

VACUUM TECHNOLOGY

KNOW HOW

PFEIFFER  *VACUUM*



Vacuum Technology



	Seite
Vacuum Technology	
1 Einführung in die Vakuumtechnik	8
1.1 Allgemeines	8
1.1.1 Was ist Vakuum?	8
1.1.2 Vakuum im Überblick	8
1.2 Grundlagen	9
1.2.1 Druck	9
1.2.2 Allgemeine Gasgleichung	12
1.2.3 Teilchenzahldichte	12
1.2.4 Thermische Teilchengeschwindigkeit	12
1.2.5 Mittlere freie Weglänge	13
1.2.6 Strömungsarten	14
1.2.7 p-V-Durchfluss	16
1.2.8 Leitwerte	17
1.3 Störende Nebeneffekte	21
1.3.1 Verunreinigungen	21
1.3.2 Kondensieren und Verdampfen	21
1.3.3 Desorption, Diffusion, Permeation und Lecks	22
1.3.4 Ausheizen	25
1.3.5 Restgasspektrum	25
1.3.6 Fluten	25

	Seite
Vacuum Technology	
2 Vakuumerzeugung	26
2.1 Pumpprinzipien und Leistungsdaten von Vakuumpumpen	26
2.1.1 Einteilung der Vakuumpumpen	26
2.1.2 Saugvermögen und Saugleistung	26
2.1.3 Enddruck und Basisdruck	27
2.1.4 Kompressionsverhältnis	27
2.1.5 Saugvermögen von hintereinander geschalteten Pumpstufen	27
2.1.6 Gasballast	28
2.1.7 Wasserdampfverträglichkeit/Wasserdampfkapazität	28
2.1.8 Sperrgas	29
2.2 Drehschiebervakuumpumpen	29
2.2.1 Aufbau/Funktionsprinzip	30
2.2.2 Anwendungshinweise	30
2.2.3 Portfolioüberblick	31
2.2.3.1 Einstufige Drehschiebervakuumpumpen	32
2.2.3.2 Zweistufige Drehschiebervakuumpumpen	33
2.2.3.3 Auswahl des Betriebsmittels	34
2.2.3.4 Zubehör	35
2.3 Membranvakuumumpen	38
2.3.1 Aufbau/Funktionsprinzip	38
2.3.2 Anwendungshinweise	38
2.3.3 Portfolioüberblick	39
2.4 Hubkolbenvakuumpumpen	40
2.4.1 Aufbau/Funktionsprinzip	40
2.4.2 Anwendungen	41
2.4.3 Portfolioüberblick	41
2.5 Schraubenvakuumpumpen	41
2.5.1 Aufbau/Funktionsprinzip	41
2.5.2 Anwendungshinweise	43
2.5.3 Portfolioüberblick	44

	Seite
Vacuum Technology	
2.6 Wälzkolbenvakuumpumpen	46
2.6.1 Aufbau/Funktionsprinzip	47
2.6.2 Berechnungen	50
2.6.3 Anwendungshinweise	50
2.6.3.1 Wahl der Vorpumpe	51
2.6.4 Portfolioüberblick	52
2.6.4.1 Standardpumpen	53
2.6.4.2 Standardpumpen mit Magnetkupplung	53
2.6.4.3 Pumpen in Ex-Schutz-Ausführung	53
2.6.4.4 Pumpstände	54
2.6.5 Zubehör	54
2.7 Seitenkanalhochvakuumumpen	56
2.7.1 Aufbau/Funktionsprinzip	56
2.7.2 Anwendungshinweise	56
2.7.3 Portfolioüberblick	57
2.8 Turbomolekularpumpen	57
2.8.1 Aufbau/Funktionsprinzip	57
2.8.1.1 Funktionsprinzip Turbomolekularpumpe	58
2.8.1.2 Funktionsprinzip Holweckstufe	61
2.8.1.3 Pumpeigenschaften von Turbopumpen	63
2.8.2 Anwendungshinweise	64
2.8.3 Portfolioüberblick	66
2.8.3.1 Mechanisch gelagerte Turbopumpen	66
2.8.3.2 Magnetisch gelagerte Turbopumpen	67
2.8.3.3 Bedienungs-, Anzeige- und Antriebsgeräte	68
2.8.3.4 Zubehör	70
3 Vakuummessgeräte	72
3.1 Grundlagen der Totaldruckmessung	72
3.1.1 Direkte, gasartunabhängige Druckmessung	72
3.1.2 Indirekte, gasartabhängige Druckmessung	74

	Seite
Vacuum Technology	
3.2 Anwendungshinweise	78
3.2.1 Messbereiche	78
3.2.2 Transmitter	79
3.2.3 Messröhren	79
3.2.4 Kombisensoren	80
3.3 Portfolioüberblick	80
3.3.1 Baureihen	80
3.3.1.1 DigiLine	80
3.3.1.2 ActiveLine	83
3.3.1.3 ModulLine	85
4 Massenspektrometer und Restgasanalyse	86
4.1 Einleitung, Funktionsprinzip	86
4.1.1 Sektorfeldmassenspektrometer	87
4.1.2 Quadrupolmassenspektrometer QMS	88
4.1.2.1 Quadrupolmassenfilter	88
4.1.2.2 Ionenquellen	93
4.1.2.3 Detektoren	101
4.1.2.4 Vakuumsysteme	104
4.1.2.5 Einlasssysteme	104
4.1.3 Anwendungshinweise	105
4.1.4 Portfolio	107
4.1.4.1 Vorteile der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer	108
4.1.4.2 Datenauswertesystem	111
5 Lecksuche	113
5.1 Allgemeines	113
5.1.1 Lecks und deren Nachweis	113
5.1.2 Leckrate	113
5.1.3 Prüfgase	114

1 Einführung in die Vakuumtechnik

1.1 Allgemeines

1.1.1 Was ist Vakuum?

Als Vakuum bezeichnet man ein verdünntes Gas oder einen entsprechenden Zustand, bei dem der Druck oder die Dichte kleiner ist als bei der umgebenden Atmosphäre. Da der Atmosphärendruck über der Erdoberfläche nicht konstant ist und mit der Höhe über dem Meeresspiegel abnimmt, kann bezüglich des Druckes keine allgemeine Obergrenze für den Vakuumbereich angegeben werden.

1.1.2 Vakuum im Überblick

Um ein Vakuum zu erreichen, muss also in einem Behälter ein Druck erzeugt werden, der geringer ist als der Atmosphärendruck in der Umgebung. Der Atmosphärendruck ändert sich durch die Schwerkraft der Erde, gemäß der barometrischen Höhenformel, mit der Höhe:

Formel 1-1
Barometerformel

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{g \cdot \rho_0 \cdot h}{V_0 \cdot p_0}\right)$$

mit den Werten

Atmosphärendruck auf Meereshöhe $p_0 = 1.013 \text{ mbar}$

Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Dichte der Luft auf Meereshöhe bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$.

Durch Zusammenfassen der Konstanten erhält man daraus:

Formel 1-2
Barometerformel
numerisch

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{8.005 \text{ m}}\right)$$

Setzt man $p = p_0/2$ und löst die Gleichung nach h auf, so erhält man die Halbwertszeit $h_{1/2} = 5.548 \text{ m}$. D. h.: Alle 5,548 km Höhe halbiert sich der Atmosphärendruck.

Auf der Reiseflughöhe eines Passagierflugzeuges, also bei ca. 10 km, ist er schon auf 290 mbar abgefallen. Die Wetterdaten werden in ca. 30 km Höhe bei einem Druck von 24 mbar gemessen. Die Druckniveaus, die in diesen Höhen herrschen, sind noch dem Grobvakuumbereich zuzuordnen, der später genauer betrachtet werden wird. Ein größerer Abstand zur Erdoberfläche bringt uns schließlich zu Satellitenbahnen in 250 km Höhe. Hier ist der Druck nun schon auf $10^{-5} - 10^{-6} \text{ mbar}$ abgefallen. Noch weiter draußen im Weltall herrscht dann bereits ein Ultrahochvakuum von weniger als 10^{-14} mbar .

Die praktische Nutzung von Druckdifferenzen zur Kraftausübung ist etwa im Bereich 1.000 bis 1 mbar sinnvoll. In diesem Anwendungsbereich gibt man das Vakuum in % vom Atmosphärendruck an.

Um auf der Erde ähnliche Druckwerte zu erreichen wie die des natürlichen Vakuums im Weltraum, sind diverse Hilfsmittel notwendig. Mit Vakuumpumpen können diese verschiedenen Druckbereiche realisiert werden.

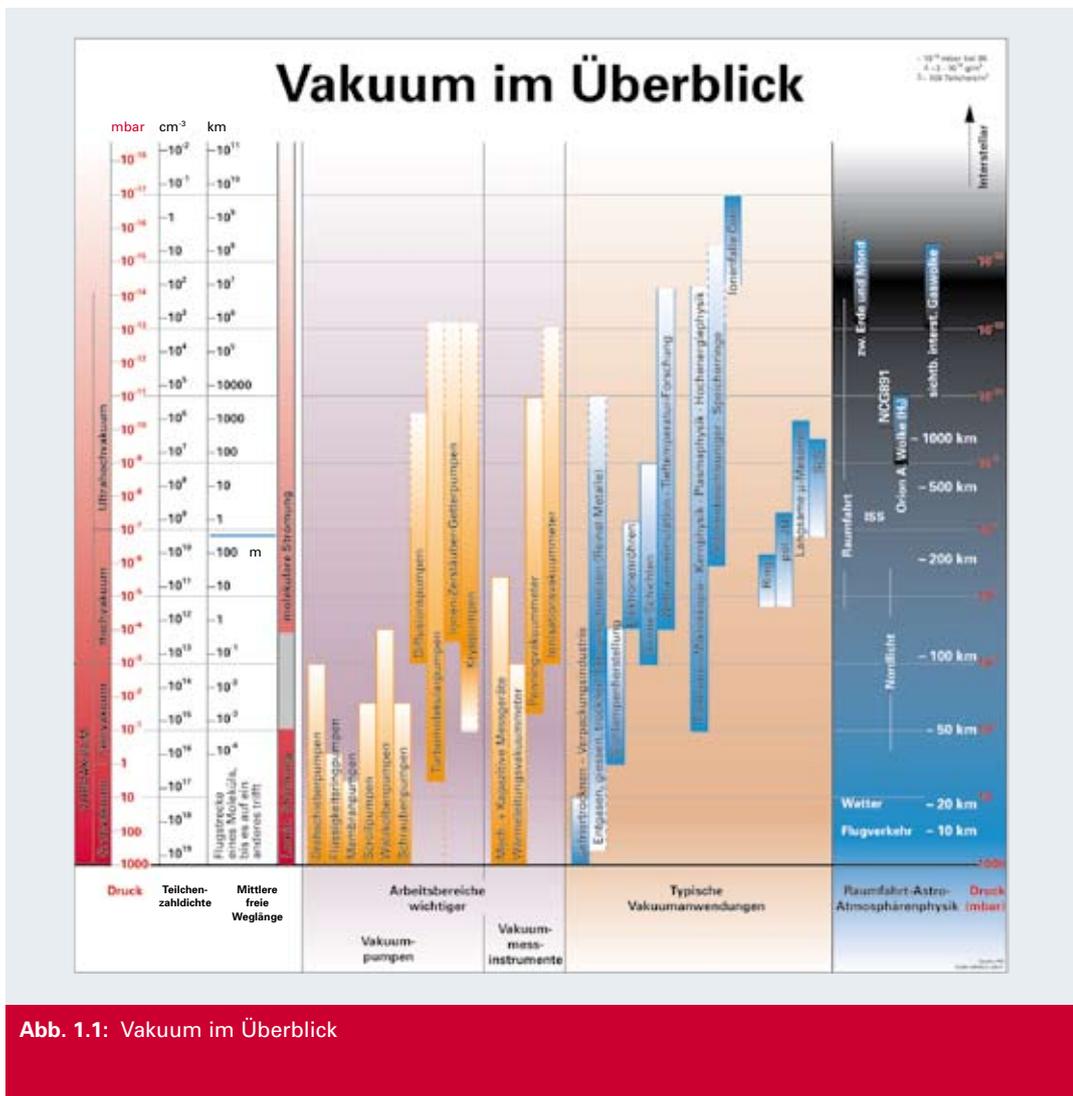


Abb. 1.1: Vakuum im Überblick

Quelle: Paul Scherer Institut, CH

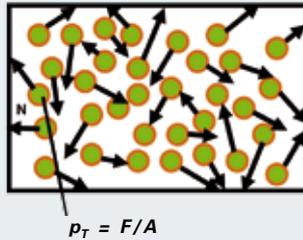
1.2 Grundlagen

1.2.1 Druck

Ein beliebiges, in einem Volumen eingeschlossenes, Gas verteilt sich immer gleichmäßig. Die einzelnen Gasteilchen bewegen sich in dem Volumen dauernd mit hohen Geschwindigkeiten hin und her. Sie üben, wenn sie auf die Behälterwand mit der Fläche A auftreffen, auf diese durch Impulsübertragung eine Kraft F aus. Der Druck p , der auf die Wand ausgeübt wird, ist definiert als

Formel 1-3
Druckdefinition

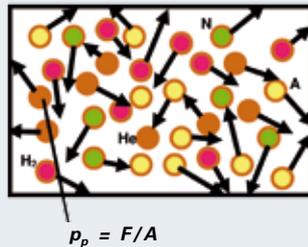
$$p = \frac{F}{A}$$



- ▶ Druck in Behälter
- ▶ Eine Gasart, z. B. Stickstoff N_2
- ▶ Verschiedene Gase, z. B. Luft

Abb. 1.2: Definition des Totaldruckes

Besteht das Gas aus verschiedenen Gasarten, so übt jedes Gas entsprechend seiner Konzentration einen Druck, den Partialdruck, aus. Alle Partialdrücke addieren sich zum Totaldruck. Als Beispiel sei hier die Luft erwähnt, die außer den Hauptbestandteilen Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf noch viele Spurengase enthält.



- ▶ Teildruck
- ▶ Summe der Teildrücke aller vorhandenen Gase ergeben Totaldruck
- ▶ Massenspektrometrischer Nachweis aller vorhandenen Gase

Abb. 1.3: Definition des Partialdruckes

Tabelle 1.1: Totaldruck und Zusammensetzung der Luft bei 20 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit

Gasart	Partialdruck / mbar
Stickstoff	781,8
Sauerstoff	209,7
Wasserdampf	12
Argon	9,34
Kohlendioxid	$3,3 \cdot 10^{-1}$
Neon	$1,82 \cdot 10^{-2}$
Helium	$5,23 \cdot 10^{-3}$
Krypton	$1,15 \cdot 10^{-3}$
Wasserstoff	$4,94 \cdot 10^{-3}$
Xenon	$8,7 \cdot 10^{-5}$
Totaldruck	1.013

Der Druckbereich des Vakuums umfasst das Intervall 0–1 bar. Man unterscheidet hier folgende Druckbereiche:

Tabelle 1.2: Druckbereiche/Teilchenzahldichte

Druckbereich	Druck / mbar	Teilchenzahldichte / cm ⁻³
Großvakuum	10 ³ – 10 ⁰	2,65 · 10 ¹⁹ – 2,65 · 10 ¹⁶
Feinvakuum	10 ⁰ – 10 ⁻³	2,65 · 10 ¹⁶ – 2,65 · 10 ¹³
Hochvakuum	10 ⁻³ – 10 ⁻⁷	2,65 · 10 ¹³ – 2,65 · 10 ⁹
Ultrahochvakuum	10 ⁻⁷ – 10 ⁻¹²	2,65 · 10 ⁹ – 2,65 · 10 ⁴

Gemäß der Formel 1-3 zur Druckdefinition wird dafür die SI-Einheit Pa = N/m² verwendet. In der Praxis sind auch die in der folgenden Umrechnungstabelle dargestellten Druckeinheiten üblich. Sehr gebräuchlich ist die Druckeinheit mbar.

Tabelle 1.3: Umrechnungstafel für Druckeinheiten

	Pa = N / m ²	bar	mbar	µbar = dyn / cm ²	Torr = mm Hg	micron µ = mTorr	atm	at	mm WS	psi = lbf / inch ²	psf = lbf / ft ²
Pa	1	1 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻²	10	7,5 · 10 ⁻³	7,5	9,87 · 10 ⁻⁶	1,02 · 10 ⁻⁵	0,102	1,45 · 10 ⁻⁴	2,09 · 10 ⁻²
bar	1 · 10 ⁵	1	1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁶	750	7,5 · 10 ⁵	0,987	1,02	1,02 · 10 ⁴	14,5	2,09 · 10 ³
mbar	100	1 · 10 ⁻³	1	1.000	0,75	750	9,87 · 10 ⁻⁴	1,02 · 10 ⁻³	10,2	1,45 · 10 ⁻²	2,09
µbar	0,1	1 · 10 ⁻⁶	1 · 10 ⁻³	1	7,5 · 10 ⁻⁴	0,75	9,87 · 10 ⁻⁷	1,02 · 10 ⁻⁶	1,02 · 10 ⁻²	1,45 · 10 ⁻⁵	2,09 · 10 ⁻³
Torr	1,33 · 10 ²	1,33 · 10 ⁻³	1,33	1.330	1	1.000	1,32 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ⁻³	13,6	1,93 · 10 ⁻²	2,78
micron	0,133	1,33 · 10 ⁻⁶	1,33 · 10 ⁻³	1,33	1 · 10 ⁻³	1	1,32 · 10 ⁻⁶	1,36 · 10 ⁻⁶	1,36 · 10 ⁻²	1,93 · 10 ⁻⁵	2,78 · 10 ⁻³
atm	1,01 · 10 ⁵	1,013	1.013	1,01 · 10 ⁶	760	7,6 · 10 ⁵	1	1,03	1,03 · 10 ⁴	14,7	2,12 · 10 ³
at	9,81 · 10 ⁴	0,981	981	9,81 · 10 ⁵	735,6	7,36 · 10 ⁵	0,968	1	1 · 10 ⁻⁴	14,2	2,04 · 10 ³
mm WS	9,81	9,81 · 10 ⁻⁵	9,81 · 10 ⁻²	98,1	7,36 · 10 ⁻²	73,6	9,68 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻⁴	1	1,42 · 10 ⁻³	0,204
psi	6,89 · 10 ³	6,89 · 10 ⁻²	68,9	6,89 · 10 ⁴	51,71	5,17 · 10 ⁴	6,8 · 10 ⁻²	7,02 · 10 ⁻²	702	1	144
psf	47,8	4,78 · 10 ⁻⁴	0,478	478	0,359	359	4,72 · 10 ⁻⁴	4,87 · 10 ⁻⁴	4,87	6,94 · 10 ⁻³	1

1.2.2 Allgemeine Gasgleichung

Für Gase gilt, dass ein Volumen von 22,414 Litern (Molvolumen) bei einer Temperatur von 273,15 K (Normaltemperatur = 0 °C) und einem Druck von 101.325 Pa (Normaldruck) $6,02 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadrozahl) enthält. Die Masse des so eingeschlossenen Gases ist das Molekulargewicht in Gramm.

Die allgemeine Gasgleichung beschreibt den Zustand eines Gases in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Volumen.

Formel 1-4

Allgemeine Gasgleichung

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T = n \cdot V \cdot k \cdot T$$

Daraus folgt:

Formel 1-5

Gasdruck

$$p = n \cdot k \cdot T$$

mit den Größen:

p = Druck [Pa; N/m²]

V = Volumen [m³]

m = Masse [kg]

M = Molare Masse [kg/kmol]

R = Allgemeine Gaskonstante $R = 8,314510$ kJ/(kmol K)

T = Thermodynamische Temperatur [K]

n = Teilchenzahldichte [1/m³]

k = Boltzmannkonstante $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K

1.2.3 Teilchenzahldichte

Aus Formel 1-4 und Formel 1-5 ist ersichtlich, dass der Druck der Teilchenzahldichte proportional ist. Wegen der großen Zahl der Teilchen pro Volumeneinheit unter Normalbedingungen folgt, dass z. B. auch bei einem Druck von 10^{-12} mbar noch 26.500 Moleküle pro cm³ vorhanden sind. Deshalb kann man selbst im Ultrahochvakuum noch nicht von einem leeren Raum sprechen.

1.2.4 Thermische Teilchengeschwindigkeit

Gasmoleküle in einem Behälter bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen hin und her. Ihre Geschwindigkeitsverteilung entspricht einer Glockenkurve mit einem Maximum bei der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit.

Formel 1-6

Wahrscheinlichste Geschwindigkeit

$$c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{M}}$$

Die mittlere thermische Geschwindigkeit ist

Formel 1-7

Mittlere Geschwindigkeit

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}$$

Die folgende Tabelle zeigt Werte für ausgewählte Gase.

Tabelle 1.4: Molare Massen und mittlere thermische Geschwindigkeiten verschiedener Gase

Gas	Molare Masse / (g / mol)	Mittlere Geschwindigkeit / (m / s)	Machzahl
H ₂	2	1.762	5,3
He	4	1.246	3,7
H ₂ O	18	587	1,8
N ₂	28	471	1,4
Luft	29	463	1,4
Ar	40	394	1,2
CO ₂	44	376	1,1

1.2.5 Mittlere freie Weglänge

Die mittlere freie Weglänge ist die mittlere Wegstrecke, die ein Teilchen zwischen zwei aufeinander folgenden Stößen mit anderen Teilchen zurücklegt. Sie hängt vom Moleküldurchmesser d_m und der Temperatur T nach folgender Gleichung ab

Formel 1-8
Mittlere freie Weglänge

$$\bar{l} \cdot p = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot d_m^2}$$

und ist bedeutsam für die verschiedenen Strömungsarten des Gases im Vakuum.

