Verbindungsstück zwischen Vakuumgefäß und Pumpe einen zu berücksichtigenden reduzierten Leitwert C besitzt. Es gilt:

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (4)$$

Als **Saugleistung** einer Vakuumpumpe definiert man den pV-Durchfluß des gepumpten Gases:

$$q_{pV} = p_{\text{ein}} \cdot S \quad (5)$$

2 Auspumpverhalten

Liegt der Druck in einem Vakuumgefäß im Grob- oder Feinvakuumbereich, so ist häufig der Gasanfall durch Ausgasen

oder durch Lecks vernachlässigbar klein. Entfernt nun eine Vakuumpumpe Gas aus dem Behälter mit Volumen V , so ergibt sich eine Volumenevakuierung und der Druck p nimmt mit der Zeit gemäß der folgenden Formel ab [1]:

$$\frac{dp}{dt} = -n \cdot \frac{p \cdot S}{V} \quad (6)$$

Das Zeichen n steht hier für den Polytropenexponenten, der das Verhalten des Gases beim Auspumpen charakterisiert.

Zu Beginn eines Evakuierungsvorgangs liegt der Druck im Behälter nahe beim Atmosphärendruck und die Gastemperatur nahe bei der Umgebungstemperatur. Infolge der geringen Temperaturleitfähigkeit des Gases bei hohen Drücken und des geringen Temperaturunterschiedes findet zunächst praktisch kein Temperatúrausgleich zwischen Gas und Behälterwänden statt. Damit liegt ein isentroper Expansionsprozeß des Gases vor, d. h. der Polytropenexponent n ist gleich dem Isentropenexponent κ (1,4 bei Luft). Beim Auspumpen sinkt infolge der Gasexpansion die Gastemperatur. Damit nimmt der Druck im Behälter sowohl infolge des von der Pumpe entfernten Gasvolumens als auch infolge der sinkenden Temperatur ab.

Im Feinvakuumbereich ist dagegen die Temperaturleitfähigkeit des Gases recht hoch, so daß ein guter Temperatúrausgleich erfolgt. Damit ist der Evakuierungsprozeß nahezu isotherm und der Polytropenexponent ist 1.

Um das Saugvermögen einer Vakuumpumpe aus der Abpumpkurve gemäß Gleichung (6) zu bestimmen, benötigt man den Polytropenexponenten, der zunächst nicht bekannt ist. Dieses Problem kann man umgehen, indem man den Behälter intermittierend pumpt und den Druck jeweils nach einem Pumpintervall erst nach thermischen Ausgleich registriert. Auf diese Weise wird das tatsächliche Pumpensaugvermögen erhalten [2]. Die **Saugvermögensmessung durch intermittieren** des Pumpen ist genormt für Membranvakuumpumpen in DIN 28432.

Im folgenden wird der Einfachheit halber ein isothermes Verhalten des Gases ($n=1$) und ein druckunabhängiges Saugvermögen S angenommen. Die Integration der Gleichung (6) liefert für den Druckverlauf $p(t)$ als Funktion der Zeit (Auspumpkurve), beginnend beim Druck p_0 :

Tabelle 1: Verzeichnis benutzter Symbole (siehe auch Text).

	Begriff	Einheit
C	Leitwert	l/s
k	Kompressionsverhältnis	-
n	Polytropenexponent	-
n	Drehzahl	1/min
p	Druck	mbar
P	Leistung	W
q _{pV}	pV-Durchfluß	mbar · l/s
S	Saugvermögen	l/s, m³/h
t	Zeit	s, h
V	Volumen	m³
κ	Isentropenexponent	-

$$p(t) = p_0 \cdot \exp(-t \cdot S / V) \quad (7)$$

Die Zeit, die benötigt wird, um vom Druck p_0 bis zum Druck p zu evakuieren, ergibt sich zu:

$$t(p) = \frac{V}{S} \cdot \ln \frac{p_0}{p} \quad (8)$$

3 Kenngrößen gasfördernder Pumpen

Als **Kompressionsverhältnis** einer gasfördernden Pumpe (auch Gastransferpumpe genannt) bezeichnet man das Verhältnis aus Auslaßdruck p_{aus} und Einlaßdruck p_{ein} eines bestimmten Gases:

$$k = p_{\text{aus}} / p_{\text{ein}} \quad (9)$$

Das in Datenblättern angegebene Kompressionsverhältnis wird – entsprechend der Abnahmeregeln – bei Nullförderung bestimmt, also wenn die Pumpe kein Gas fördert. Man kann diesen speziellen Wert durch das Symbol k_0 kennzeichnen. Falls erforderlich, werden Auslaß- und Einlaßdruck auf die jeweiligen Enddrücke korrigiert.