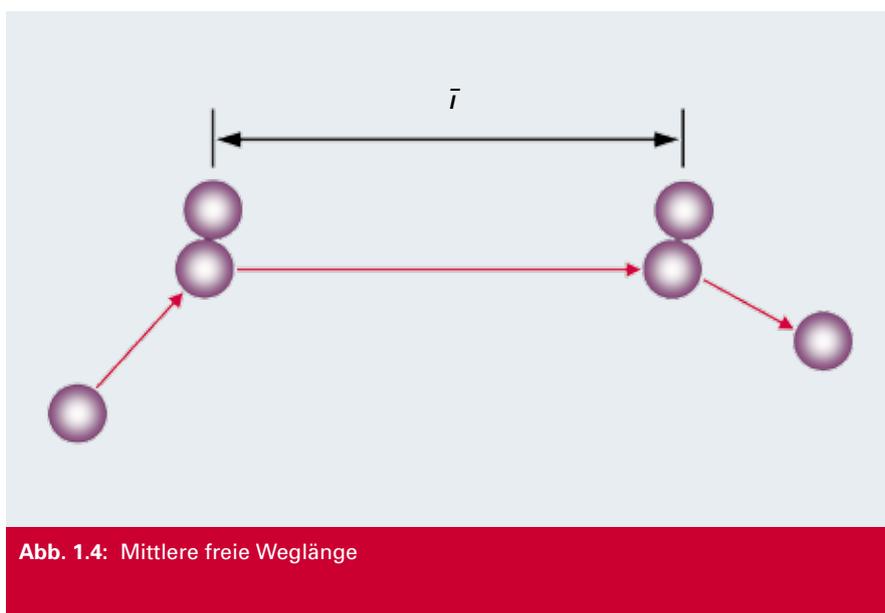


Abb. 1.4: Mittlere freie Weglänge

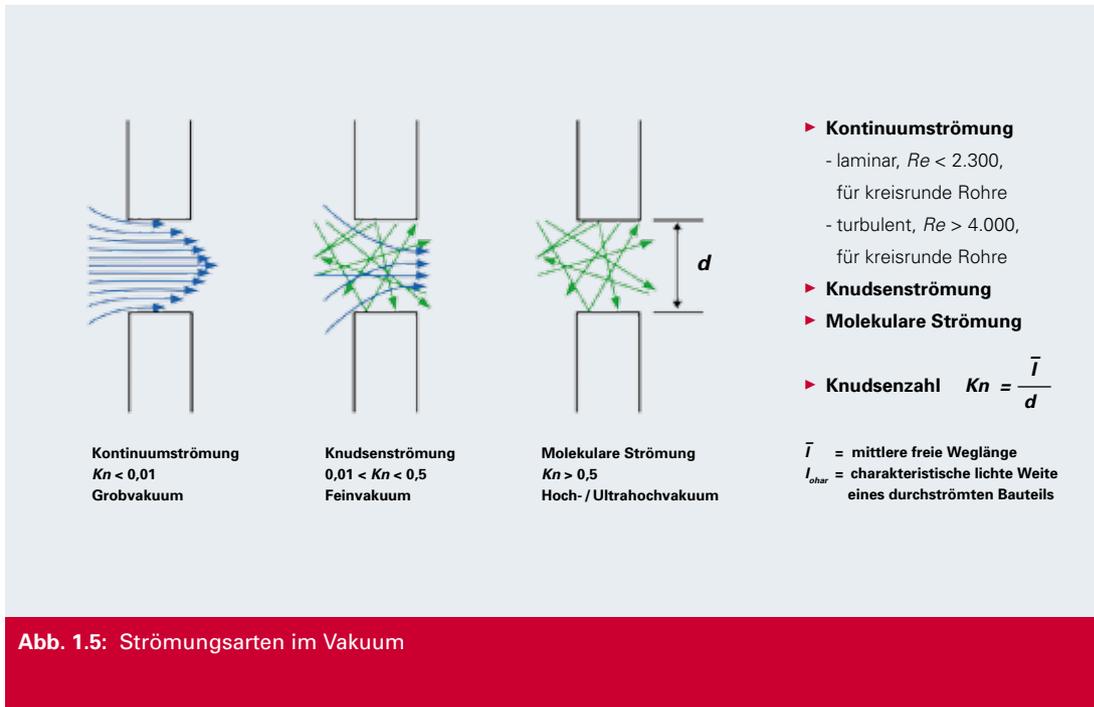
Die folgende Tabelle [1] zeigt das Produkt $\bar{l} \cdot p$ für verschiedene Gase bei 0 °C.

Tabelle 1.5: Mittlere freie Weglänge verschiedener Gase bei 0 °C

Gas	$\bar{l}_p / (m \cdot Pa)$	Gas	$\bar{l}_p / (m \cdot Pa)$
H ₂	$11,5 \cdot 10^{-3}$	Xe	$3,6 \cdot 10^{-3}$
N ₂	$5,9 \cdot 10^{-3}$	Hg	$3,1 \cdot 10^{-3}$
He	$17,5 \cdot 10^{-3}$	CO	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Ne	$12,7 \cdot 10^{-3}$	CO ₂	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Ar	$6,4 \cdot 10^{-3}$	HCl	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Luft	$6,65 \cdot 10^{-3}$	NH ₃	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Kr	$4,9 \cdot 10^{-3}$	Cl ₂	$2,8 \cdot 10^{-3}$

1.2.6 Strömungsarten

Im Vakuum unterscheidet man drei Strömungsarten. Je nach Druck, mittlerer freier Weglänge und den Bauteilabmessungen d stellen sich die nachfolgend beschriebenen Strömungsformen ein.

**Abb. 1.5:** Strömungsarten im Vakuum

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Kontinuumströmung im Grobvakuum, $p = 10^3 - 10^0$ mbar, mit $\bar{l} \ll d$

Bezeichnend für die Kontinuumströmung, auch als viskose Strömung bekannt, ist der häufige Kontakt der Gasteilchen untereinander, jedoch seltener mit den Gefäßwänden.

Die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen ist hier deutlich kleiner als die Abmessungen d der Vakuumapparatur.

Die dimensionslose Knudsenzahl Kn ist definiert als das Verhältnis zwischen mittlerer freier Weglänge und Bauteildurchmesser

Formel 1-9
Knudsenzahl

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}$$

Kn liegt hier bei $< 0,01$. Weiter spricht man von viskoser Strömung, wenn das Produkt aus Druck p und Durchmesser d der durchströmten Bauteile $p \cdot d \geq 6 \cdot 10^{-1}$ mbar \cdot cm für Luft beträgt.

Man unterscheidet bei der viskosen Strömung die laminare und die turbulente Strömung. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten herrscht laminare Strömung. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ändert sich diese in eine turbulente Strömung [2]. Der Einsatz der turbulenten Strömung hängt von der Reynoldszahl ab.

Formel 1-10
Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho}{\eta} \cdot v \cdot d$$

Hierbei bedeuten:

ρ = Dichte [kg/m³]

η = Viskosität [Pas]

v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

d = Rohrdurchmesser [m]

Bis zu Werten von $Re < 2.300$ ist die Strömung laminar und für $Re > 4.000$ turbulent. In Vakuumanlagen dimensioniert man die Leitungen so, dass turbulente Strömung bei relativ hohen Drücken nur kurzzeitig präsent ist, da die dabei auftretenden hohen Strömungswiderstände den Pumpen höhere Saugvermögen abverlangen.

Knudsenströmung im Feinvakuum, $p = 10^0 - 10^{-3}$ mbar, mit $\bar{l} \leq d$

Liegt die Knudsenzahl zwischen 0,01 und 0,5, spricht man von Knudsenströmung. Da viele Prozessdrücke im Feinvakuumbereich liegen, ist diese Strömungsart entsprechend häufig vertreten. Da es sich um eine Übergangsströmung handelt, wird dieser Bereich beim Abpumpen von Rezipienten relativ schnell durchlaufen. Der Einfluss dieses Leitwertes auf Auspumpzeiten ist entsprechend gering. Die exakte Berechnung des Leitwertes im Bereich noch laminarer und schon molekularer Strömung ist kompliziert und soll hier nicht erläutert werden. Eine einfache Näherung für den Knudsenbereich erhält man durch Addition der laminaren und molekularen Leitwerte. Abbildung 1.7 zeigt die Leitwerte von 1 m langen, runden Rohren verschiedener Durchmesser in allen drei Strömungsbereichen.

Molekulare Strömung im Hochvakuum, ($p = 10^{-3} - 10^{-7}$ mbar), mit $\bar{l} > d$ und im Ultrahochvakuum ($p < 10^{-7}$ mbar), mit $\bar{l} \gg d$

Bei Knudsenzahlen $Kn > 0,5$ findet eine Wechselwirkung der Teilchen untereinander praktisch nicht mehr statt. Es herrscht Molekularströmung. Das Produkt aus Druck p und Bauteildurchmesser d liegt hier bei $p \cdot d \leq 1,3 \cdot 10^{-2}$ mbar \cdot cm.

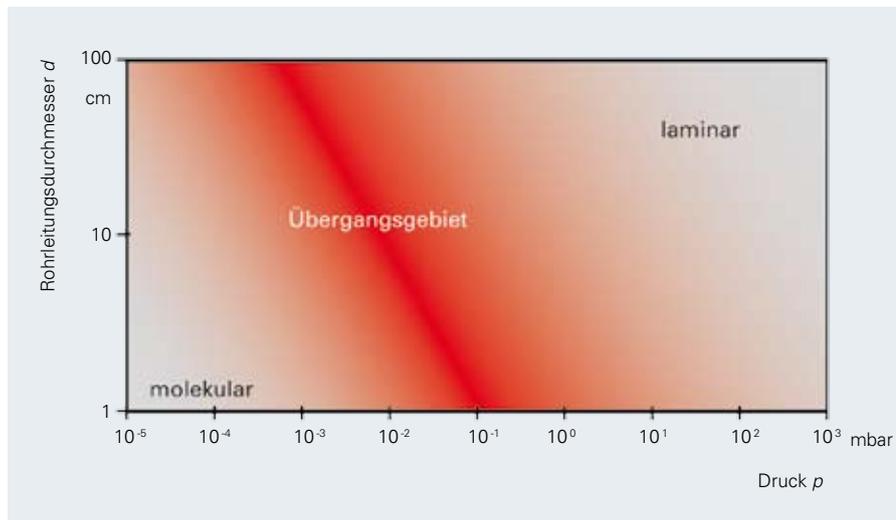


Abb. 1.6: Strömungsbereiche im Vakuum

1.2.7 pV-Durchfluss

Dividiert man die allgemeine Gasgleichung durch die Zeit t , so erhält man den Gasstrom

Formel 1-11
pV-Durchfluss

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{m \cdot R \cdot T}{t \cdot M}$$

auch pV-Durchfluss genannt. Aus der rechten Seite der Gleichung erschließt sich, dass bei gleicher Temperatur T ein konstanter Massenstrom gefördert wird.

Vakuumpumpen, insbesondere Verdrängerpumpen, haben ein konstantes Saugvermögen

Formel 1-12
Definition
Saugvermögen

$$S = \frac{dV}{dt}$$

über einen bestimmten Eingangsdruckbereich; d. h. sie fördern einen konstanten Volumenstrom. Multipliziert man das Saugvermögen mit dem Eingangsdruck, so erhält man die Saugleistung.

Formel 1-13
Saugleistung

$$q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$$

Die Saugleistung ist der von der Vakuumpumpe transportierte Gasstrom.

Tabelle 1.6: Umrechnungstafel für Durchflusseinheiten, Längen und Temperaturen

	Pa m³/s = W	mbar l/s	Torr l/s	atm cm³/s	lusec	sccm	slm	Mol/s
Pa m³/s	1	10	7,5	9,87	$7,5 \cdot 10^3$	592	0,592	$4,41 \cdot 10^{-4}$
mbar l/s	0,1	1	0,75	0,987	750	59,2	$5,92 \cdot 10^{-2}$	$4,41 \cdot 10^{-5}$
Torr l/s	0,133	1,33	1	1,32	1.000	78,9	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$
atm cm³/s	0,101	1,01	0,76	1	760	59,8	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$
lusec	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$1,32 \cdot 10^{-3}$	1	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$7,89 \cdot 10^{-5}$	$5,86 \cdot 10^{-8}$
sccm	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	12,7	1	10^{-3}	$7,45 \cdot 10^{-7}$
slm	1,69	16,9	12,7	16,7	$1,27 \cdot 10^4$	1.000	1	$7,45 \cdot 10^{-4}$
Mol/s	$2,27 \cdot 10^3$	$2,27 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	$2,24 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,34 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^3$	1

	cm	inch	ft
cm	1	0,394	0,033
inch	2,54	1	0,083
ft	30,48	12	1

	K	°C	F
K	1	K - 273,15	$9/5 \text{ K} - 459,67$
°C	$°\text{C} + 273,15$	1	$9/5 \text{ °C} + 32$
F	$5/9 (\text{F} + 459,67)$	$5/9 (\text{F} - 32)$	1

°C	100	80	60	40	20	0	-20	-40
F	212	176	140	104	68	32	-4	-40

1.2.8 Leitwerte

Vakuulkammern sind im Allgemeinen über Rohrleitungen mit einer Vakuumpumpe verbunden. Infolge von äußerer Reibung (Gasteilchen/Wandfläche) und innerer Reibung (Gasteilchen/Gasteilchen „Viskosität“) kommt es zu Strömungswiderständen, die sich in Druckunterschieden und Saugvermögensverlusten äußern. An Stelle des Strömungswiderstands W benutzt man in der Vakuumtechnik üblicherweise dessen Kehrwert, den Leitwert L einer Rohrleitung. Dieser wird in [l/s] oder [m³/h] angegeben.

Strömt Gas durch eine Leitung, stellt sich eine Druckdifferenz Δp an den Leitungsenden ein.
Es gilt:

Formel 1-14
Definition Leitwert

$$q_{pV} = L \cdot \Delta p$$

Der Leitwert der Leitung ist $L = 1/W$.

Analog zum Ohm'schen Gesetz $I = \frac{1}{R} \cdot U$ entspricht q_{pV} dem Strom I , L dem Kehrwert des Widerstandes $1/R$ und Δp der Spannung U . Bei der Parallelschaltung von Bauteilen addieren sich die Einzeleitwerte:

Formel 1-15
Parallelschaltung
Leitwerte

$$L_1 + L_2 + \dots + L_n = L_{ges}$$

und bei Reihenschaltung addieren sich die Kehrwerte:

Formel 1-16
Reihenschaltung
Leitwerte

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} = \frac{1}{L_{ges}}$$

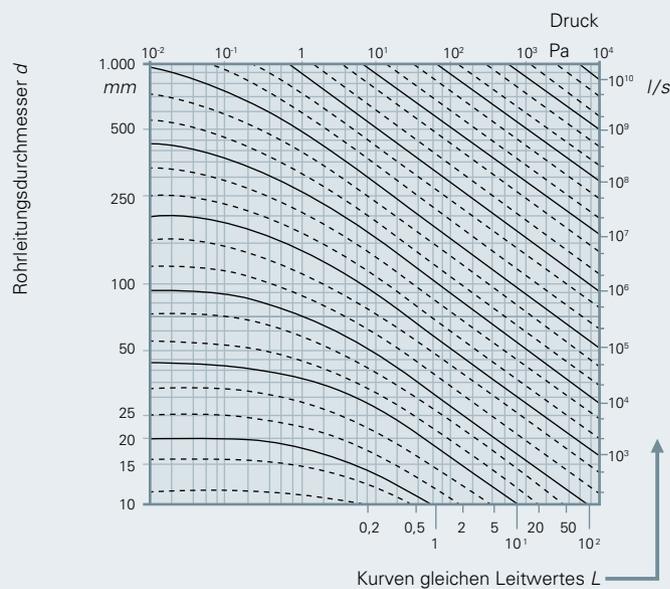


Abb. 1.7: Diagramm zur Ermittlung der Leitwerte von Rohren

Quelle: Pupp/Hartmann, Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen, Hanser Verlag

Die Leitwerte von Rohren und Rohrbogen sind in den diversen Strömungsbereichen unterschiedlich. Sie sind bei der Kontinuumsströmung proportional zum mittleren Druck \bar{p} und bei der molekularen Strömung druckunabhängig. Die Knudsenströmung bildet den Übergang zwischen beiden Strömungsarten, und die Leitwerte ändern sich mit der Knudsenzahl. Da dieser Bereich bei der Vakuumerzeugung relativ schnell durchlaufen wird, wird hier auf die einschlägige Literatur verwiesen [2].

Im Folgenden sollen die Leitwerte von Blenden und runden, langen Rohren für den laminaren und molekularen Strömungsbereich kurz dargestellt werden.

Grundsätzlich gilt für den Leitwert: $L = \frac{q_{pV}}{\Delta p} = \frac{q_{pV}}{p_1 - p_2}$ (Formel 1-14)

Blenden trifft man häufig in Vakuumanlagen an. Beispiele sind hier Querschnittsverengungen in Ventilen, Belüftungseinrichtungen oder Blenden in Messdomen, die der Saugvermögensmessung dienen. Bei Rohröffnungen an Behälterwänden muss ebenfalls der Blendenwiderstand berücksichtigt werden.

Verblockte Strömung

Betrachten wir die Belüftung eines Vakuumbehälters: Beim Öffnen des Flutventils strömt Luft aus der Umgebung mit dem Druck p_1 und unter hoher Geschwindigkeit in den Behälter ein. Sie erreicht maximal Schallgeschwindigkeit und die durchströmende Menge q_{pV} ist unabhängig vom Behälterinnendruck p_2 . Es gilt für Luft:

Formel 1-17
Verblockung

$$q_{pV} = 15,6 \cdot d^2 \cdot p_1 = 15,6 \frac{l}{s} \cdot \left(\frac{d}{cm} \right)^2 \cdot p_1$$

Gasdynamische Strömung

Steigt nun der Druck im Behälter über den kritischen Druck [2] an, so reduziert sich der Gasstrom und wir erhalten:

Formel 1-18
Gasdynamische
Strömung

$$q_{pV} = A \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot \bar{c} \cdot p_1 \cdot \psi \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$\psi(p_2/p_1)$ [3] wird als Ausflussfunktion bezeichnet und ist in Diagramm Abbildung 1.8 dargestellt.

Molekularströmung

Verbindet eine Blende zwei Behälter in denen molekulare Strömungsbedingungen vorliegen ($\bar{l} \gg d$), so gilt für den Blendenleitwert:

Formel 1-19
Blendenleitwert

$$L_{Bm} = \frac{\bar{c}}{4} \cdot A$$

Entsprechend gilt für den Durchfluss:

Formel 1-20
Blendendurchfluss

$$q_{pV} = A \cdot \frac{\bar{c}}{4} \cdot (p_1 - p_2)$$

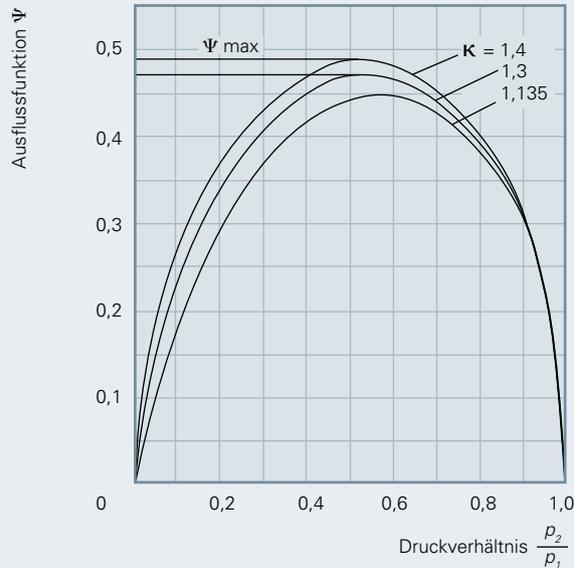


Abb. 1.8: Ausflussfunktion bei gasdynamischer Strömung

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Betrachten wir nun Leitwerte von Rohren.

Da wäre zum einen die laminare Strömung in einem langen Rohr mit rundem Querschnitt: Bei laminarer Strömung ist der Leitwert eines Rohres dem mittleren Druck \bar{p} proportional:

Formel 1-21
Rohr laminar

$$L_{Rl} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

Zum anderen wäre da die molekulare Strömung in einem langen Rohr mit rundem Querschnitt: Im molekularen Strömungsbereich ist der Leitwert konstant und hängt nicht vom Druck ab. Er kann betrachtet werden als Produkt des Blendenleitwertes der Rohröffnung L_{Rm} mit der Durchtrittswahrscheinlichkeit P_{Rm} durch ein Bauelement:

Formel 1-22
Rohr molekular

$$L_{Rm} = L_{Bm} \cdot P_{Rm}$$

Die Durchtrittswahrscheinlichkeit P_{Rm} kann für unterschiedliche Rohrformen, Bogen oder Ventile durch Monte-Carlo-Simulation mittels Computerprogramm berechnet werden. Hierbei verfolgt man die Bahnen einzelner Gasteilchen durch das Bauteil unter Berücksichtigung von Wandstößen.

Für lange, runde Rohre gilt: $P_{Rm} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{l}$.

Multiplizieren wir diesen Wert mit dem Blendenleitwert (Formel 1-19), so erhalten wir

Formel 1-23
Leitwert Rohr molekular

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l}$$

- L_{Rm} = Rohrleitwert [m³/s]
- d = Rohrdurchmesser [m]
- l = Rohrlänge [m]
- \bar{p} = $(p_1 + p_2) / 2$ Druck [Pa]
- p_1 = Druck am Eintritt der Rohrleitung [Pa]
- p_2 = Druck am Ende der Rohrleitung [Pa]
- η = Zähigkeit des Gases [Pa · s]
- \bar{c} = Mittlere thermische Geschwindigkeit [m/s]

In Abbildung 1.7 [5] sind Kurven gleicher Leitwerte L in Abhängigkeit vom mittleren Druck \bar{p} und dem Rohrleitungsdurchmesser d für Rohre von 1 m Länge aufgetragen. Bei niedrigen Drücken sind die Leitwerte konstant und bei hohen Drücken steigen sie proportional zum mittleren Druck \bar{p} . Die gekrümmten Kurvenbereiche stellen den Bereich der Knudsenströmung dar.

1.3 Störende Nebeneffekte

1.3.1 Verunreinigungen

Um beim Abpumpen von Vakuumbehältern möglichst schnell den erwünschten Druck zu erreichen, müssen diese sauber sein. Typische Verunreinigungen sind Öl und Fett an Schrauben und Dichtungen, Reaktionsprodukte von Prozessen oder kondensierte Dämpfe, hier vor allem Wasser, die an den Behälterwänden adsorbiert werden. Deshalb ist bei der Montage von Vakuumanlagen auf saubere Bauteile zu achten. Alle im Vakuumraum angebrachten Bauteile müssen sauber und fettfrei sein. Auch alle Dichtungen sind trocken einzubauen. Soll Hochvakuum oder Ultrahochvakuum erreicht werden, sind bei der Montage saubere Handschuhe zu tragen.

1.3.2 Kondensieren und Verdampfen

Alle Stoffe können flüssig, fest oder gasförmig vorkommen. Ihr Aggregatzustand hängt von Druck und Temperatur ab. Flüssige Stoffe gehen durch Verdampfen und feste durch Sublimation in den gasförmigen Zustand über. Die Abscheidung flüssiger oder fester Stoffe aus der Gasphase wird als Kondensation bezeichnet. Da normale Raumluft etwa 10 g Wasserdampf pro m³ enthält, ist immer kondensierter Wasserdampf an allen Oberflächen vorhanden.

Die Adsorption an Oberflächen ist wegen der starken Polarität der Wassermoleküle besonders ausgeprägt. Besonders Naturfasern wie z. B. Papier enthalten große Mengen Wasser, die bei Trocknungsprozessen im Vakuum austreten. Zum Abscheiden des Wasserdampfes benutzt man gekühlte Kondensatoren. Selbst bestimmte Metalle (Cd, Zn, Mg) können bei einigen 100 °C in merklicher Menge verdampfen. Man vermeidet deshalb deren Verwendung beim Anlagenbau.

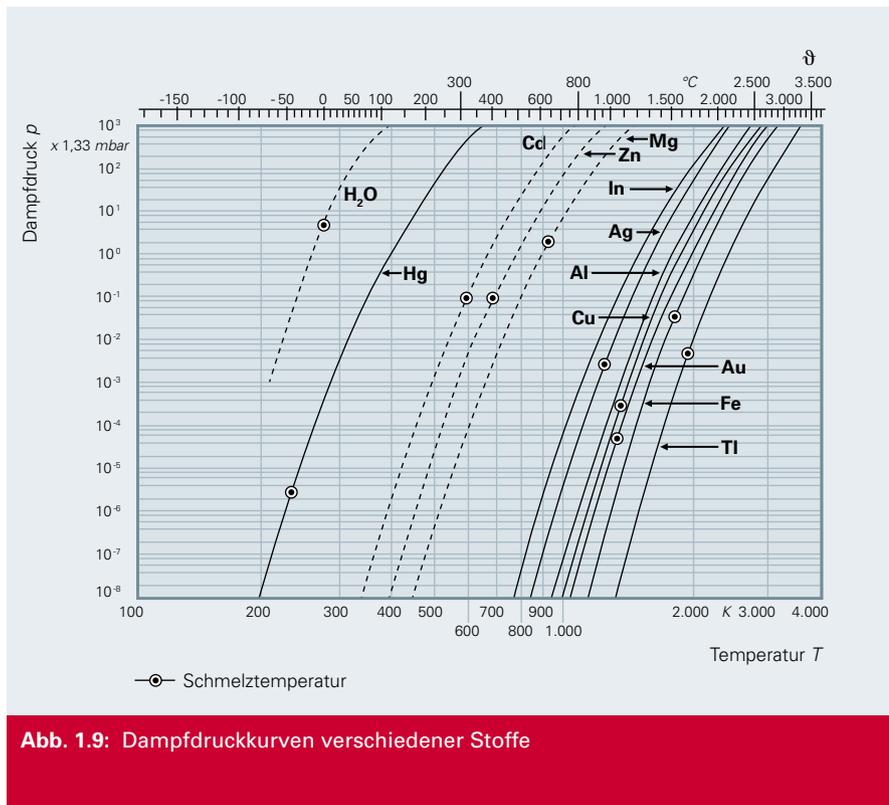


Abb. 1.9: Dampfdruckkurven verschiedener Stoffe

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

1.3.3 Desorption, Diffusion, Permeation und Lecks

Außer Wasser können auch noch andere Stoffe (Öl) an Oberflächen adsorbiert werden. Es diffundieren ebenfalls Stoffe aus den Metallwänden heraus, die man im Restgas nachweisen kann. Bei besonderen Anforderungen kann man Edelstahlbehälter unter Vakuum ausglühen und so den größten Teil der flüchtigen Bestandteile aus den Metallwänden austreiben.

Desorption

An den Innenflächen des Rezipienten werden durch Adsorption und Absorption Gasmoleküle (vorwiegend Wasser) gebunden, die unter Vakuum nach und nach wieder desorbieren. Die Desorptionsrate der Metall- und Glasoberflächen in der Vakuumanlage führt zu einem Gasanfall, der allerdings zeitabhängig ist. In guter Näherung kann davon ausgegangen werden, dass die Abnahme ab einem Zeitpunkt $t > t_0$ linear mit der Zeit erfolgt. t_0 wird typisch mit einer Stunde angenommen.

Der Gasanfall lässt sich damit beschreiben als:

Formel 1-24
Desorption

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t}$$

Hierin ist q_{des} die flächenbezogene Desorptionsrate des Werkstoffes, A die innere Oberfläche des Vakuumbehälters, t_0 der Startzeitpunkt und t die Zeit.

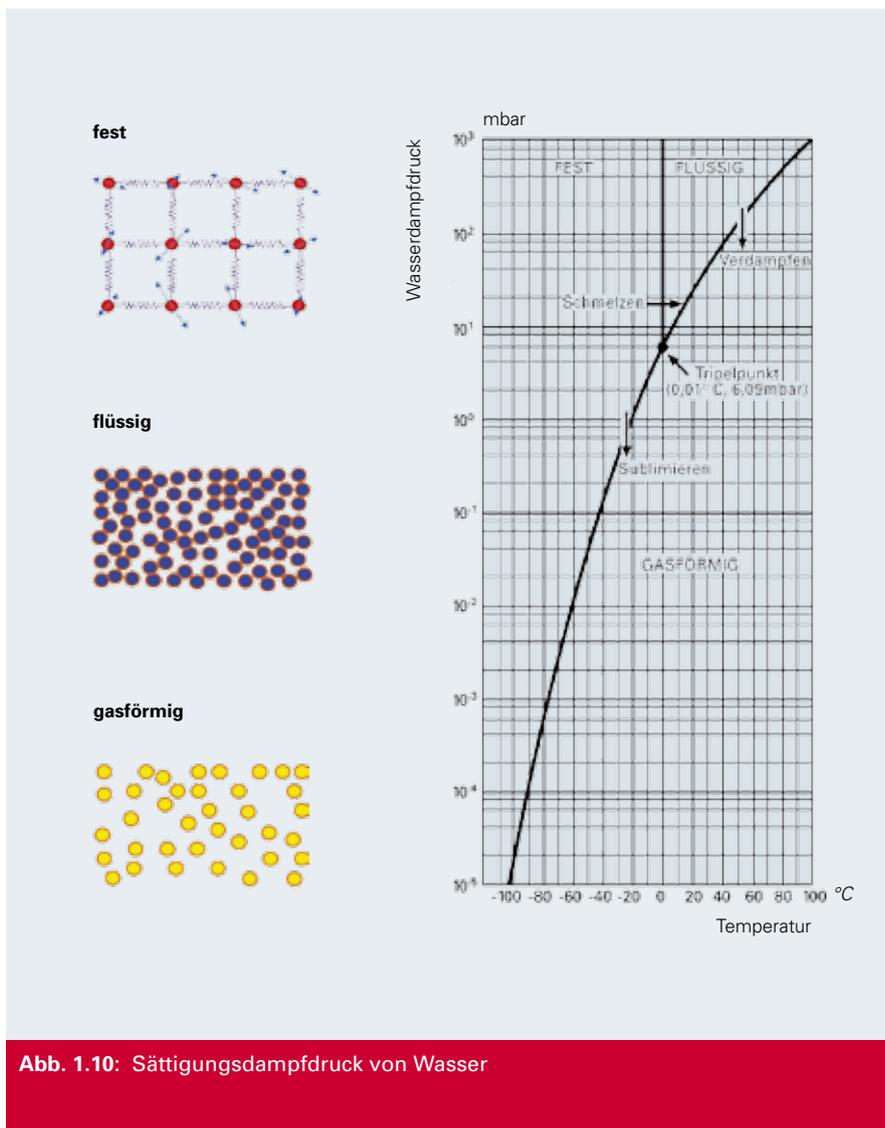


Abb. 1.10: Sättigungsdampfdruck von Wasser

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Diffusion mit Desorption

Bei Betrieb unterhalb 10^{-6} mbar erhält die Desorption von Kunststoffoberflächen, insbesondere bei Dichtungen, größere Bedeutung. Kunststoffe geben hauptsächlich die in ihnen gelösten Gase ab, die zunächst an die Oberfläche diffundieren müssen.

Nach längeren Abpumpzeiten kann daher die Desorption aus Kunststoffen über die der Metalloberflächen dominieren. Die Oberfläche der Dichtungen ist verhältnismäßig klein, die zeitliche Abnahme der Desorptionsrate ist jedoch langsamer als bei Metalloberflächen. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass die zeitliche Abnahme mit der Wurzel aus der Zeit erfolgt.

Der Gasanfall durch Kunststoffoberflächen lässt sich beschreiben als:

Formel 1-25
Desorption aus
Kunststoffen

$$Q_{diff} = q_{diff} \cdot A_d \sqrt{\frac{t_0}{t}}$$

A_d ist die Oberfläche der Kunststoffe im Vakuumbehälter und q_{diff} die flächenspezifische Desorptionsrate für den entsprechenden Kunststoff. Ähnliche Effekte treten bei noch tieferen Drücken auch bei Metallen auf, aus denen Wasserstoff und Kohlenstoff in Form von CO und CO₂ austreten und im Restgasspektrum zu sehen sind. Hierfür gilt ebenfalls Formel 1-25.

Permeation und Lecks

Dichtungen und sogar Metallwände können von kleinen Gasmolekülen wie z. B. Helium durch Diffusion durchdrungen werden. Dieser Prozess ist zeitunabhängig, führt also zu einer dauernden Erhöhung des angestrebten Enddruckes. Der Permeationsgasstrom ist proportional zu dem Druckgradienten p_o/d (d = Wandstärke, p_o = Atmosphärendruck = Außendruck) und der materialabhängigen Permeationskonstanten k_{perm} .

Formel 1-26
Permeation

$$k_{perm} \cdot Q_{perm} = k_{perm} \cdot A \cdot \frac{p_o}{d}$$

Permeation wird erst bei Drücken unter 10^{-8} mbar merkbar.

Mit Q_l bezeichnet man die Leckrate, also einen Gasfluss, der durch Undichtigkeiten in das Vakuumsystem mit dem Volumen V einströmt. Die Leckrate ist definiert als Druckanstieg Δp in der Zeit Δt :

Formel 1-27
Leckrate

$$Q_l = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t}$$

Wird der Behälter dauernd mit dem Saugvermögen S ausgepumpt, so stellt sich ein Gleichgewichtsdruck p_{gl} ein, wenn die Saugleistung (Formel 1-13) gleich der Leckrate ist $Q_l = S \cdot p_{gl}$. Eine Anlage gilt als hinreichend dicht, wenn der Gleichgewichtsdruck p_{gl} etwa 10 % des Arbeitsdruckes beträgt. Soll beispielsweise ein Arbeitsdruck von 10^{-6} mbar erreicht werden und hat die verwendete Vakuumpumpe ein Saugvermögen von 100 l/s, sollte die Leckrate nicht mehr als 10^{-5} mbar l/s betragen. Dies entspricht einem Leck von ca. $20 \cdot 20 \mu\text{m}^2$ Größe. Leckraten $Q_l < 10^{-8}$ mbar l/s sind in sauberen Edelstahlbehältern in der Regel leicht erreichbar.

Der nach einer bestimmten Zeit t erreichbare Enddruck hängt von allen oben beschriebenen Effekten sowie vom Saugvermögen der Vakuumpumpe ab. Natürlich wird vorausgesetzt, dass der Enddruck gegen den Basisdruck der Vakuumpumpe groß ist.

Für eine bestimmte Pumpzeit t kann man die einzelnen Druckanteile durch Einsetzen von

Formel 1-28
Enddruck (t)

$$Q_{des}(t) + Q_{diff}(t) + Q_{perm} + Q_l = p(t) \cdot S$$

und Auflösen der Gleichungen nach t berechnen. Der erreichbare Enddruck ist die Summe dieser Drücke.

1.3.4 Ausheizen

Zum Erreichen niedriger Drücke ($< 10^{-8}$ mbar) müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- ▶ Der Basisdruck der Vakuumpumpe sollte um einen Faktor 10 niedriger liegen als der geforderte Enddruck
- ▶ Es sind Rezipienten und Bauelemente aus rostfreiem Stahl zu verwenden
- ▶ Es sind Metaldichtungen (CF-Flanschverbindungen) erforderlich
- ▶ Pumpe und Apparatur müssen ausgeheizt werden
- ▶ Lecks müssen vermieden und vor Einschalten der Heizung beseitigt werden (Helium-Lecksucher verwenden!)
- ▶ Es ist sauberes Arbeiten erforderlich, d. h., alle Teile sind gründlich zu reinigen und mit fettfreien Handschuhen zu montieren

Durch Ausheizen werden die Desorptions- und Diffusionsraten stark erhöht [6], was zu wesentlich kürzeren Pumpzeiten führt. Es werden Ausheiztemperaturen bis zu 300 °C angewendet. Die Vorschriften der Pumpenhersteller bezüglich der maximalen Ausheiztemperaturen sowie über zulässige Strahlungsleistungen in den Pumpenflansch sind zu beachten.

Nach der Montage wird die Apparatur und nach Erreichen eines Druckes $p < 10^{-5}$ mbar die Heizung eingeschaltet. Während des Heizens sind alle Messröhren zu betreiben und in Zeiträumen von zehn Stunden zu entgasen. Um in den Druckbereich 10^{-10} mbar vorzustoßen, sind bei Edelstahlbehältern und Verwendung von Metaldichtungen Ausheiztemperaturen von 120 °C und Heizzeiten von ca. 48 Stunden ausreichend. Das Ausheizen soll so lange fortgesetzt werden, bis das 100-fache des erwarteten Enddruckes erreicht ist. Dann werden die Heizungen von Pumpe und Vakuumkammer abgeschaltet. Nach dem Abkühlen wird wahrscheinlich der gewünschte Enddruck erreicht. Bei Drücken $p < 5 \cdot 10^{-10}$ mbar und großen inneren Oberflächen ist die Verwendung einer Titansublimationspumpe, die den aus Metallen austretenden Wasserstoff mit hohem Saugvermögen pumpt, von Vorteil.

1.3.5 Restgasspektrum

Für das Arbeiten im UHV kann es von Bedeutung sein, die Zusammensetzung des Restgases zu kennen. Bei nicht sauberen bzw. nicht gut ausgeheizten Vakuumkammern sind die Anteile von Wasser ($M = 18$) und dessen Fragment HO ($M = 17$) groß. Lecks erkennt man an den Peakhöhen von Stickstoff ($M = 28$) und Sauerstoff ($M = 32$) im Verhältnis $N_2/O_2 = 4/1$.

In gut ausgeheizten Kammern findet man Wasserstoff ($M = 2$), Wasser ($M = 17$ und 18), Kohlenmonoxid ($M = 28$) und Kohlendioxid ($M = 44$). Bei der Verwendung von Turbomolekularpumpen findet man keine Kohlenwasserstoffe. Sie werden aufgrund der hohen molekularen Massen und der daraus resultierenden hohen Kompressionsverhältnisse sehr effektiv aus der Kammer ferngehalten. Das typische Restgasspektrum eines sauberen, von einer Turbomolekularpumpe evakuierten Behälters, zeigt Abbildung 2.23.

1.3.6 Fluten

Zur Vermeidung von unerwünschten Verunreinigungen sollen Vakuumbehälter anstelle von Luft mit trockenem Stickstoff geflutet werden. Dadurch wird die Ablagerung von Wasserdampf an den Behälterwänden verhindert, der beim nachfolgenden Evakuieren nur schwer desorbiert.

2 Vakuumerzeugung

2.1 Pumpprinzipien und Leistungsdaten von Vakuumpumpen

2.1.1 Einteilung der Vakuumpumpen

Bei Vakuumpumpen unterscheidet man gasfördernde und gasbindende Vakuumpumpen. Während Erstere zeitlich unbeschränkt einsetzbar sind, haben Letztere eine beschränkte Gasaufnahmekapazität und müssen nach einem bestimmten prozessabhängigen Rhythmus regeneriert werden.

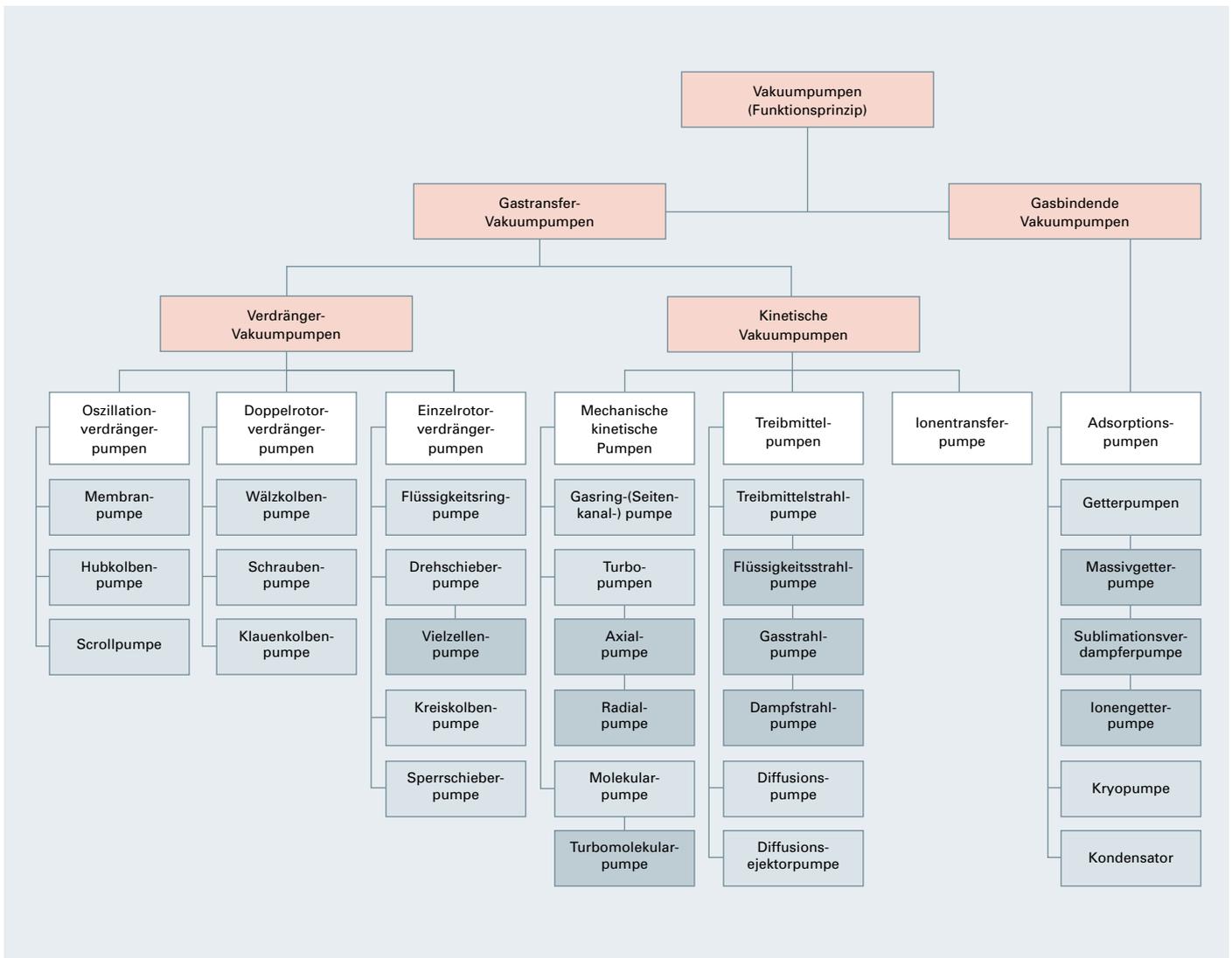


Abb. 2.1: Übersicht Vakuumpumpen

Die gasfördernden sogenannten Gastransferpumpen, werden in Verdrängerpumpen und kinetische Vakuumpumpen eingeteilt. Verdrängerpumpen fördern das Gas aus abgesperrten Räumen in die Atmosphäre oder in eine nachgeschaltete Pumpstufe. Kinetische Pumpen hingegen fördern das Gas durch Beschleunigung in Pumprichtung. Dies geschieht entweder anhand eines mechanischen Antriebs oder durch einen gerichteten Dampfstrahl, der am Ende der Pumpstrecke kondensiert wird. Gasbindende Vakuumpumpen binden das Gas entweder mittels Getterung an ein besonders aktives Substrat oder sie kondensieren das Gas bei geeigneter Temperatur.

2.1.2 Saugvermögen und Saugleistung

Das Saugvermögen $S = \frac{dV}{dt}$ (Formel 1-12) ist der mittlere Volumenstrom durch den Querschnitt der Ansaugöffnung einer Vakuumpumpe. Es wird im Saugvermögensdiagramm in Abhängigkeit vom Ansaugdruck der Pumpe aufgetragen. Als Nennsaugvermögen wird immer das maximal erreichbare Saugvermögen der Pumpe bezeichnet. Die Bestimmung des Saugvermögens ist in der Basisnorm ISO 21360-1 beschrieben. Das Saugvermögen wird in m^3/s angegeben. Gebräuchlich sind auch die Einheiten m^3/h , l/s und l/min .

Die Saugleistung $q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$ (Formel 1-13) gibt den Gasdurchsatz durch eine Vakuumpumpe in Abhängigkeit vom Ansaugdruck an. Sie wird in $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ oder $\text{mbar} \cdot \text{l}/\text{s}$ angegeben. Bei Pumpständen aus gasfördernden Pumpen ist die Saugleistung aller Pumpen gleich.