Bei der Förderung von Gas muß die Pumpe eine mechanische Leistung verrichten, die sich aus den einzelnen Leistungen für die Gasverdichtung und für den Ausstoß des Gases zusammensetzt. Im Fall isentroper Kompression und vernachlässigbarer Verluste errechnet man für die verrichtete Förderleistung:

$$P = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot S \cdot p_{\text{ein}} \cdot \left[\left(\frac{p_{\text{aus}}}{p_{\text{ein}}} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right] \quad (10)$$

Diese Leistung wird Null in den Grenzfällen $p_{\text{ein}} \approx 0$, weil dann praktisch kein Gas mehr gefördert wird, und $p_{\text{ein}} \approx p_{\text{aus}}$, weil dann keine Druckdifferenz zu überwinden ist. Die zur Förderung benötigte Leistung wird maximal bei einem Ansaugdruck

$$p_{\text{ein}} = p_{\text{aus}} \cdot \kappa^{1/(1-\kappa)} \quad (11)$$

$$= p_{\text{aus}} \cdot 0,308 \quad \text{bei } \kappa = 1,4 \text{ (Luft)}$$

Der Maximalwert der Leistung beträgt

$$P = \kappa \cdot p_{\text{ein}} \cdot S \quad (12)$$

4 Einsatz von Wälzkolbenpumpen

Wälzkolbenpumpen werden meist mit einer nachgeschalteten Drehschieberpumpe betrieben. Bei dieser Anordnung ergibt sich eine Rückwirkung des Saugvermögens der Drehschieberpumpe auf das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe. Daher wird in der Norm DIN 28426 das Saugvermögen der Pumpenkombination bestimmt.

Der Grund für die Rückwirkung liegt in der internen Gasrückströmung innerhalb der Wälzkolbenpumpe. In der Praxis wählt man nämlich das Saugvermögen der Drehschieberpumpe meist deutlich kleiner als das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe. Bedingt durch das kleinere Saugvermögen der Drehschieberpumpe baut sich am Auslaß

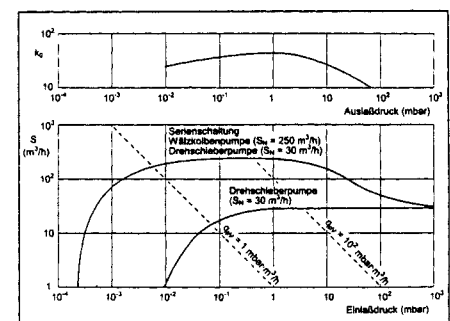


Abb. 2: Oben: Kompressionsverhältnis einer Wälzkolbenpumpe. Unten: Saugvermögen einer Drehschieberpumpe ($S_N = 30 \text{ m}^3/\text{h}$) und der Kombination der Wälzkolbenpumpe ($S_N = 250 \text{ m}^3/\text{h}$) mit dieser Drehschieberpumpe.

der Wälzkolbenpumpe ein relativ hoher Druck auf. Hieraus resultiert eine erhebliche Rückströmung innerhalb der Wälzkolbenpumpe, wodurch das verfügbare Saugvermögen erheblich reduziert wird. In dem (nicht praxisüblichen) Fall, in dem die Saugvermögen beider Pumpen gleich sind, sind auch die Drücke am Einlaß und Auslaß der Wälzkolbenpumpe gleich. Es gibt keine Rückströmung und die Wälzkolbenpumpe erreicht ihr maximales Saugvermögen S_{WKP}^{max} .

Die interne Rückströmung der Wälzkolbenpumpe wirkt sich unmittelbar auf ihr Kompressionsverhältnis k_0 aus. Man kann daher aus k_0 die Rückströmung und die hieraus resultierende Reduzierung des Saugvermögens herleiten. Durch Betrachtung des geförderten Gasstroms und der Rückströmung

erhält man folgende Beziehung für das verfügbare Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe in der Pumpenkombination:

$$S_{WKP} = S_{WKP}^{max} \cdot \frac{k_0}{k_0 - 1 + S_{WKP}^{max}/S_{DSP}} \quad (13)$$

In dem in Abb. 2 gezeigten Beispiel ist $S_{WKP} = 0,85 \cdot S_{WKP}^{max}$.

Referenz

- [1] H. G. Nöller, Vakuum-Technik 12, 291 (1963)
- [2] W. Jitschin, K.-H. Bernhardt, R. Lachenmann und F.J. Eckle, Vakuum in Forschung und Praxis 7, 183 (1995)

Materialien für die Dünnschichttechnik



FHR
jetzt auch im Internet!
www.fhr-ab.de

Wir bieten Ihnen:

- ♦ Beschichtungsmaterialien für PVD-Prozesse in jeder geforderten Qualität
- ♦ Hochqualitative Targets für alle Typen von Sputterquellen
- ♦ Targetbonden als Dienstleistung
- ♦ Individuelle Lösungen, kurze Lieferzeiten

Fragen Sie uns !

FHR Anlagenbau GmbH
Bergener Ring 41
01458 Ottendorf-Okrilla
Tel: 03 52 05 - 52 00
Fax: 03 52 05 - 5 20 40
www.fhr-ab.de

FHR
ANLAGENBAU GMBH



Nichts als Vakuum.

Für Forschung, Labor und Industrie.
Auf 150 Seiten.

ILMVAC total

Der Katalog für Vakuumtechnik von SASKIA.
Einfach anfordern.

SASKIA 50 Jahre Vakuumtechnik



SASKIA Hochvakuum- und Labortechnik GmbH
Am Vogelherd 20
D-98693 Ilmenau
Tel.: (036 77) 604-0
Fax.: (036 77) 6041 10
E-Mail: info@ilmvac.de
Internet: <http://www.ilmvac.com>

Vacuum