2.1.3 Enddruck und Basisdruck

Der Enddruck p_e ist der niedrigste Wert, dem sich der Druck einer blindgeflanschten Vakuumpumpe unter definierten Randbedingungen ohne Gaseinlass asymptotisch nähert. Arbeitet eine Pumpe im Enddruck, so ist das nutzbare Saugvermögen null, da sie nur ihre eigenen Rückströmverluste fördert. Der Enddruck ist ein theoretischer Wert. Anstelle des Enddruckes wird heute der Basisdruck angegeben. Die Bedingungen zum Erreichen des Basisdruckes sind in der Norm ISO 21360-1 angegeben. Da der Basisdruck in einer vorgeschriebenen Zeit erreicht werden muss, liegt er meistens höher als der Enddruck.

2.1.4 Kompressionsverhältnis

Als Kompressionsverhältnis bezeichnet man das maximale Druckverhältnis zwischen Ausstoßdruck p_2 und Saugdruck p_1 :

Formel 2-1
Kompressionsverhältnis

$$K_0 = \frac{p_2}{p_1}$$

Man misst das Kompressionsverhältnis bei blind geflanschem Saugstutzen durch Gaseinlass auf der Ausstoßseite.

2.1.5 Saugvermögen von hintereinander geschalteten Pumpstufen

Betrachten wir eine Vakuumpumpe mit dem Saugvermögen S_0 und dem Kompressionsverhältnis K_0 : Die Pumpe hat Rückströmverluste über Spalte mit dem Leitwert L_R . Der Eingangsdruck sei p_1 und der Ausstoßdruck sei p_2 . Auf der Ausstoßseite sei eine weitere Pumpe mit dem Saugvermögen S_v angeschlossen.

Der Pumpstand fördert die Gasmenge

Formel 2-2

Gasstrom Pump-
kombination

$$q_{pV} = p_1 \cdot S = p_2 \cdot S_v = S_0 \cdot p_1 - L_R \cdot (p_2 - p_1)$$

Für den Rückströmleitwert L_R gilt mit $L_R \ll S_0$:

Formel 2-3

Rückströmleitwert

$$L_R = \frac{S_0}{K_0}$$

und für das reale Kompressionsverhältnis:

Formel 2-4

Reales Kompres-
sionsverhältnis

$$K = \frac{p_2}{p_1} = \frac{S}{S_v}$$

Daraus folgt mit obigen Formeln für das Saugvermögen S eines zweistufigen Pumpstandes:

Formel 2-5

Rekursionsformel
Saugvermögen

$$S = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_v}}$$

Diese Formel kann man als Rekursionsformel beim Hintereinanderschalten von mehreren Pumpstufen verwenden, indem man mit dem Saugvermögen S_v der letzten Stufe beginnt und K_0 und S_0 der davorliegenden Stufe einsetzt.

2.1.6 Gasballast

Als Gasballast bezeichnet man eine Einrichtung, durch die Luft oder ein anderes nicht kondensierendes Gas in eine Vakuumpumpe eingelassen wird. Fördert die Pumpe Dampf, der bei entsprechenden Temperaturen ohne Gasballast kondensieren würde, so ermöglicht der Gasballast eine Öffnung des Auslassventils, bevor Dampfkondensation eintritt. Der Dampf wird dann mit dem Ballastgas ausgestoßen. Als Ballastgas werden atmosphärische Luft sowie speziell ausgewählte Inert- oder Prozessgase verwendet. Durch den Einsatz des Gasballastes steigt der erreichbare Basisdruck einer Vakuumpumpe geringfügig an. Deshalb wird bei Vakuumpumpen mit Gasballasteinrichtung der Basisdruck generell sowohl mit als auch ohne Gasballast angegeben.

2.1.7 Wasserdampfverträglichkeit / Wasserdampfkapazität

Die Wasserdampfverträglichkeit p_{w0} ist der höchste Wasserdampfdruck, mit dem eine Vakuumpumpe unter normalen Umgebungsbedingungen (20 °C, $p_0 = 1.013 \text{ mbar}$) reinen Wasserdampf dauernd ansaugen und fördern kann. Sie kann aus Saugvermögen, Gasballastmenge, Luftfeuchtigkeit und Sättigungsdampfdruck bei der vorhandenen Pumpentemperatur berechnet werden und wird in mbar angegeben [7].

Formel 2-6

Wasserdampf-
verträglichkeit

$$p_{w0} = \frac{q_{pB} \cdot (p_s - p_l)}{S \cdot (\alpha \cdot p_0 - p_s)}$$

Die Bestimmung der Wasserdampfverträglichkeit über ein indirektes Verfahren ist in der DIN 28426 beschrieben. Die Wasserdampfverträglichkeit steigt bei höherer Auspufftemperatur der Pumpe und größerer Gasballastmenge q_{pB} . Sie sinkt bei höherem Umgebungsdruck.

Ohne Gasballast ist eine Vakuumpumpe mit einer Auspufftemperatur unter 100 °C nicht in der Lage auch nur geringe Mengen reinen Wasserdampfes zu fördern. Wird trotzdem Wasserdampf ohne Gasballast gepumpt, löst sich das Kondensat im Pumpenöl. Als Konsequenz davon steigt der Basisdruck und das Kondensat kann zu Korrosionsschäden führen.

Die Wasserdampfkapazität

Formel 2-7
Wasserdampfkapazität

$$c_{w0} = p_{w0} \cdot S$$

ist die größte Wassermenge, die eine Vakuumpumpe je Zeiteinheit unter den Umgebungsbedingungen von 20 °C und 1.013 mbar in Form von Wasserdampf dauernd ansaugen und fördern kann.

2.1.8 Sperrgas

Beim Pumpen korrosiven Prozessgases besteht die Gefahr, dass dieses Teile der Pumpe angreift. Um dieser Gefahr zu begegnen, müssen empfindliche Teile, z. B. die Lagerstellen, durch einen kontinuierlichen Inertgasstrom geschützt werden. Zu diesem Zweck wird ein spezielles Gaseinlasssystem in die Pumpen eingebaut, durch das Gas über die Lagerstellen in das Pumpsystem strömt. Hierbei muss besonders darauf geachtet werden, dass der Basisdruck nicht übermäßig ansteigt.

2.2 Drehschieberpumpen

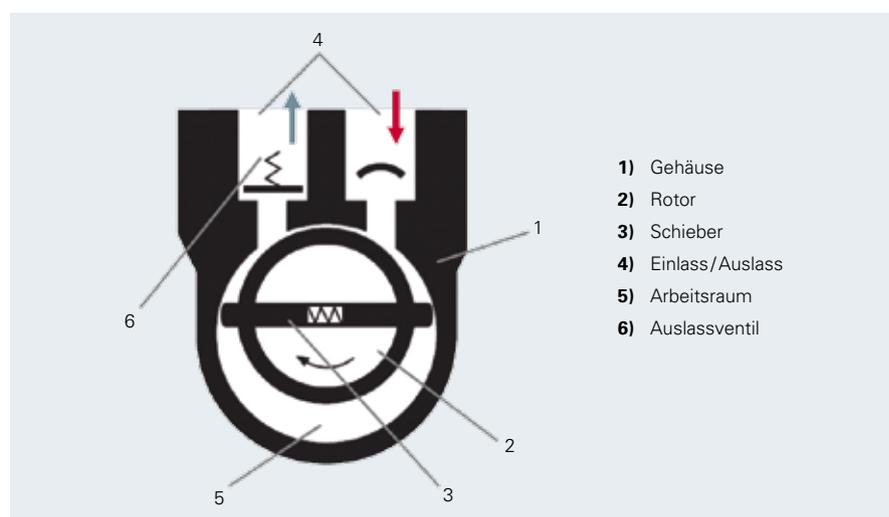


Abb. 2.2: Funktionsprinzip der Drehschieberpumpe

2.2.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Die Drehschieberpumpe ist eine ölüberlagerte Rotationsverdrängerpumpe. Das Pumpsystem besteht aus dem Gehäuse (1), dem exzentrisch eingebauten Rotor (2), den mit Federkraft radial bewegten Schiebern (3) und dem Ein- bzw. Auslass (4). Das Auslassventil ist ölüberlagert. Das Einlassventil ist, sofern vorhanden, als Vakuumsicherheitsventil ausgebildet und im Betrieb immer geöffnet. Im Inneren des Gehäuses befindet sich der Arbeitsraum (5). Rotor und Schieber teilen den Arbeitsraum in zwei separate Räume mit veränderlichem Volumen. Dreht sich der Rotor, strömt Gas in den expandierenden Schöpfraum, bis dieser durch den zweiten Schieber abgesperrt wird. Anschließend wird das eingeschlossene Gas soweit komprimiert, bis sich das Auslassventil gegen den Atmosphärendruck öffnet. Bei Gasballastbetrieb wird eine Bohrung nach außen geöffnet, die stirnseitig in den abgeschlossenen Schöpfraum mündet.

Betriebsmittel, Öl

Das Pumpenöl, auch Betriebsmittel genannt, erfüllt in einer Drehschieberpumpe verschiedene Aufgaben: Es schmiert alle beweglichen Teile und füllt den schädlichen Raum unter dem Auslassventil, sowie den engen Spalt zwischen Ein- und Auslass. Es dichtet die Spalte zwischen den Schiebern und dem Arbeitsraum und sorgt durch Wärmetransport darüber hinaus für einen optimalen Temperaturhaushalt.

Mehrstufige Pumpen

Drehschieberpumpen werden in ein- und zweistufigen Ausführungen gebaut. Zweistufige Pumpen erreichen niedrigere Enddrücke als einstufige. Auch sind die Auswirkungen des Gasballastes auf den Enddruck geringer, da das Ballastgas nur in die zweite Stufe eingelassen wird.

Vakuum-Sicherheitsventil

Je nach Pumpentyp sind die Drehschieberpumpen mit einem Vakuum-Sicherheitsventil ausgestattet. Dieses trennt bei gewolltem wie ungewolltem Stillstand die Pumpe vom Rezipienten und belüftet das Pumpsystem mit dem geförderten Gas, damit kein Öl in den Rezipienten aufsteigt. Nach Einschalten der Pumpe öffnet es verzögert, nachdem der Druck in der Pumpe in etwa den Druck im Rezipienten erreicht hat.

2.2.2 Anwendungshinweise

Drehschieberpumpen sind universell im gesamten Grob- und Feinvakuumbereich einsetzbar. Je nach Druckbereich ergibt sich der Einsatz einer ein- oder zweistufigen Pumpe. Ideale Einsatzbedingungen existieren immer dann, wenn das abzupumpende Medium bei Betriebstemperatur der Pumpe und Atmosphärendruck nicht kondensiert.

Dämpfe

Bei Destillationen und Trocknungsprozessen müssen auch Dämpfe gefördert werden, die während der Kompressionsphase ganz oder teilweise in der Pumpe kondensieren können. Hier hilft die Öffnung des Gasballastventils, um den Dampf ohne Kondensation durch die Pumpe zu fördern. Die Dampfverträglichkeit ist jedoch nicht immer ausreichend, um die Kondensation zu verhindern. Kondensate vermischen sich mit dem Öl, bewirken eine Erhöhung des Enddruckes sowie eine Herabsetzung der Schmierfähigkeit des Betriebsmittels und können innerhalb der Pumpe zu Korrosion führen.

Filter

In gewissen Grenzen können Filter und Abscheider die Vakuumpumpe vor Verschleiß und Korrosion schützen. Abscheider mit Filtereinsätzen aus Papier (STP), mit Füllkörpern, die mit Öl benetzt sind (STR), oder zusätzlich mit Zyklon (STZ), binden Staub. Aktivkohlefilter (FAK) binden anorganische Dämpfe und Bleicherdefilter (FBL) können der Pumpe zur Absorption von organischen Dämpfen vorgeschaltet werden. Ihre Füllungen sind auswechselbar. Einströmende Kohlenwasserstoffe (Öldampf) können in der beheizten Katalysatorfalle (URB) katalytisch verbrannt werden. Zeolithfallen adsorbieren verschiedene Dämpfe und können bei Sättigung durch eine Ausheizvorrichtung regeneriert werden. Kondensate können im Kondensatabscheider (KAS) gesammelt und von Hand abgelassen werden. Chemische Ölfilter (OFC) reinigen das Pumpenöl mithilfe der in die Drehschieberpumpe integrierten Ölpumpe.

Bei hohen Gasdurchsätzen und auch bei Gasballastbetrieb wird Ölnebel aus der Pumpe mitgerissen. Man rechnet mit 4 ml Ölverlust bei einem Durchsatz von $1 \text{ bar} \cdot \text{m}^3$ Gas. Der Öldampf kann im Ölnebelfilter (ONF) abgeschieden und mit einer zusätzlichen Rückführung wieder in den Ölkreislauf der Pumpe eingebracht werden.

Werden jedoch auch Stoffe gefördert, die das Pumpenöl chemisch zersetzen oder einen so niedrigen Dampfdruck haben, dass trotz Gasballast und dem oben erwähnten Zubehör Kondensation in der Pumpe nicht vermieden werden kann, sollte ein anderer Vorpumpentyp gewählt werden.

2.2.3 Portfolioüberblick

Pfeiffer Vacuum Drehschieberpumpen gibt es in ein- und zweistufiger Ausführung.

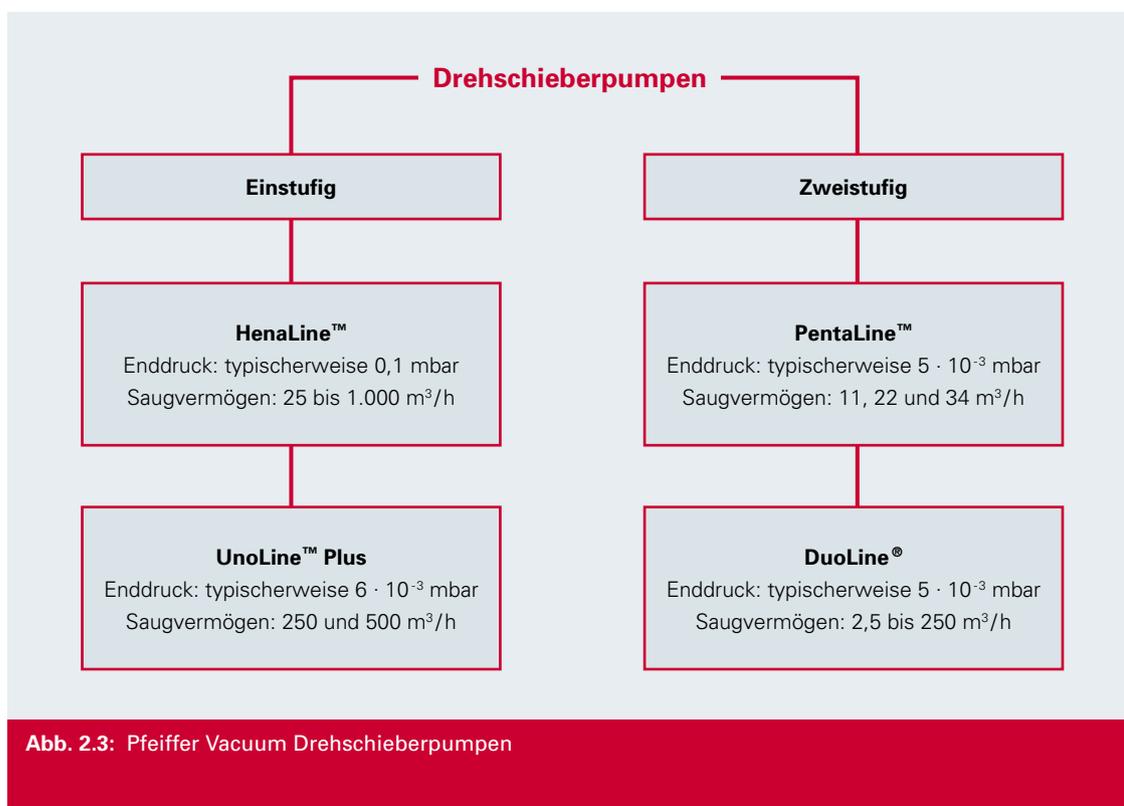


Abb. 2.3: Pfeiffer Vacuum Drehschieberpumpen

2.2.3.1 Einstufige Drehschieberpumpen

HenaLine™

Die einstufigen, ölgedichteten Drehschieberpumpen der HenaLine erzeugen mit einem Saugvermögen von 25 bis 1.000 m³/h ein Vakuum mit einem Enddruck bis 0,1 mbar. In vielen Bereichen von Industrie und Forschung sind sie universell einsetzbar. Sie werden entweder als Einzelpumpe betrieben oder in Pumpstände integriert.

Die Pumpen eignen sich mit entsprechendem Zubehör auch für den Einsatz unter schwierigsten Betriebsbedingungen, so z. B. bei hohen Ansaugdrücken sowie im Zyklusbetrieb. Ölnebelabscheider, Ölrückführung und Vakuum-Sicherheitsventile sind serienmäßig vorhanden. Sie verhindern nicht nur eine Verschmutzung der Umgebungsluft, sondern schützen auch Pumpe und Anlage. Ein Gasballastventil ermöglicht das Abpumpen von Wasserdampf und anderen Prozessdämpfen.

Tabelle 2.1: Kenndaten HenaLine™

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Hena 25	25 m ³ /h	0,1 mbar	Geeignet für Elektronenstrahlschweißen, Glühlampenfertigung, Oberflächenbeschichtung, Vakuumtrocknung, Lecksuche, Metallurgie, Gasrückgewinnung, Load-lock-Anwendungen, Simulationskammern.
Hena 60	60 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 100	100 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 200	200 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 300	300 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 400	600 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 630	630 m ³ /h	0,1 mbar	
Hena 1000	1.000 m ³ /h	0,4 mbar	

UnoLine™ Plus

UnoLine Plus Pumpen sind vor allem bei industriellen Anwendungen optimal einsetzbar. Diese Drehschieberpumpen haben sich als Einzelpumpen sowie als Vorpumpen für Pfeiffer Vacuum Wälzkolbenpumpen seit Jahren bewährt. Erreicht wird ein Enddruck von etwa $6 \cdot 10^{-2}$ mbar. Die Pumpen sind wassergekühlt und äußerst unempfindlich gegen Stäube und Schmutz. Sie sind mit einer Ölregenerierungseinrichtung ausgestattet.

Kondensate, Schmutz und Staubeile können, vom Betriebsmittel getrennt, im Brüdenabscheider gesammelt und abgelassen werden. Durch den einstellbaren Kühlwasserregler werden die UnoLine Plus Pumpen auf der erforderlichen Betriebstemperatur gehalten. Zum Abpumpen von Dämpfen sind die Pumpen mit einer Gasballasteinrichtung ausgerüstet.

Tabelle 2.2: Kenndaten UnoLine™ Plus

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
BA 251	250 m ³ /h	$6 \cdot 10^{-2}$ mbar	Geeignet für alle Industrieanwendungen z. B. Metallurgie, Trafotrocknung, Beschichtung, Chemie
BA 501	500 m ³ /h	$6 \cdot 10^{-2}$ mbar	

2.2.3.2 Zweistufige Drehschieberpumpen

Zweistufige Drehschieberpumpen sind für Anwendungen im Grob- und Feinvakuumbereich bis zu einem Druck von 10^{-3} mbar geeignet. Sie sind mit einem Vakuumsicherheitsventil ausgerüstet, das Ölverschmutzung im Rezipienten verhindert. Eine eingebaute Gasballasteinrichtung erlaubt das Abpumpen von kondensierbaren Dämpfen.

PentaLine™

Pumpen der Baureihe PentaLine zeichnen sich durch ihr neuartiges Antriebskonzept aus. Die Pumpen werden von einem elektronisch gesteuerten kollektorlosen Gleichstrommotor angetrieben, dessen Rotor direkt auf der Rotorwelle des Pumpsystems sitzt. Die Pumpen werden mit Wechselstrom über einen elektronischen Umformer mit Strom versorgt. Über einen Umschalter kann man die beiden Spannungsbereiche 100 – 120 Volt und 200 – 240 Volt wählen. Vorteile sind die hohe Energieeffizienz mit ca. 25 % Energieeinsparung gegenüber herkömmlichen Drehschieberpumpen und die hermetische Abdichtung der Pumpe ohne Wellendurchführung. Zur Energieeinsparung um weitere 50 % kann, falls die maximale Leistungsfähigkeit der Pumpe zwischenzeitlich nicht benötigt wird, die Drehzahl der Pumpe auf „Standby“ reduziert werden.

Durch das neue Antriebskonzept werden auch die bei Asynchronmotoren üblichen hohen Anlaufströme, speziell bei kalter Pumpe, vermieden. Neben der oben angesprochenen Gasballasteinrichtung kann bei der PentaLine die Pumpe zur Erhöhung der Wasserdampfverträglichkeit temperaturgeregelt betrieben werden. Über eine SPS-kompatible Schnittstelle oder einen Remoteanschluss können die Funktionen *Pumpe EIN*, *Standby EIN* sowie *erhöhte Wasserdampfverträglichkeit EIN* gewählt werden.

Tabelle 2.3: Kenndaten PentaLine™

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Penta 10	11 m ³ /h	$5 \cdot 10^{-3}$ mbar	Ideal geeignet für Turbopumpstände, Analytik, Industrie, Forschung & Entwicklung, Beschichtung
Penta 20	22 m ³ /h	$5 \cdot 10^{-3}$ mbar	
Penta 35	34 m ³ /h	$5 \cdot 10^{-3}$ mbar	

DuoLine®

Die Drehschieberpumpen der DuoLine werden je nach Größe mit Wechsel- oder Drehstrommotoren angetrieben. Neben den Standardtypen stehen folgende Baureihen zur Verfügung: Pumpen mit Magnetkupplung (Duo M-Reihe) sowie Korrosivgaspumpen mit und ohne Magnetkupplung (Duo (M)C-Reihe).

Tabelle 2.4: Kenndaten DuoLine®

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Duo 2.5	2,5 m ³ /h	$6 \cdot 10^{-3}$ mbar	Geeignet für Turbopumpstände, Analytik, Forschung & Entwicklung, Beschichtung
Duo 35	35,0 m ³ /h	$3 \cdot 10^{-3}$ mbar	
Duo 120	120,0 m ³ /h	$6 \cdot 10^{-3}$ mbar	
Duo 255	250,0 m ³ /h	$5 \cdot 10^{-3}$ mbar	

Duo M-Reihe

Pumpen der M-Reihe sind mit einer Magnetkupplung mit Spaltrohr ausgestattet. Durch dieses verschleißfreie Dichtungskonzept sind die Pumpen hermetisch dicht und damit sauber und umweltverträglich. Der Einsatz der Magnetkupplung minimiert die Wartung und führt dadurch zu erheblichen Kosteneinsparungen.

Tabelle 2.5: Kenndaten Duo M-Reihe

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Duo 5 M	5 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	Ideal geeignet für Turbopumpstände, Analytik, Forschung & Entwicklung, Beschichtung, nicht explosive, toxische Gase
Duo 10 M	10 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 20 M	20 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 35 M	35 m ³ /h	3 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 65 M	65 m ³ /h	3 · 10 ⁻³ mbar	

Duo C- und Duo MC-Reihe

Pumpen der C-Reihe sind für Korrosivgasanwendungen geeignet. Sie unterscheiden sich von den Standardpumpen durch ein spezielles Gasballastventil, anhand dessen Inertgas in die Pumpe eingelassen werden kann. Daneben sind die Pumpen mit Spezialschiebern ausgestattet, die besonders widerstandsfähig gegen Chemikalien sind. Alle Korrosivgaspumpen sind für den Betrieb mit den chemieresistenten Betriebsmitteln F4 bzw. F5 (Perflourpolyether) vorbereitet. Die Duo MC-Pumpen sind besonders zum Pumpen toxischer Gase geeignet, da durch die hermetisch dichte Magnetkupplung kein Gas nach außen dringen kann.

Tabelle 2.6: Kenndaten Duo C- und Duo MC-Reihe

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Duo 5 MC	5,0 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	Geeignet für Korrosivgasanwendungen, Chemielabors, toxische nicht explosive Gase
Duo 10 MC	10,0 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 20 MC	20,0 m ³ /h	5 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 2.5 C	2,5 m ³ /h	6 · 10 ⁻³ mbar	Geeignet für Korrosivgasanwendungen, Chemielabors
Duo 35 C	35,0 m ³ /h	3 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 65 C	65,0 m ³ /h	3 · 10 ⁻³ mbar	
Duo 120 C	120,0 m ³ /h	3 · 10 ⁻³ mbar	

2.2.3.3 Auswahl des Betriebsmittels

Da das Betriebsmittel mit dem Fördermedium in Berührung kommt, ist es dessen Einflüssen ausgesetzt. Es sollte daher je nach Anwendung individuell ausgewählt werden. Pfeiffer Vacuum bietet vier verschiedene Betriebsmittelsorten an, die allen gängigen Anwendungen gerecht werden. Die Pumpen sind ab Werk auf das jeweilige Betriebsmittel voreingestellt.

Nur bei Verwendung dieser von Pfeiffer Vacuum empfohlenen Betriebsmittel können die im Katalog angegebenen Enddruckwerte der Drehschieberpumpen gewährleistet werden. Für Schäden, die auf den Einsatz anderer Betriebsmittel zurückzuführen sind, kann keine Gewährleistung übernommen werden. Verschiedene Öle dürfen untereinander auf keinen Fall vermischt werden. Sie sind teilweise nicht mischbar und können deshalb zu Schäden am Pumpsystem führen.

Tabelle 2.7: Ölsorten für Vorpumpen und Wälzkolbenpumpen

<p>P3</p>	<p>Hochwertiges Mineralöl für Standardapplikationen Extrem niedriger Dampfdruck Erreichbarer Enddruck: $< 1 \cdot 10^{-3}$ mbar Betriebstemperatur: max. 95 °C</p> <p>Zum Abpumpen von: Luft, Inertgasen, Edelgasen</p>
<p>D1</p>	<p>Diesteröl für Standard- und Sonderapplikationen Erreichbarer Enddruck: $< 5 \cdot 10^{-2}$ mbar Betriebstemperatur max.: 120 °C</p> <p>Zum Abpumpen von: Luft, Inertgasen, Edelgasen, Sauerstoff, schwach aggressiven und organischen Lösungsmitteln</p>
<p>F4 (für Pumpen < 20 m³/h)</p> <p>F5 (für Pumpen > 20 m³/h)</p>	<p>Perflourpolyether für Sonderapplikationen Erreichbarer Enddruck: $< 1 \cdot 10^{-3}$ mbar Betriebstemperatur max.: 120 °C</p> <p>Zum Abpumpen von: Sauerstoff, Ozon, Halogenen, organischen und anorganischen Lösungsmitteln, HCl, BF₃, HF, Fluor</p>

2.2.3.4 Zubehör

Staubabscheider (STP, STR, STZ)

Wenn prozessbedingt Stäube anfallen, muss der Pumpe ein Staubabscheider vorgeschaltet werden. Entsprechend dem Verschmutzungsgrad der abgepumpten Gase und der Partikelgröße stehen verschiedene Ausführungen zur Verfügung.

Kondensatabscheider (KAS)

In den Ansaug- und Auspuffleitungen eines Vakuumsystems können sich beim Abpumpen von Dämpfen Kondensate bilden. Um die Pumpe vor diesen Kondensaten zu schützen, empfiehlt es sich, sowohl in der Ansaug- als auch in der Auspuffleitung einen Kondensatabscheider vorzusehen.

Ölnebelabscheider (ONF)

Ölnebelabscheider werden auf den Auspuffstutzen von Drehschieberpumpen montiert. Sie verhindern die Luftverschmutzung durch Ölnebel, die von den Pumpen je nach Arbeitsdruck in mehr oder weniger großen Mengen ausgestoßen werden. Der Abscheider besteht aus zylindrischen Filterelementen und einem Aluminiumgehäuse mit Ölsammelraum.

Ölrückführungseinrichtung (ORF)

Zum Sammeln und Rückführen von vernebeltem Pumpenöl wurde die ORF entwickelt. Sie trägt zu einer Senkung der Betriebskosten vor allem bei der Verwendung von Spezialölen in der Fluor- und Kerntechnik bei. Dabei wird das im ONF anfallende Öl in einem Behälter gesammelt und beispielsweise mit einer Förderpumpe in die Vakuumpumpe zurückgeführt.

Zeolithfalle (ZFO)

Die Zeolithfalle verhindert die Rückströmung von Kohlenwasserstoffen aus Drehschieberpumpen zu vorgeschalteten Hochvakuum-Bauteilen durch Adsorption. Durch Ausheizen bei 300 °C kann das Adsorptionsmittel regeneriert werden. Die Regenerationsintervalle sind prozessabhängig.

Katalysatorfalle (URB)

Die Katalysatorfalle verhindert eine Rückströmung von Kohlenwasserstoffen aus ein- oder zweistufigen Drehschieberpumpen. Dies geschieht durch katalytische Verbrennung derselben zu CO₂ und Wasserdampf bei einer Betriebstemperatur von 250 °C. Zur Selbstregeneration genügt der durch die periodischen Belüftungen der Prozesskammer zugeführte Sauerstoff. Die Regenerationsintervalle sind somit prozessunabhängig. Bei direktem Einbau der Falle auf den Saugstutzen und/oder beim Einsatz an einstufigen Drehschieberpumpen ist Wasserkühlung erforderlich.

Aktivkohlefilter (FAK)

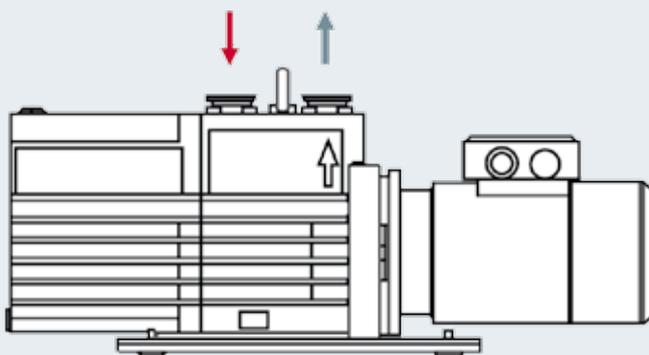
Aktivkohlefilter werden beim Anfall von H₂S-, HCN-, Hg-, NH₃-, SO₂-Dämpfen, nitrosen Gasen sowie dampfförmigen Lösungsmitteln, Säuren und Laugen eingesetzt. Die Aktivkohlefilter werden mit einer Füllung geliefert. Ein Austausch der Aktivkohlefüllung ist möglich. Ihre Standzeit ist prozessabhängig.

Bleicherdefilter (FBL)

Das Bleicherdefilter schützt die Drehschieberpumpe sowie das Betriebsmittel durch Adsorption organischer Dämpfe. Ein Austausch der Bleicherdefüllung ist möglich. Ihre Standzeit ist prozessabhängig. Das Filter wird beim Anfall von Peroxyden, Hydroperoxyden und Polykondensation in der Petro-, Kunststoff- und Harzchemie eingesetzt.

Chemisches Ölfilter (OFC)

Das chemische Ölfilter wird in den Ölkreislauf von Drehschieberpumpen geschaltet. Mit dem Ölfilter werden Stäube bzw. Partikel, die aus dem Prozess in das Betriebsmittel gelangen, herausgefiltert. Außerdem absorbiert das chemische Ölfilter korrosive Substanzen aus dem Betriebsmittel. Damit reduziert sich der Verschleiß der Pumpe.



Einlass

Anwendung: zum Schutz der Pumpe und des Betriebsmittels

Staubabscheider (STP, STR, STZ)

- ▶ Verhindert, dass Stäube in die Pumpe gelangen
- ▶ STP einstufiges Filter mit Zyklon und Papiereinsatz
- ▶ STR zweistufiges Filter mit Zyklon und ölbenetzten Füllkörpern
- ▶ STZ zweistufiges Filter mit Zyklon und Papiereinsatz

Katalysatorfalle URB

- ▶ Verhindert die Rückströmung von Pumpenöl in den Vakuumrezipienten
- ▶ Arbeitet mit katalytischer Verbrennung

Zeolithfalle ZFO

- ▶ Verhindert Ölrückströmung
- ▶ Zeolithe binden rückströmendes Pumpenöl
- ▶ Regenerierbar durch optionalen Heizstab

Auslass

Anwendung: verhindert das Entweichen von Pumpenölnebel in die Umgebung

Ölnebelabscheider ONF

- ▶ Verhindert, dass Öldampf in die Atmosphäre gelangt
- ▶ Abscheidegrad bei sauberem Filter > 99,98 %

Ölrückführung ORF

- ▶ Führt Öl aus dem Ölnebelabscheider ONF wieder der Pumpe zu

Kondensatabscheider KAS

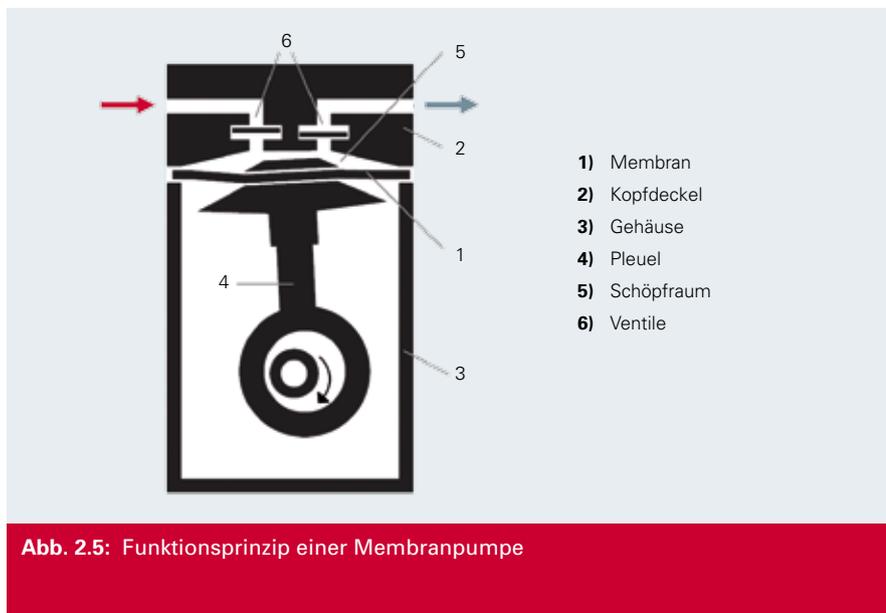
- ▶ Am Einlass und am Auslass: verhindert den Eintritt von Kondensaten in die Pumpe
- ▶ Abscheider für kondensierte Dämpfe
- ▶ Schauglas zur Bestimmung des Füllstandes
- ▶ Ablassschraube zum Ablassen des Kondensates

Abb. 2.4: Zubehör für Drehschieberpumpen

2.3 Membranpumpen

2.3.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Membranpumpen sind trockene Verdrängerpumpen. Ihre Funktion wird mithilfe von Abbildung 2.5 erläutert. Ein von einer Pleuelwelle angetriebener Pleuel (4) bewegt die zwischen Kopfdeckel (2) und Gehäuse (3) eingespannte Membran (1), die mit dem Raum im Kopfdeckel den Schöpfraum (5) bildet. Membranpumpen benötigen Einlass- und Auslassventile (6), um eine gerichtete Gasförderung zu erreichen. Als Ventile werden druckgesteuerte Flatterventile aus elastomeren Werkstoffen verwendet. Da der Schöpfraum durch die Membran zum Antrieb hin hermetisch abgedichtet wird, wird das Pumpmedium weder durch Öl verunreinigt, noch können aggressive Medien die Mechanik angreifen. Der schädliche Raum zwischen dem Auslassventil und dem Schöpfraum führt zu einem begrenzten Kompressionsverhältnis, sodass mit einer Pumpstufe nur ein Enddruck von ca. 70 mbar erreicht werden kann. Durch Hintereinanderschalten mehrerer Pumpstufen kann der Enddruck auf 0,5 mbar reduziert werden. Kleinere Drücke können nicht erreicht werden, da dann die Kraft zum Öffnen des Einlassventils nicht mehr ausreicht. Das Prinzip der Membranpumpe eignet sich besonders gut für kleine Saugvermögen bis ca. 10 m³/h.



2.3.2 Anwendungshinweise

Aufgrund ihres kohlenwasserstofffreien Schöpfraums sind die Membranpumpen besonders gut als trockene Vorpumpen für Turbomolekularpumpen mit Holweckstufe geeignet. Schon zweistufige Membranpumpen, die etwa 5 mbar Enddruck erreichen, kann man als Vorpumpen für Holweckturbopumpen verwenden. Das saubere Vakuum wird besonders bei Analytik Anwendungen geschätzt. Auch Membranpumpen fördern ohne Gasballast keinen Wasserdampf. Selbst die geringen Mengen von Wasserdampf, die von den Wänden einer Hochvakuumapparatur desorbieren, können den Enddruck einer Membranpumpe drastisch ansteigen lassen. Einige Membranpumpen sind jedoch nach einem patentierten Verfahren mit einem Gasballastventil ausgerüstet.

Dazu lässt man bei zweistufigen Membranpumpen Gas in den Verbindungskanal zwischen erster und zweiter Stufe ein und verbindet diesen über eine kleine Bohrung mit dem Schöpfraum der ersten Stufe.

Fallen größere Mengen an Feuchtigkeit an und benutzt man Membranpumpen ohne Gasbelastung, so müssen geeignete Abscheider bzw. Kühlfallen vorgeschaltet werden, um eine stärkere Kondensatbildung in der Pumpe zu verhindern. Trotzdem wird der Enddruck sich erhöhen.

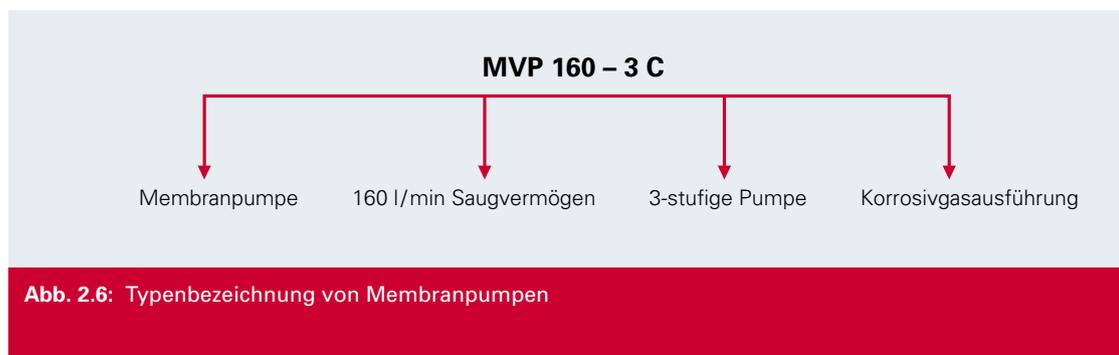
2.3.3 Portfolioüberblick

Membranpumpen von Pfeiffer Vacuum gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Sie unterscheiden sich in Enddruck und Saugvermögen. Das Saugvermögen der Pumpen liegt zwischen 6 und 160 l/min (0,36 – 9,6 m³/h). Es werden Enddrücke von < 4 mbar bei zweistufigen Pumpen und < 0,5 mbar bei vierstufigen Pumpen erreicht. Zum Pumpen korrosiver Gase stehen Pumpen in Korrosivgasausführung mit beschichteten Membranen und korrosionsfesten Gehäusen zur Verfügung.

Tabelle 2.8: Kenndaten von Membranpumpen

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
MVP 006-4	0,28 m ³ /h	≤ 2,0 mbar	Kleine Turbopumpstände (ideal mit HiPace 10 und HiPace 80), mobile Analysengeräte
MVP 015-2	0,9 m ³ /h	≤ 3,5 mbar	Turbopumpstände, Lecksucher, Forschungslabors, Analytik, Chemie
MVP 015-4	0,9 m ³ /h	≤ 0,5 mbar	
MVP 040-2	2,3 m ³ /h	≤ 4,0 mbar	
MVP 070-3	3,8 m ³ /h	≤ 1,0 mbar	
MVP 070-3 C	3,4 m ³ /h	≤ 1,5 mbar	Korrosivgasanwendungen, bei denen ein kohlenwasserstofffreies Vakuum benötigt wird
MVP 160-3	9,6 m ³ /h	≤ 2,0 mbar	Turbopumpstände, Lecksucher, Forschungslabors, Analytik, Chemie
MVP 160-3 C	8,3 m ³ /h	≤ 2,0 mbar	Korrosivgasanwendungen, bei denen ein kohlenwasserstofffreies Vakuum benötigt wird

Die Bezeichnungen der Pumpen sind so gewählt, dass sich die Anzahl der Pumpstufen und das Saugvermögen daraus ablesen lassen. Korrosivgaspumpen tragen am Ende der Typenbezeichnung den Buchstaben C.



2.4 Hubkolbenpumpen

2.4.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Das Prinzip der Hubkolbenpumpe ist eines der ältesten der Vakuumerzeugung. Es stellt die klassische Verdrängerpumpe dar. Bereits Otto von Guericke, der Begründer der Vakuumtechnik, verwendete um 1650 für seine Versuche eine Pumpe dieser Bauart.

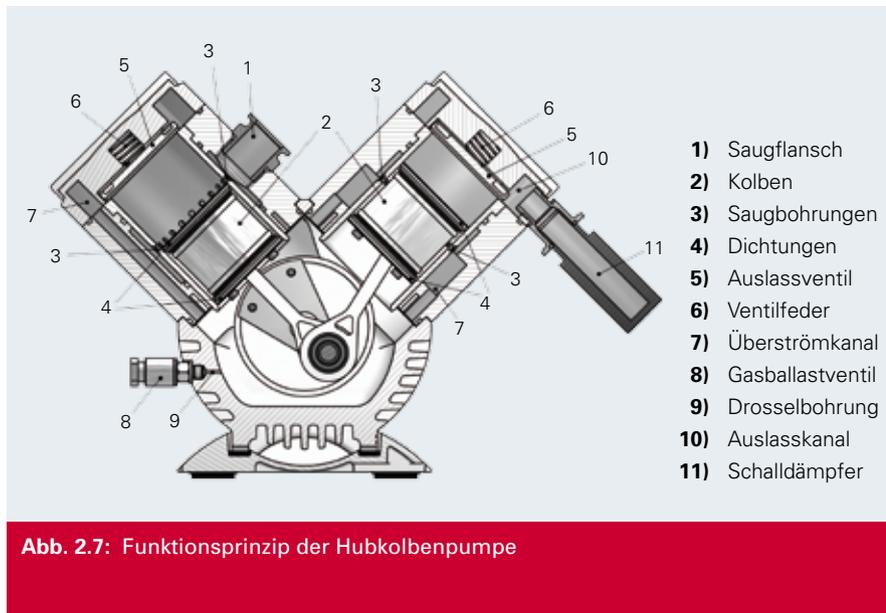


Abb. 2.7: Funktionsprinzip der Hubkolbenpumpe

Klassische Hubkolbenpumpen sind wie Membranpumpen mit einem Ansaug- und einem Auslassventil ausgestattet. Durch die Anordnung dieser Ventile entsteht oberhalb des Kolbens im Zylinderkopf ein Totvolumen, das das maximale Kompressionsverhältnis begrenzt. Außerdem ist der Enddruck durch die Kraft begrenzt, die zum Öffnen des Einlassventils aufgebracht werden muss. Diese beiden Nachteile werden durch die besondere Konstruktion der nachfolgend beschriebenen Kolbenpumpe vermieden.

Neue Materialpaarungen machen zwischen Kolbendichtungen (4) und Zylinderwand einen öl-freien Betrieb möglich. Da der gesamte Querschnitt des Zylinders als Auslassventilplatte (5) ausgebildet ist, tendiert der schädliche Raum (Totvolumen) zwischen Kolben (2) und Zylinderkopf gegen null.

Ein von einer Kurbelwelle angetriebener Pleuel bewegt einen Kolben (2) in einem Zylinder auf und ab. Der Saugflansch (1) wird über die Saugbohrungen (3) in der untersten Stellung des Kolbens (2) mit dem Hubraum verbunden. Bei Bewegung des Kolbens nach oben werden die Saugbohrungen (3) wieder verschlossen und das angesaugte Gas wird komprimiert. Nach Erreichen des Öffnungsdruckes hebt sich die Ventilplatte (5) und das Gas strömt über den Überströmkanal (7) und das Kurbelgehäuse zu den Saugbohrungen (3) der zweiten Stufe. Die zweite Dichtung (4) verhindert, dass der Saugkanal beim Verdichtungshub mit dem Kurbelgehäuse verbunden wird. Die zweite Stufe arbeitet analog zu der ersten und stößt das Gas über den Auslasskanal (10) und den Schalldämpfer (11) in die Atmosphäre aus.

Über das Gasballastventil (8) und die dahinterliegende Drosselbohrung (9) kann Gasballastluft in das Kurbelgehäuse eingelassen werden, um Wasserdampf ohne Kondensation durch die Pumpe zu fördern (siehe auch 2.1.6, Gasballast).

Bei trockenen Hubkolbenpumpen entsteht während des Betriebes Verschleiß an den Kolbendichtungen, und zwar besonders bei hohen mittleren Kolbengeschwindigkeiten. Ist der geforderte Ansaugdruck erreicht, kann man den Verschleiß der Dichtungen durch Reduzierung der Drehzahl erheblich mindern.

2.4.2 Anwendungen

Trockene Hubkolbenpumpen haben höhere Saugvermögen als Membranpumpen und werden dort eingesetzt, wo ein sauberes und kohlenwasserstofffreies Vakuum im enddrucknahen Betrieb benötigt wird. Durch den Wegfall des Einlassventils können niedrigere Basisdrücke erreicht werden als bei Membranpumpen. Kolbenpumpen haben, wie alle echten Verdrängerpumpen, für alle Gase das gleiche Saugvermögen.

Kolbenpumpen eignen sich als trockene Vorpumpen für Turbomolekularpumpen. Um eine Anreicherung von Wasserstoff und Wasserdampf im Vorvakuumbereich der Turbopumpe zu verhindern, muss diese im Bedarfsfall jedoch mit Gasballast betrieben werden. Besonders geeignet sind Kolbenpumpen für die Analysetechnik und für Lecksucher (siehe auch: 5.2.1 Aufbau eines Helium Lecksuchers). Werden die Prüflinge bei der Lecksuche direkt mit der Vorpumpe evakuiert, können sie bei Einsatz einer trockenen Vorpumpe nicht mit Öldampf kontaminiert werden.

Kolbenpumpen eignen sich nicht zum Pumpen korrosiver oder abrasiver Medien.

2.4.3 Portfolioüberblick

Pfeiffer Vacuum bietet zwei Hubkolbenpumpen an, nämlich die einstufige XtraDry 250-1 und die zweistufige XtraDry 150-2. Diese unterscheiden sich in Saugvermögen und Enddruck. Besonders die zweistufige XtraDry zeichnet sich aus durch:

- ▶ Niedrigen Basisdruck: $p_b = 0,1$ mbar
- ▶ Gasballasteinrichtung
- ▶ Automatische Drehzahlreduzierung in der Nähe des Basisdruckes

Tabelle 2.9: Kenndaten der Kolbenpumpen XtraDry™

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
XtraDry™ 150-2	7,5 m ³ /h	0,1 mbar	Ideal geeignet für trockenes Vorvakuum ohne
XtraDry™ 250-1	13,0 m ³ /h	7,0 mbar	Kondensat- und Staubanfall

2.5 Schraubenpumpen

2.5.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Zwei parallel gelagerte, ineinandergreifende Schraubenrotoren (3) mit gegenläufigen Gewinden drehen sich gegensinnig synchron, ohne sich zu berühren, in einem zylinderförmigen, sie eng umschließenden Gehäuse (2) und bilden zusammen eine mehrstufige Pumpe.

Durch den gegenseitigen Eingriff der beiden Rotoren werden in jedem Gewindegang abgeschlossene Volumina entlang den Rotoren zum Auslass (4) hin transportiert. Die Pumpe hat weder am Einlass (1) noch am Auslass Ventile. Wenn ein Fördervolumen die Auslassöffnung erreicht, findet ein Druckausgleich mit der Atmosphäre statt. D. h., atmosphärische Luft strömt in das Fördervolumen ein und wird dann während einer Rotorumdrehung wieder ausgestoßen. Dieser pulsierende Gasstrom erzeugt eine hohe Verlustleistung und heizt die Pumpe auf. Diese Verlustleistung lässt sich jedoch anhand innerer Verdichtung minimieren. Eine innere Verdichtung wird durch Reduzierung der Gewindesteigung in Richtung des Auslasses erreicht. Die Spaltweiten zwischen dem Gehäuse und den Rotoren sowie zwischen den Rotoren untereinander bestimmen den erzielbaren Enddruck einer Schraubenpumpe. Großen Einfluss auf den Enddruck haben auch die Geometrie und die dadurch vorgegebene Spaltform beim Profileingriff zwischen den Rotoren.

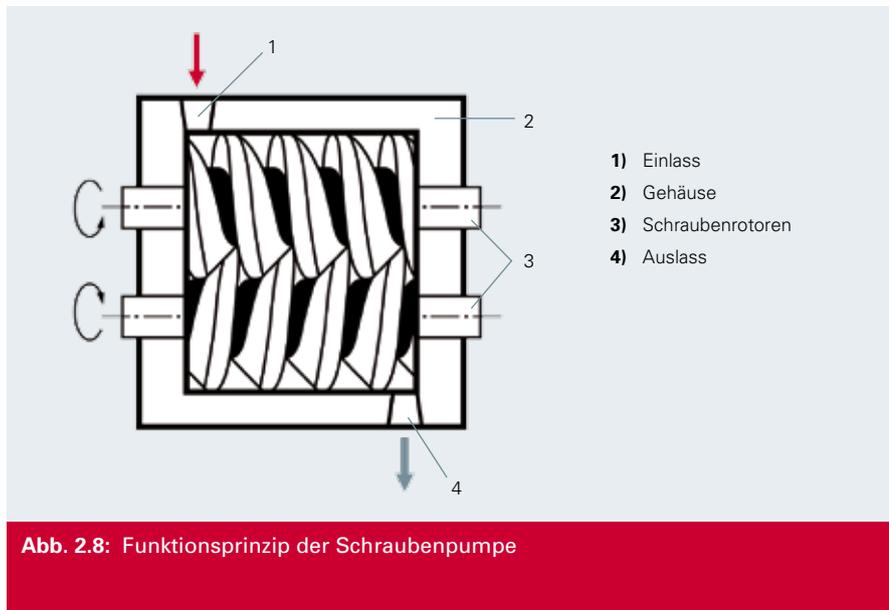


Abb. 2.8: Funktionsprinzip der Schraubenpumpe

Da die Verlustleistung, die durch den pulsierenden Gasstrom erzeugt wird, die Pumpe auf der Auslassseite aufheizt, ist genau dort eine Kühlung erforderlich. Die Spaltweite zwischen Gehäuse und Rotoren hängt von der Temperaturdifferenz zwischen den wärmeren Rotoren und dem gekühlten Gehäuse ab. Wärmeentwicklung und Temperatur sind vom Ansaugdruckbereich abhängig. Bei hohen Ansaugdrücken (fast atmosphärisch) sind die Temperaturen am niedrigsten, da hier kaum Verdichtungsarbeit geleistet wird und die geförderte Luft genügend Wärme aus der Pumpe transportiert. Der hohe Gasstrom verhindert darüber hinaus eine Oszillation des Gases in der letzten Stufe. Bei Betrieb im Enddruck ($p < 1$ mbar) kommt es durch die Oszillation der atmosphärischen Luft zu höheren Temperaturen im Auslassbereich, da kein Gas durch die Pumpe strömt und damit auch keine Wärme transportiert wird.

Die HeptaDry ist eine trockene Schraubenpumpe mit innerer Verdichtung. Die Schraubenrotoren weisen eine asymmetrische Geometrie mit variabler Steigung auf. Die Pumpe hat keine Endplatte mit Steueröffnungen, sondern stößt das Gas axial gegen den Atmosphärendruck aus. Durch die innere Verdichtung ist die pulsierende Gasmenge gering.

Dies führt zu geringer Leistungsaufnahme, ruhigem Lauf, gleichmäßiger Temperaturverteilung in der Pumpe und geringem Kühlwasserverbrauch. Damit ist diese Pumpe trotz robuster Bauart sehr wirtschaftlich.



Abb. 2.9: Rotoren der HeptaDry™

2.5.2 Anwendungshinweise

In den letzten Jahren verdrängen Schraubenpumpen im Bereich großer Saugvermögen (100 – 600 m³/h) vor allem Drehschieberpumpen, die mit Öl geschmiert sind.

Ihre Vorteile sind:

- ▶ Kein Schmiermittel im Bereich der Gasförderung
- ▶ Keine Verunreinigungen des Fördermediums
- ▶ Hoher Wirkungsgrad durch innere Verdichtung
- ▶ Niedriger Enddruck $p_b < 10^{-1}$ mbar
- ▶ Nahezu konstantes Saugvermögen zwischen 1 und 1.000 mbar
- ▶ Gute Flüssigkeits- und Partikelverträglichkeit
- ▶ Schonung der Lager und Abdichtungen durch geringe Gaspulsation wegen innerer Kompression
- ▶ Hochwertige Gleitringdichtungen
- ▶ Niedriger Geräuschpegel durch serienmäßigen Schalldämpfer und Auslassventil
- ▶ Geringer Energieverbrauch
- ▶ Temperaturregelte Kühlung
- ▶ Weitgehende Verwendung von Standardbauteilen
- ▶ Anschlussfertig montiert auf Rahmen mit Vibrationsdämpfern
- ▶ Ideale Vorpumpe für Wälzkolbenpumpen

HeptaDry Schraubenpumpen sind deshalb gut für Chemieanwendungen oder Prozesse mit Staubanfall geeignet, so z. B. in der Halbleiterherstellung oder bei starkem Kondensatanfall.

Bei der temperaturgeregelten Kühlung hängt die durchfließende Wassermenge von folgenden Parametern ab: Ansaugdruck, Gasart, Drehzahl und Baugröße der Pumpe. Durch die Wasserdurchlaufkühlung wird praktisch keine Wärme an die Umgebung abgegeben. Somit werden eventuell vorhandene Klimaanlage entlastet und deren Energieverbrauch gesenkt.

Hier die Haupteinsatzgebiete im Überblick:

- ▶ Trocknung, Gefriertrocknung
- ▶ Beschichtung
- ▶ Elektronenstrahlschweißen
- ▶ Metallurgie
- ▶ Schleusen
- ▶ Chemie

2.5.3 Portfolioüberblick

Die HeptaDry ist eine trockene Schraubenpumpe für Anwendungen im Grob- und Feinvakuumbereich, wo hohe Saugvermögen erforderlich sind. Die Saugvermögen der Produktreihe reichen von 100 bis 600 m³/h. Es werden Enddrücke unter 0,1 mbar erreicht.

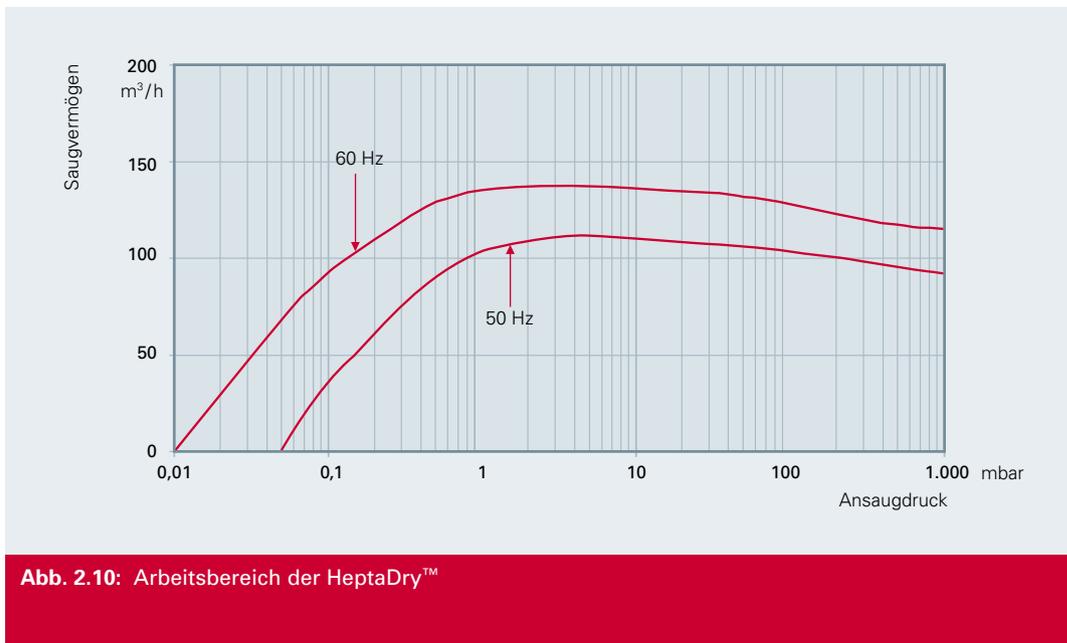


Abb. 2.10: Arbeitsbereich der HeptaDry™

Unabhängig vom Modell kann die HeptaDry in dem in Abbildung 2.10 dargestellten Arbeitsbereich dauernd betrieben werden. Im Druckbereich $p < 1$ mbar sinkt das effektive Saugvermögen. Grund dafür ist die immer stärker werdende Rückströmung zwischen den einzelnen abgesperrten Volumina innerhalb der Pumpe (siehe auch Formel 2-5). Die Abnahme des Saugvermögens hin zu hohem Druck hat eine ähnliche Ursache: Hier wird das Gas durch innere Verdichtung auf Drücke $>$ Atmosphärendruck komprimiert, sodass die Rückströmung wegen des hohen Differenzdruckes stark zunimmt. Zur Standardausrüstung der Pumpe zählen: Ansaugsieb, Wasserdurchlaufkühlung mit Thermostatventil und Thermometer, Schalldämpfer mit Rückschlagventil und Aufbau mit Vibrationsdämpfern auf einem Rahmen.

Als Antrieb dient ein 3-Phasen-Asynchronmotor mit Temperaturüberwachung für 50 und 60 Hz (3.000, bzw. 3.600 U/min). Kupplung, Lager und Flansche sind Standardbauteile.

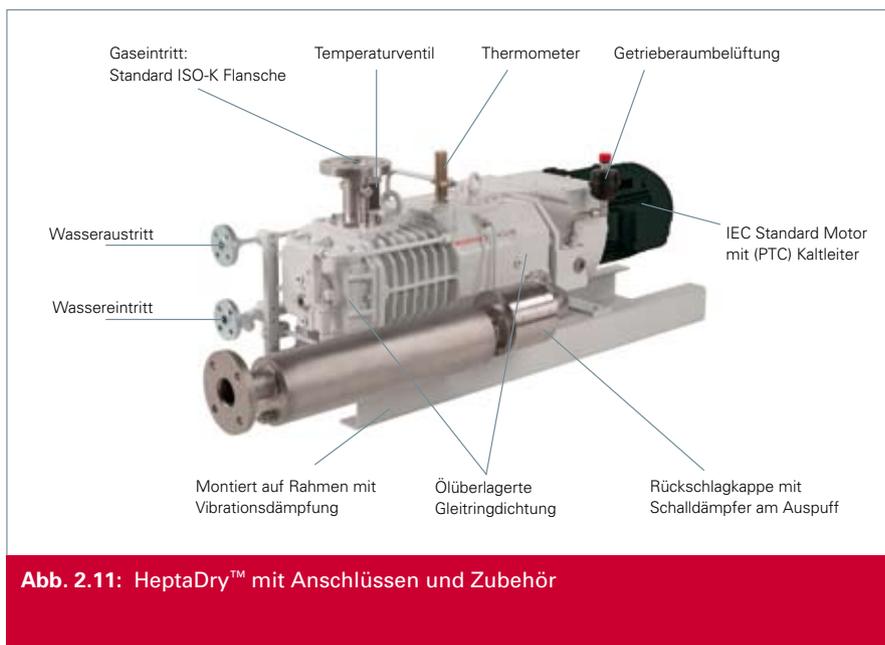


Abb. 2.11: HeptaDry™ mit Anschlüssen und Zubehör

Tabelle 2.10: Anschlüsse der HeptaDry™ Baureihe

Typenbezeichnung	Ansaugstutzen DN	Auspuffstutzen DN	Wasser DN
Hepta 100	63 ISO-K	40 PN 16	15 PN 10
Hepta 200	63 ISO-K	50 PN 16	15 PN 10
Hepta 300	63 ISO-K	50 PN 16	15 PN 10
Hepta 400	100 ISO-K	80 PN 16	15 PN 10
Hepta 600	100 ISO-K	80 PN 16	15 PN 10

Tabelle 2.11: Kenndaten HeptaDry™

Typenbezeichnung	Saugvermögen / (m ³ /h)	Enddruck / mbar	Motorleistung / kW
Hepta 100, 50 Hz	110	< 0,05	3,0
Hepta 100, 60 Hz	130	< 0,01	4,0
Hepta 200, 50 Hz	220	< 0,05	5,5
Hepta 200, 60 Hz	265	< 0,01	7,5
Hepta 300, 50 Hz	320	< 0,05	7,5
Hepta 300, 60 Hz	410	< 0,01	9,2
Hepta 400, 50 Hz	350	< 0,05	7,5
Hepta 400, 60 Hz	420	< 0,01	9,2
Hepta 600, 50 Hz	525	< 0,05	11,0
Hepta 600, 60 Hz	630	< 0,01	15,0

Die HeptaDry Reihe wird durch die UniDry 50 nach unten abgerundet. Die UniDry 50 ist als S- oder P-Version mit verschiedenem Zubehör lieferbar. Sie ist ebenfalls eine trockene Pumpe mit einem Saugvermögen von 50 m³/h.

Für die Pumpen mit Standard-Lieferumfang ist Folgendes zu beachten:

- ▶ Nicht zur Förderung von giftigen, entflammaren und/oder explosiven Gasen geeignet
- ▶ Nicht für korrosive Gase geeignet
- ▶ Keine Fremdkörper
- ▶ Keine Medien, die Beläge bilden
- ▶ Flüssigkeitsmitförderung („Schwallflüssigkeit“) begrenzt
- ▶ Zulässige Ansaugtemperatur abhängig vom Ansaugdruck zwischen 70 und 200 °C
- ▶ Kühlmediumgrenzen beachten: Temperatur 10 – 25 °C, Druck 3 – 6 bar
- ▶ Nicht gasdicht

2.6 Wälzkolbenpumpen

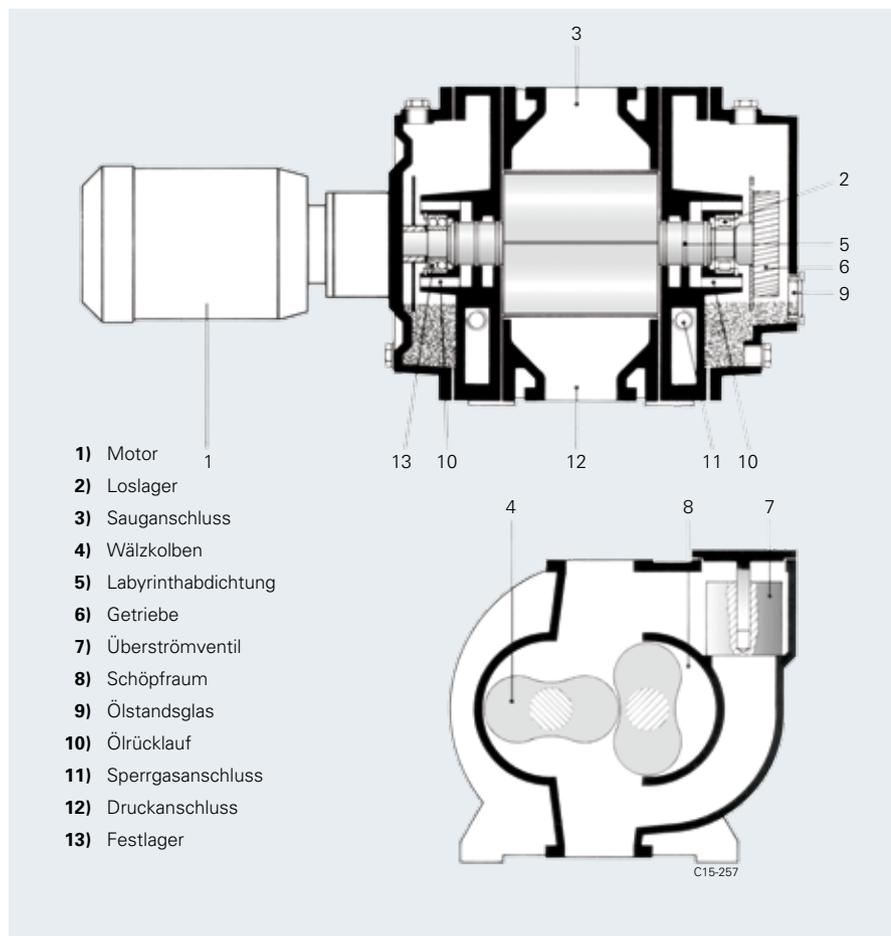


Abb. 2.12: Funktionsprinzip einer Wälzkolbenpumpe

2.6.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Die Wälzkolbenpumpe gehört zur Gruppe der technisch trocken laufenden Rotationsverdränger-Vakuumpumpen. Sie wird auch als Rootspumpe oder Rootsgebläse bezeichnet.

Funktionsprinzip

In der Wälzkolbenpumpe drehen sich zwei gegenläufig synchron laufende Rotoren (4) berührungslos in einem Gehäuse (Abbildung 2.12). Die Rotoren haben die Form einer „Acht“ und sind voneinander durch einen engen Spalt getrennt. Die Wirkungsweise entspricht einer Zahnradpumpe mit je einem Zahnrad mit zwei Zähnen, die Gas von der Ansaugöffnung (3) zur Auslassöffnung (12) pumpt. Eine Welle wird durch einen Motor (1) angetrieben. Die Synchronisation der anderen Welle erfolgt über ein Zahnradpaar (6) im Getrieberaum. Die Schmierung beschränkt sich auf die beiden vom Schöpfraum (8) durch Labyrinthdichtungen (5) mit Kolbenringen abgetrennten Lager- und Getrieberäume.

Da im Schöpfraum keine Reibung auftritt, kann die Wälzkolbenpumpe mit hoher Drehzahl betrieben werden (1.500 – 3.000 U/min). Das Fehlen hin- und hergehender Massen erlaubt zudem eine einwandfreie dynamische Auswuchtung, sodass die Wälzkolbenpumpe trotz hoher Drehzahlen sehr ruhig läuft.

Aufbau

Die Lager der Rotorwellen sind in den beiden Seitenteilen angeordnet. Auf der einen Seite sind sie als Festlager (13), auf der anderen mit verschiebbarem Innenring (2) ausgeführt, um die ungleichen Wärmedehnungen zwischen Gehäuse und Kolben zu ermöglichen. Die Schmierung der Lager erfolgt mit Öl, das durch Spritzscheiben zu den Lagern und Zahnradern gefördert wird. Die Durchführung der Antriebswelle nach außen wird bei den Standardausführungen mit durch Sperröl überlagerten Radialwellendichtringen aus FPM (Fluor-Polymer-Kautschuk) abgedichtet.

Zur Schonung der Welle laufen die Dichtringe auf einer Schonbuchse, die bei Verschleiß ausgewechselt werden kann. Wenn eine hermetische Abdichtung nach außen erforderlich ist, kann die Pumpe auch über eine Permanentmagnetkupplung mit Spaltrrohr angetrieben werden. Man erreicht hiermit Leckraten $Q_l < 10^{-5}$ mbar · l/s.

Pumpeigenschaften, Erwärmung

Wälzkolbenpumpen haben keine innere Verdichtung und kein Auslassventil. Deshalb schlägt beim Öffnen des Schöpfraumes dessen Gasvolumen zum Auslass hin in den Schöpfraum zurück und muss dann gegen den Auslassdruck wieder ausgestoßen werden. Durch diesen Effekt wird, besonders bei hoher Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass, eine hohe Verlustleistung erzeugt. Diese führt bei geringem Gasstrom, der per se auch nur geringe Wärmemengen transportiert, zu einer starken Erwärmung der Pumpe.

Die rotierenden Wälzkolben können, verglichen mit dem Gehäuse, nur relativ schlecht gekühlt werden, da es außer der Stirnseite keine Berührungsflächen gibt. Daher dehnen sie sich stärker aus als das Gehäuse. Um ein Berühren oder gar ein Festlaufen zu vermeiden, wird die maximal mögliche Druckdifferenz und damit die Verlustleistung durch ein Überströmventil (7) begrenzt. Es ist durch Kanäle mit der Saugseite und der Druckseite der Pumpe verbunden. Ein gewichtsbelasteter Ventilteller hebt sich beim Überschreiten der maximalen Druckdifferenz und lässt, je nach Gasanfall, einen mehr oder weniger großen Teil des angesaugten Gases von der Druck- zur Saugseite zurückströmen. Wegen der begrenzten Druckdifferenz können einfache Wälzkolbenpumpen nicht gegen Atmosphäre ausstoßen und benötigen eine Vorpumpe.

Jedoch können Wälzkolbenpumpen mit Überströmventil schon bei Atmosphärendruck zusammen mit der Vorpumpe eingeschaltet werden und erhöhen von Anfang an deren Saugvermögen. Dadurch werden die Evakuierungszeiten verkürzt.

Vorpumpen

Als Vorpumpen werden Drehschieber-, Sperrschieber- oder Schraubepumpen verwendet. Solche Pumpkombinationen sind für alle Anwendungen mit hohem Saugvermögen im Grob- und Feinvakuumbereich einsetzbar. Auch Flüssigkeitsringpumpen kann man als Vorpumpen verwenden.

Gasgekühlte Wälzkolbenpumpen

Um Wälzkolbenpumpen gegen Atmosphärendruck arbeiten zu lassen, gibt es Modelle ohne Überströmventil mit Gaskühlung (Abbildung 2.13). Hierbei wird Gas, das aus dem Auslassflansch (6) durch einen Kühler (7) strömt, in der Mitte des Schöpfraumes (4) wieder eingelassen. Der so künstlich erzeugte Gasstrom kühlt die Pumpe derart, dass sie gegen Atmosphärendruck verdichten kann. Die Steuerung des Kaltgaseintritts erfolgt durch die Wälzkolben, sodass keine zusätzlichen Ventile erforderlich sind. Eine thermische Überlastung ist selbst bei Betrieb auf Enddruck ausgeschlossen.

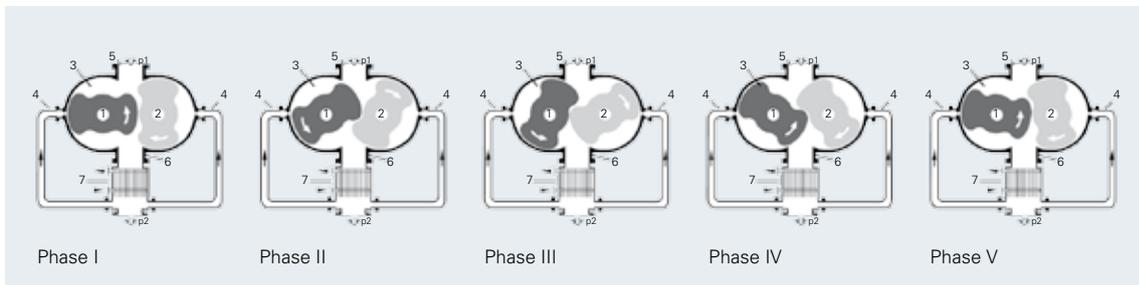


Abb. 2.13: Funktionsprinzip der gasgekühlten Wälzkolbenpumpe

Abbildung 2.13 zeigt eine Wälzkolbenpumpe im Querschnitt. Die Förderrichtung des Gases ist senkrecht von oben nach unten, sodass vom Saugstrom mitgerissene flüssige oder feste Partikel nach unten abfließen können. In Phase I wird durch Drehung der Kolben (1) und (2) der Raum (3) geöffnet. In diesen strömt durch den Saugflansch (5) das Gas mit dem Druck p_1 . In Phase II wird der Raum (3) sowohl gegen den Saug- als auch gegen den Druckflansch abgeschlossen. Durch Drehung der Kolben wird in Phase III die Einlassöffnung (4) für das Kühlgas freigegeben. Der Raum (3) wird auf den Auslassdruck p_2 gefüllt und das Gas in Richtung Druckflansch befördert. Bei der Drehbewegung der Wälzkolben ändert sich das Schöpfvolumen zunächst nicht. Die Kompression des Gases erfolgt durch das einströmende Kühlgas. Nun dreht der Wälzkolben weiter (Phase IV) und schiebt dadurch das jetzt komprimierte Gas mit dem Druck p_2 über den Kühler (7) zur Auslassseite zurück (Phase V).

Gasgekühlte Wälzkolbenpumpen können im Ansaugdruckbereich von 130 bis 1.013 mbar eingesetzt werden. Da sie kein Schmiermittel im Schöpfraum haben, stoßen sie keinen Ölnebel aus und verschmutzen das Fördermedium nicht. Durch Hintereinanderschalten zweier solcher Pumpen kann ein Enddruck von 20 bis 30 mbar erreicht werden.

In Kombination mit weiteren Wälzkolbenpumpen lässt sich der Enddruck bis in den Feinvakuumbereich verringern.

Saugvermögen und Kompressionsverhältnis

Die charakteristischen Kenndaten von Wälzkolbenpumpen sind: Das Saugvermögen $S_{th} = S_o$, das ist der Volumenstrom, den die Pumpe ohne Gegendruck fördert und das (Leerlauf-) Kompressionsverhältnis $K_m = K_o$ ohne Gasförderung, das vom Auslassdruck p_2 abhängt. Die Saugvermögen liegen im Bereich von 200 m³/h bis zu mehreren 1.000 m³/h. Typische K_o -Werte liegen zwischen 10 und 75.

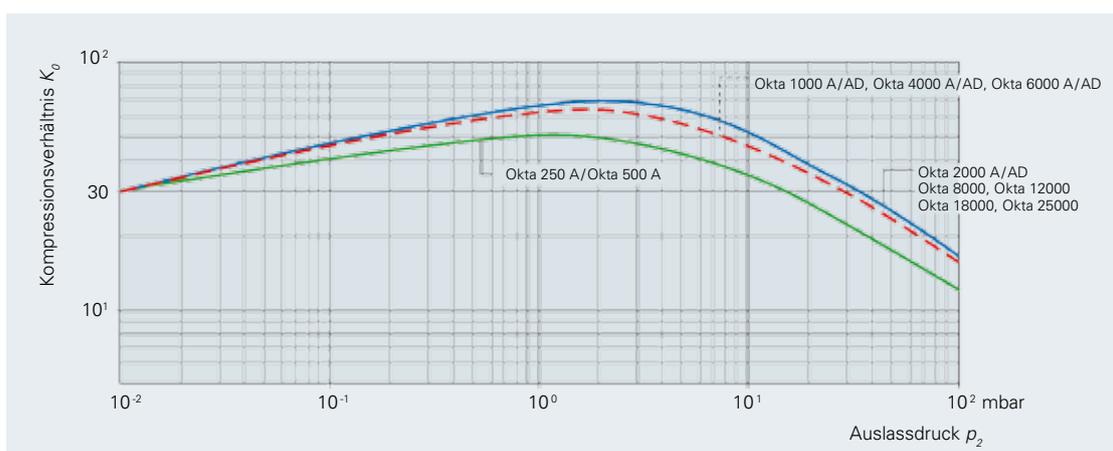


Abb. 2.14: Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen

Das Kompressionsverhältnis wird durch zwei Effekte negativ beeinflusst:

- ▶ Durch die Rückströmung in den Spalten zwischen den Kolben und dem Gehäuse
- ▶ Durch Gas, das sich durch Adsorption an die Kolbenoberflächen der Auslassseite anlagert, und nach der Drehung zur Saugseite hin wieder desorbiert

Bei Auslassdrücken von 10⁻² bis 1 mbar herrscht in den Dichtspalten Molekularströmung. Deren niedrige Leitwerte führen zu geringer Rückströmung. Die durch Adsorption zurück geförderte Gasmenge, die im Verhältnis zum gepumpten Gasstrom relativ hoch ist, reduziert jedoch das Kompressionsverhältnis. Im Bereich 1 bis 10 mbar ist K_o am größten, da wegen des niedrigen Einlassdruckes in den Dichtspalten der Pumpe noch Molekularströmung herrscht und die Rückströmung deshalb gering ist. Da der Gastransport durch Adsorption druckunabhängig ist, fällt er gegenüber dem durch das Saugvermögen transportierten, druckproportionalen Gasstrom weniger ins Gewicht.

Bei Drücken über 10 mbar stellt sich in den Spalten Laminarströmung ein. Deren Leitwerte vergrößern sich stark, was zu abnehmenden Kompressionsverhältnissen führt. Dieser Effekt macht sich besonders bei gasgekühlten Wälzkolbenpumpen bemerkbar, die nur etwa ein Kompressionsverhältnis von $K_o = 10$ erreichen. Natürlich haben die Spaltweiten einen großen Einfluss auf das Kompressionsverhältnis. Sie dürfen aber, um ein Anlaufen der Kolben zu vermeiden, wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung von Kolben und Gehäuse bestimmte Mindestwerte nicht unterschreiten.

2.6.2 Berechnungen

Leistungsbedarf einer Wälzkolbenpumpe

Die Wälzkolbenpumpe ist eine reine Verdrängerpumpe ohne innere Vorverdichtung. Daher ist ihre Leistungsaufnahme P sowohl der Druckdifferenz Δp zwischen Saug- und Druckstutzen als auch dem Saugvermögen S_0 proportional.

Formel 2-8

Leistung
Wälzkolbenpumpe

$$P = \frac{S_0 \cdot \Delta p}{\eta_{\text{mech}}}$$

S_0 = Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe ohne Gegendruck in m^3/s

Δp = Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckstutzen in Pa

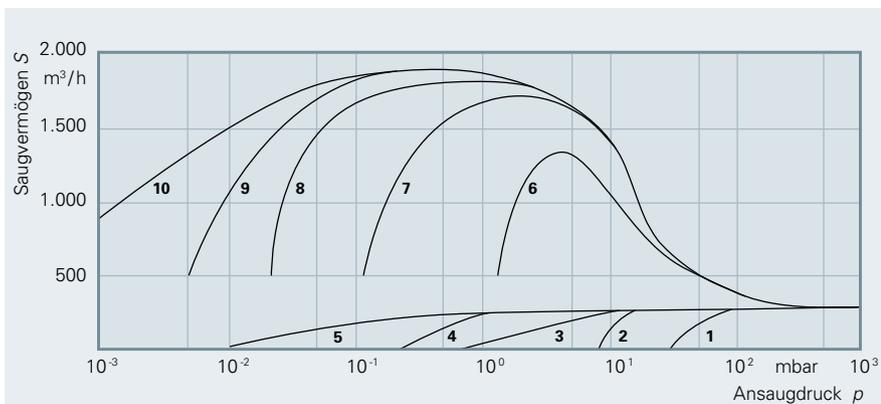
η_{mech} = Mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe (ca. 0,85 für Wälzkolbenpumpen)

P = Leistungsbedarf bzw. Motorleistung in W

Die mechanischen Verluste sind gering. Es empfiehlt sich jedoch, im Schaltschrank Schütze für Schweranlauf zu verwenden. Nach dem Hochlauf ist der Leistungsbedarf im Feinvakuumbereich gering.

Alle weiteren Berechnungen über Saugvermögen von Pumpständen und Auspumpzeiten finden Sie in Kapitel 7: Auslegung.

2.6.3 Anwendungshinweise



- 1) Flüssigkeitsringpumpe ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 2) Flüssigkeitsringpumpe mit Gasstrahler ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 3) Einstufige Drehschieberpumpe mit Gasballast ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 4) Flüssigkeitsringpumpe mit Gasstrahler ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$) und vorgeschalteter Wälzkolbenpumpe Okta 250 ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 5) Einstufige Drehschieberpumpe ohne Gasballast ($S = 250 \text{ m}^3/\text{h}$)
- 6) – 10) Wälzkolbenpumpe Okta 2000 mit den Vorpumpen analog 1) – 5)

Abb. 2.15: Saugvermögen von Pumpständen mit Okta 2000 und verschiedenen Vorpumpen

Wegen der geringen Kompressionsverhältnisse müssen Wälzkolbenpumpen zur Vakuumerzeugung immer als Pumpkombinationen betrieben werden. Die erreichbaren Enddrücke hängen von den Enddrücken der gewählten Vorpumpen ab. Wegen des Gastransportes durch Adsorption ist der Einsatz von Wälzkolbenpumpen im Bereich unter 10^{-4} mbar nicht mehr sinnvoll. Wie sich Saugvermögen und Enddruck von Pumpständen mit verschiedenen Vorpumpen verhalten, verdeutlicht Abbildung 2.15.

Die Kennlinien zeigen, dass das Saugvermögen der Vorpumpe um den Faktor 8 vergrößert, und der Enddruck einer solchen Pumpenkombination um den Faktor 15 gegenüber der Vorpumpe verringert wird.

2.6.3.1 Wahl der Vorpumpe

Drehschieberpumpen

Sofern vom Verfahren her kein störender Einfluss auf die Funktion zu befürchten ist, bietet sich die Drehschieberpumpe als wirtschaftlichste Vorpumpe für einen Wälzkolbenpumpstand an. Drehschieberpumpen haben einen Enddruck im Bereich $p < 1$ mbar bei konstantem Saugvermögen über einen breiten Druckbereich.

Ein Wälzkolbenpumpstand erreicht mit einer einstufigen Vorpumpe bei geöffnetem Gasballastventil Enddrücke von etwa 10^{-2} mbar. Wasserdampf sowie viele Lösungsmitteldämpfe und andere Dämpfe, die einen ausreichend hohen Dampfdruck haben und das Pumpenöl chemisch nicht zersetzen (Alkohole, halogenierte Kohlenwasserstoffe, leichte Normalparaffine etc.), können mit solchen Pumpständen abgesaugt werden.

Flüssigkeitsringpumpen

Beim Absaugen von Dämpfen, die das Vorpumpenöl chemisch angreifen und zersetzen oder einen so niedrigen Dampfdruck haben, dass trotz Gasballast eine Kondensation in der Vorpumpe nicht vermieden werden kann, stellt die Flüssigkeitsringpumpe eine geeignete Lösung dar. Sie erreicht jedoch nur einen Enddruck, der durch den Dampfdruck der Betriebsflüssigkeit bestimmt ist. Wird Wasser von 15 °C verwendet, kann man an der Flüssigkeitsringpumpe einen Enddruck von etwa 20 mbar erwarten, wobei sie dann schon im Kavitationsbereich arbeitet.

Eine Flüssigkeitsringpumpe, die durch Luftzugabe kavitationsfrei arbeitet, erreicht etwa 25 bis 30 mbar Enddruck und eine Kombination aus Wälzkolben- und Flüssigkeitsringpumpe etwa 1 mbar. Beim Absaugen umweltschädigender Stoffe darf die Flüssigkeitsringpumpe nicht mit Frischwasser betrieben werden. Es muss dann ein geschlossener Kreislauf eingerichtet werden, bei dem eine geeignete Betriebsflüssigkeit zum Entzug der Verdichtungswärme über einen gekühlten Wärmetauscher geleitet wird.

Flüssigkeitsringpumpe mit Gasstrahler

Die Kombination von Wälzkolbenpumpe, Gasstrahler und Flüssigkeitsringpumpe erreicht einen Enddruck von 0,2 mbar. Sollen kleinere Drücke erreicht werden, muss eine weitere Wälzkolbenpumpe vorgeschaltet werden.

Gasgekühlte Wälzkolbenpumpen

Da Wälzkolbenpumpen technisch trocken arbeiten, bietet sich ihr Einsatz vor allem dann an, wenn Pumpen mit flüssigkeitsgedichtetem Schöpfraum ausscheiden.

Einsatzgebiete:

- ▶ Absaugen und Verdichten von Helium an Kryostaten
- ▶ Absaugen und Verdichten von SF₆
- ▶ Saubere Rückgewinnung von Gasen und Dämpfen verschiedenster Art bei verfahrenstechnischen Prozessen, z. B. Destillation
- ▶ Auspumpen von Molekularsieben u. a.
- ▶ Abpumpen und Fördern von giftigen Stoffen in geschlossenen Systemen
- ▶ Auspumpen von Behältern mit sehr großem Volumen

Wälzkolbenpumpstände mit gasgekühlten Wälzkolbenpumpen lassen sich mit sehr unterschiedlicher Saugcharakteristik ausbilden. Im Extremfall kann man über den gesamten Druckbereich von 1 bar bis 10⁻³ mbar ein nahezu konstantes Saugvermögen erreichen, wobei die einzelnen Pumpenstufen im Verhältnis 2:1 bis 3:1 abgestuft sein können.

Dazu müssen die Wälzkolbenpumpen allerdings mit entsprechend starken Motoren ausgerüstet werden, und anstelle der Überströmventile müssen Auslassventile zur Atmosphäre hin vorgesehen werden.

Schraubepumpen

Mit den Schraubepumpen HeptaDry steht eine komplette Baureihe, von technisch trockenen Pumpen mit einem Saugvermögen von 100 bis 600 m³/h zur Verfügung. Als Einzelpumpe (siehe auch Abbildung 2.10) deckt sie einen großen Druckbereich im Grob- und Feinvakuum ab. Aufgrund ihrer inneren Verdichtung kann sie mit relativ niedriger Antriebsleistung dauerhaft im gesamten Ansaugdruckbereich von 0,1 bis 1.000 mbar arbeiten. In Kombination mit den OktaLine-Wälzkolbenpumpen lassen sich sogar Enddrücke von 5 · 10⁻³ mbar erreichen.

2.6.4 Portfolioüberblick

Wälzkolbenpumpen werden in vier Varianten angeboten:

- ▶ Standardpumpen mit Wellendichtringen und Graugussgehäuse (A-Reihe)
- ▶ Hermetisch dichte Standardpumpen mit Magnetkupplung und Graugussgehäuse (AM-Reihe)
- ▶ Wälzkolbenpumpen für explosionsgefährdete Umgebungen (ADx-Reihe)
- ▶ Wälzkolbenpumpen für explosionsgefährdete Umgebungen und zum Fördern explosiver Gase (ADEX-Reihe)

Tabelle 2.12: Kenndaten OktaLine™

Typenbezeichnung	Saugvermögen S ₀	Maximaler Differenzdruck	Maximales Kompressionsverhältnis K ₀	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
Okta 250	270 m ³ /h	75	50	Geeignet für Industrie/Chemie: z. B. Ölaufbereitung, Trafotrocknung, Stahlgasung, Gefriertrocknung, Lecksuchanlagen, Metallurgie, Verpackungsindustrie, Elektronenstrahl-schweißen
Okta 500	490 m ³ /h	75 (ADEX: 53)	50	
Okta 1000	1.070 m ³ /h	45 (ADEX: 30)	63	
Okta 2000	2.065 m ³ /h	35 (ADEX: 20)	70	Geeignet für Großflächenbeschichtung: z. B. Photovoltaik, Verschleißschutz, Glasbeschichtung
Okta 4000	4.050 m ³ /h	25 (ADEX: 20)	63	
Okta 6000	6.075 m ³ /h	20	63	Geeignet für Forschung & Entwicklung: z. B. Beschleuniger, Simulationskammern
Okta 8000	8.000 m ³ /h	27	70	
Okta 18000	17.850 m ³ /h	10	70	

2.6.4.1 Standardpumpen

Die Kennwerte der Standardpumpen (A-Reihe) sind in der Tabelle Tabelle 2.12 angegeben. Sie gelten im Übrigen auch für alle anderen Baureihen. Die maximalen Differenzdrücke werden durch die Überströmventile bestimmt. Sie sind bei der ADEx-Reihe kleiner als bei den anderen Baureihen, um die Temperaturanforderungen der ADEx-Richtlinie zu erfüllen und in der Tabelle in Klammern angegeben. Ihr Gehäuse wird aus Grauguss GG gefertigt und ist mit 1 bar Überdruck geprüft. Die Abdichtung gegen Atmosphäre erfolgt über Radialwellendichtringe. Die Standardpumpe zeichnet sich durch eine robuste und kompakte Bauweise sowie durch ein hohes Kompressionsverhältnis aus, das auch bei kleinen Vorpumpen zu hohem Saugvermögen der Pumpkombination führt, und so kurze Auspumpzeiten ermöglicht. Die senkrechte Förderrichtung macht sie weitgehend unempfindlich gegen Staub- und Flüssigkeitsanfall.

2.6.4.2 Standardpumpen mit Magnetkupplung

Die AM-Reihe ist für Prozesse einsetzbar, die höchste Ansprüche an Dichtheit und längste Service-Intervalle stellen. Sie entspricht weitestgehend der A-Reihe, zeichnet sich jedoch zusätzlich durch eine hermetisch dichte Magnetkupplung anstelle von Radialwellendichtringen aus. Sie arbeitet somit praktisch verschleißfrei. Die integrale Leckrate der Pumpe liegt bei $Q_l < 1 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s. Ölaustritt kann somit ausgeschlossen werden und es findet auch kein Austausch zwischen Prozessgas und Umgebung statt.

Standardpumpen der AM-Reihe sind für alle in der Tabelle Tabelle 2.12 angegebenen Anwendungen geeignet. Darüber hinaus sind sie aber auch einsetzbar in der Industrie/Chemie zum Pumpen toxischer Gase sowie bei Reinstgasanwendungen, z. B. für CVD- und PVD-Prozesse in der Halbleiterindustrie oder zum Evakuieren von Schleusen/Transferkammern und bei der Herstellung von Flachbildschirmen. Erhältlich ist die AM-Reihe in den Größen 250 m³/h bis 6.000 m³/h.

2.6.4.3 Pumpen in Ex-Schutz-Ausführung

Für Prozesse in explosionsgefährdeter Umgebung oder zum Evakuieren von explosiven Gasen stehen die Baureihen ADx und ADEx zur Verfügung.

Pumpen der ADx-Reihe, PTFE-gedichtet, mit Saugvermögen von 500 bis 4.000 m³/h sind aus Sphäroguss GGG 40.3 gefertigt und werden mit oder ohne ATEX-Motor geliefert. Sie sind nicht zum Fördern explosiver Gase geeignet, dürfen aber in explosionsgefährdeter Umgebung betrieben werden. Sie erfüllen die Explosionsschutzanforderungen der Richtlinie 94/9/EG – (i)/II 3G II BT3 (o).

Pumpen der ADEx-Reihe sind baugleich mit denen der ADx-Reihe. Sie sind ausgerüstet mit einer ATEX-Kupplung sowie einem integrierten ATEX-Temperaturfühler und werden mit und ohne ATEX-Motor (EEx de IIC T4) geliefert. Ab 800 mbar können sie ohne Umwegleitung eingeschaltet werden, wodurch man Ventile einspart. Sie erfüllen die Explosionsschutzanforderungen nach der Richtlinie 94/9/EG (II 2G IIB T3 (i) (o)).

Zum sicheren Betrieb der Pumpen sind generell zusätzliche Maßnahmen bzw. Komponenten wie An- und Abfahrvorschriften, spezielle Vorvakuumumpumpen, Flammendurchschlagsicherungen und Drucksensoren vorgeschrieben. Natürlich muss die gesamte Anlage nach den entsprechenden Ex-Schutz-Vorschriften ausgelegt und betrieben werden. Beide Baureihen sind mit Saugvermögen von 500 bis 4.000 m³/h erhältlich.

Gasgekühlte Wälzkolbenpumpen

Die im Abschnitt 2.6.1 beschriebenen gasgekühlten Wälzkolbenpumpen können auf Anfrage in den Größen 500 m³/h (18,5 kW Antriebsleistung) bis 12.000 m³/h (200 kW Antriebsleistung) geliefert werden.

2.6.4.4 Pumpstände

Pfeiffer Vacuum bietet die Standardpumpstände CombiLine mit einstufigen und zweistufigen Vorpumpen an:

Wälzkolbenpumpstände WU ... mit einstufigen Drehschieberpumpen

HenaLine/UnoLine Plus mit einem Enddruck $p < 5 \cdot 10^{-2}$ mbar. Sie sind kostengünstig und für folgende Anwendungen geeignet:

- ▶ Evakuierung von Schleusenkammern (z. B. Elektronenstrahlschweißen, Beschichtung)
- ▶ Helium-Lecksuche
- ▶ Vakuumtrocknung und -entgasung, Metallurgie (z. B. Härten, Sintern, Löten, Gießen, Schmelzen)

Wälzkolbenpumpstände WD ... mit zweistufigen Drehschieberpumpen DuoLine mit einem Enddruck $p < 5 \cdot 10^{-4}$ mbar für folgende Anwendungen:

- ▶ Vorpumpstand für Hochvakuum-Pumpen
- ▶ Beschichtung (z. B. Verschleißschutz, dekorative Schichten, Wärmeschutzschichten, optische Schichten)
- ▶ Metallurgie (z. B. Härten, Sintern, Löten, Gießen, Schmelzen, Entgasung)

Wälzkolbenpumpstände WH ... mit trockenen Schraubenpumpen UniDry 50 oder HeptaDry mit einem Enddruck $p < 1 \cdot 10^{-2}$ mbar für folgende Anwendungen:

- ▶ Beschichtung (Solarindustrie, Metallisierung, Oberflächenbehandlung)
- ▶ Entgasung von Stahl und Kunststoffen
- ▶ Vakuumtrocknung, Teilereinigung
- ▶ Lecktestanlagen
- ▶ Gefriertrocknung

2.6.5 Zubehör

Als Zubehör werden für alle Wälzkolbenpumpen der Baureihe OktaLine Splitterschutzsätze angeboten.

Als Schmiermittel stehen folgende Öle zur Schmierung des Getriebes und der Lager zur Verfügung (Tabelle 2.7):

- ▶ Mineralöl P3 (von 0,5 l- bis 200 l-Gebinden)
- ▶ Perfluorpolyether F5 (von 0,5 l- bis 50 l-Gebinden)
- ▶ Diesteröl D1 (von 0,5 l- bis 200 l-Gebinden)

Vorsicht: Die Öle dürfen untereinander nicht vermischt werden. Die Pumpen sind bei Auslieferung auf jeweils eine dieser Ölsorten vorbereitet.

Da viele Wälzkolbenpumpen in Pumpkombinationen eingebaut werden, ist die Integration folgender Zubehörteile bei Bedarf möglich:

- ▶ Elektrische Steuerungen
- ▶ Messausrüstungen für Temperatur und Druck
- ▶ Einrichtungen zur Druckregelung

- ▶ Wärmetauscher und Kondensatoren
- ▶ Schalldämmkapselungen für Innen- und Außenaufstellungen
- ▶ Schalldämpfer
- ▶ Staubabscheider
- ▶ Spüleinrichtungen
- ▶ Schwingungsisolation
- ▶ Flüssigkeitsabscheider
- ▶ Getrieberaumabsaugung
- ▶ Sperrgasversorgung

Messanschlüsse

Bei vielen Wälzkolbenpumpen besteht die Möglichkeit, an der Saug- und Druckseite der Pumpe Messanschlüsse zu nutzen. Hierzu können z. B. die vorhandenen Verschlusschrauben durch ISO-KF-Einschraub-Kleinflansche ersetzt werden. Dies ermöglicht den Anschluss von entsprechenden Temperatur- und Druckaufnehmern zur Überwachung der Pumpe.

Sperrgasanschluss

Beim Fördern von Lösungsmitteln bzw. von reaktiven Gasen besteht die Gefahr einer starken Verdünnung des Schmiermittels durch Kondensation. Reaktive Gase oder Dämpfe können zusätzlich Teile des Getrieberaumes angreifen. Durch den Einlass eines Sperrgases im Bereich der Wellendurchführung zwischen Arbeits- und Getrieberaum kann diese Gefahr weitgehend vermieden werden. Als Sperrgas werden Inertgase, meist Stickstoff (N₂), verwendet.

Getrieberaumabsaugung

Bei allen Prozessen, in deren Verlauf große Wälzkolbenpumpstände in kurzen Taktzeiten bestimmte Drücke erreichen sollen (Schnelleвакуierung), ist es zweckmäßig, die Getrieberäume einer Wälzkolbenpumpe mit einer separaten Vakuumpumpe über je einen Ölabscheider auszupumpen. Dadurch wird eine Strömung des Gases aus dem Getrieberaum in den Schöpfraum vermieden und der gewünschte Arbeitsdruck kann schneller erreicht werden. Ob ein Anschluss der Getrieberäume zur Vorvakuumseite der Wälzkolbenpumpe hin möglich ist, hängt vom gewünschten Arbeitsdruck ab.

Spüleinrichtung

Bei Prozessen, in denen sich in den Schöpfräumen Beläge bilden, kann eine Spüleinrichtung eingesetzt werden. Die Ausführung dieser Einrichtung wird je nach Anforderung mit dem Kunden individuell abgestimmt. Die Spülung bei Standardpumpen erfordert den Einsatz von Sperrgas, damit die Spülflüssigkeit nicht in die Lager- bzw. Getrieberäume gelangen kann.

Oberflächenschutz

Für den Fall, dass die abzupumpenden Medien korrosiv sind, können die produktberührenden Teile mit einem beständigen Oberflächenschutz versehen werden. Das plasmapolymeres Dünnschichtsystem besteht aus einer Haftvermittlerschicht, einer Korrosionsschutzschicht und einer Antihafbeschichtung. Die Schichtdicke beträgt weniger als 1 µm. Als kurzfristiger Oberflächenschutz, z. B. für Lagerhaltung und Transport, kann der Pumpraum auf Wunsch phosphatiert, mit Stickstoff geflutet und vakuumdicht verschlossen werden.

Dichtungen

Wälzkolbenpumpen werden standardmäßig mit O-Ringen aus FPM ausgerüstet. Für Sonderanwendungen können alle Pumpen mit den für den entsprechenden Anwendungsfall erforderlichen O-Ringen bzw. Dichtungswerkstoffen ausgerüstet werden.

2.7 Seitenkanalhochvakuumumpen

2.7.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Die Seitenkanalhochvakuumpumpe ist eine Vakuumpumpe, die von der Atmosphäre bis in den Hochvakuumbereich arbeitet. Die Pumpe ist eine Kombination aus Seitenkanalpumpe (Druckbereich 1.000 – 5 mbar) und Holweckstufen (Druckbereich 5 – 10^{-5} mbar).

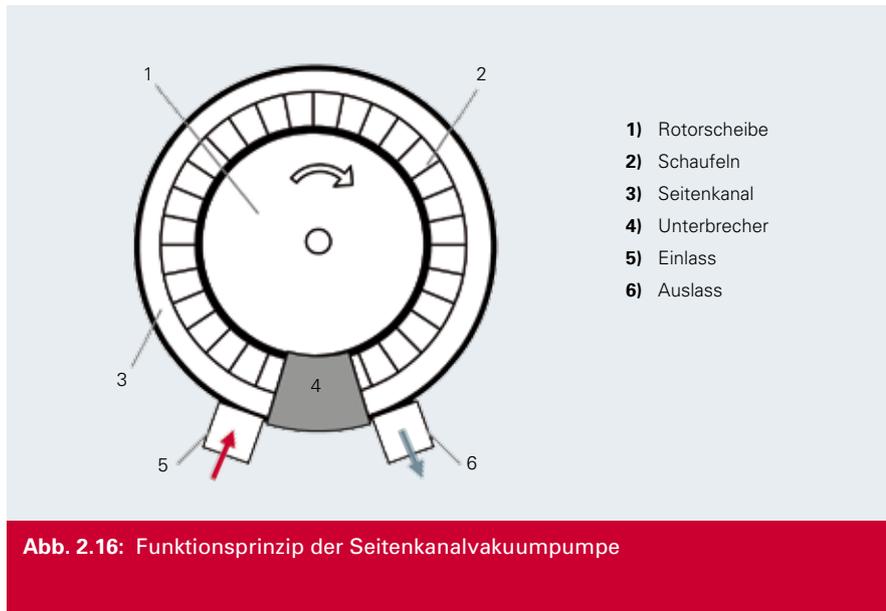


Abb. 2.16: Funktionsprinzip der Seitenkanalvakuumpumpe

Das Pumpsystem der Seitenkanalpumpe (Abbildung 2.16) besteht aus einer Rotorscheibe (1) mit am äußeren Umfang angeordneten Schaufeln (2) und einem ringförmigen Arbeitsraum, dem Seitenkanal (3). Dieser wird an einer Stelle durch einen Unterbrecher (4) auf das Scheibenprofil verengt. Der Pumpeffekt entsteht durch eine schraubenförmige Strömung vom Einlass zum Auslass, verursacht durch die Schaufeln des drehenden Rotors. Dadurch entsteht eine Druckdifferenz zwischen Einlass (5) und Auslass (6). Niedrige Enddrücke erreicht man durch das Hintereinanderschalten mehrerer Pumpstufen.

Bei Drücken zwischen 1 und 20 mbar verlässt man den laminaren Strömungsbereich. Dort übernehmen Holweckstufen (Abbildung 2.21) die Gasförderung.

Zur Anpassung an den noch recht hohen Druck der Seitenkanalpumpstufen sind die Holweckkanäle vorvakuumseitig klein und die Spalte eng. Zur Saugseite hin werden größere Kanalquerschnitte verwendet, um das Saugvermögen zu erhöhen.

2.7.2 Anwendungshinweise

Eine solche Pumpe eignet sich besonders gut zur Erzeugung eines sauberen Hochvakuums. Sie arbeitet völlig trocken, da sie nur auf der Atmosphärenseite ein mit Öl geschmiertes Lager aufweist. Sie ist ideal zum schnellen Auspumpen von Schleusen oder Transferkammern geeignet, da auf Vorpumpen und Bypassleitungen verzichtet werden kann. Die Pumpe ist entweder als Einzelpumpe oder als Vorpumpe für Turbopumpen einsetzbar. Wegen der engen Spalte können korrosive Gase, Kondensate und Partikel nicht gefördert werden.

2.7.3 Portfolioüberblick

Pfeiffer Vacuum bietet mit dem OnTool Booster 150 eine trockene Seitenkanalhochvakuum-
pumpe an:

Tabelle 2.13: Kenndaten OnTool™ Booster

Typenbezeichnung	Saugvermögen in m ³ /h	Basisdruck in mbar	Kompressions- verhältnis	Anwendungsgebiete
OnTool™ Booster 150	130	1 · 10 ⁻⁵	10 ⁸	Schleusen, Vorpumpen für Turbopumpen

2.8 Turbomolekularpumpen

2.8.1 Aufbau / Funktionsprinzip

Die Turbomolekularpumpe wurde 1957 von Dr. W. Becker im Hause Pfeiffer Vacuum entwickelt und patentiert. Turbomolekularpumpen, im Folgenden auch kurz als Turbopumpen bezeichnet, gehören zu den kinetischen Vakuumpumpen. Ihr Aufbau ist einer Turbine ähnlich. In einem Gehäuse rotiert ein mehrstufiger, turbinenartiger Rotor mit beschauften Scheiben. Zwischen den Rotorscheiben sind ebenfalls beschauften Statorscheiben mit ähnlicher Geometrie spiegelverkehrt angeordnet.

Lagerung

Die Lagerung der Rotoren mit zwei Kugellagern ist problematisch, da wegen der Schmierstoffe beide Lager auf der Vorvakuumseite angeordnet werden müssen und der Rotor mit seiner großen Masse nur einseitig (fliegend) gelagert werden kann.

Demgegenüber hat die Hybridlagerung Vorteile bezüglich der Rotordynamik. Hier sitzt ein mit Öl geschmiertes Kugellager am Wellenende auf der Vorvakuumseite und auf der Hochvakuumseite ein wartungs- und verschleißfreies Permanentmagnetlager, das den Rotor radial zentriert. Ein kleines trocken-
es Fanglager ist innerhalb des Magnetlagerstators angeordnet. Ein Wellenzapfen dreht sich bei normalem Betrieb frei innerhalb dieses Lagers. Bei starken radialen Stößen stabilisiert es den Rotor und dreht sich dabei nur kurzzeitig. Die Lagerung an beiden Wellenenden erzeugt bei Unwucht des Rotors wesentlich geringere Vibrationskräfte, die die Lager belasten, als bei fliegender Lagerung. Außerdem entfällt das größere der beiden Lager, das aufgrund seiner Baugröße nur begrenzte Rotordrehzahlen zuließe, auf der Antriebswelle.

In großen Pumpen werden sogenannte 5-Achsen-Magnetlagerungen verwendet. Der Rotor wird durch eine digitale elektronische Regelung über Wegsensoren und Elektromagnete in axialer und an beiden Wellenenden in jeweils zwei radialen Richtungen in der Schwebe gehalten [8]. Durch eine elektronische Unwuchtkompensation und wegen des fehlenden mechanischen Kontaktes zwischen Rotor und Gehäuse sind die von der Pumpe erzeugten Vibrationen gering.

Neben der auch vorvakuumseitigen Ölfreiheit ist die Verschleiß- und Wartungsfreiheit ein weiterer Vorteil. Bei Stromausfall werden die Magnetlager elektrisch aus der Rotationsenergie der Pumpe gespeist. So können minutenlange Stromausfälle problemlos überbrückt werden. Bei länger dauernden Stromausfällen kommt der Rotor erst bei sehr niedriger Drehzahl über den Einsatz eingebauter Fanglager sicher zum Stillstand. Bei defekter Elektronik oder starken Luft-
einbrüchen wird der Rotor mithilfe der Fanglager ohne Schaden bis zum Stillstand abgebremst.

Motoren/ Antriebsgeräte

Zum Antrieb der Rotoren benutzt man kollektorlose Gleichstrommotoren, die mit elektronischen Antriebsgeräten Rotationsfrequenzen bis zu 1.500 Hz (90.000 U/min) ermöglichen. Damit werden die zum Pumpen der Gase erforderlichen Schaufelgeschwindigkeiten erreicht.

Die Antriebsgeräte sind heute größtenteils direkt an die Pumpen angebaut. Die Stromversorgung erfolgt mit 24 oder 48 Volt Gleichspannung, erzeugt von externen Netzteilen. Bei großen Pumpen werden die Antriebsgeräte direkt aus der gleichgerichteten Netzspannung versorgt.

2.8.1.1 Funktionsprinzip Turbomolekularpumpe

Die Pumpwirkung einer Anordnung aus Rotor- und Statorschaufeln beruht auf der Impulsübertragung von den schnell rotierenden Schaufeln auf die zu pumpenden Gasmoleküle. Moleküle, die auf die Schaufeln treffen, werden dort adsorbiert und verlassen nach einer gewissen Zeit die Schaufel wieder. Dabei addiert sich die Schaufelgeschwindigkeit zur thermischen Molekülgeschwindigkeit. Damit die durch die Schaufel übertragene Geschwindigkeitskomponente nicht durch Stöße mit anderen Molekülen verloren geht, muss in der Pumpe Molekularströmung herrschen, d. h. die mittlere freie Weglänge muss größer sein als der Schaufelabstand.

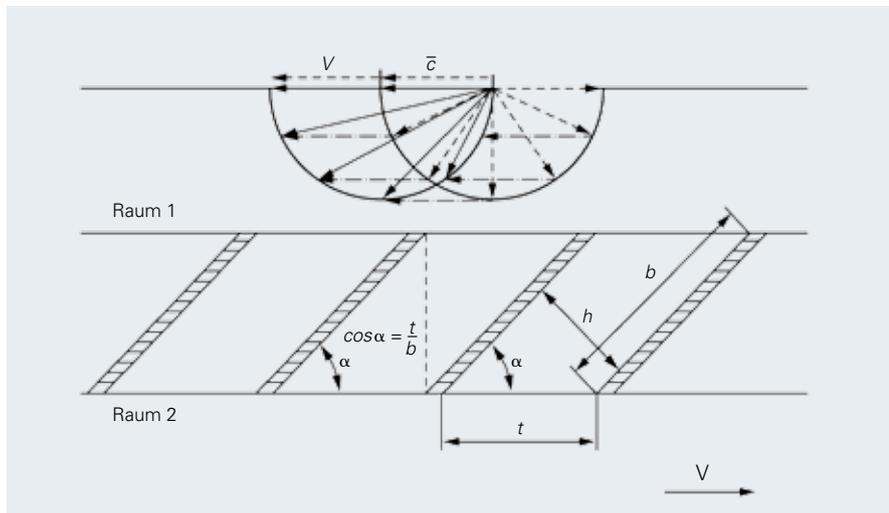


Abb. 2.17: Funktionsprinzip der Turbomolekularpumpe

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Bei kinetischen Pumpen stellt sich im Zuge der Gasförderung ein Gegendruck ein, der eine Rückströmung verursacht. Das Saugvermögen ohne Gegendruck wird mit S_0 bezeichnet. Das Saugvermögen nimmt mit steigendem Gegendruck ab und erreicht den Wert 0 beim maximalen Kompressionsverhältnis K_0 .

Kompressionsverhältnis

Das Kompressionsverhältnis, K_0 genannt, kann nach den Überlegungen Gaedes abgeschätzt werden [9]. Für die optisch dichte Schaufelstruktur (Abbildung 2.17) gilt Formel 2-9.

Formel 2-9
K₀ Turbopumpe

$$K_0 = \exp\left(\frac{v}{\bar{c} \cdot g \cdot t \cdot \sin\alpha}\right)$$

Die geometrischen Verhältnisse sind der Abbildung 2.17 entnommen. Der Faktor g liegt zwischen 1 und 3 [10]. Man sieht aus dieser Gleichung, dass K_0 exponentiell mit der Schaufelgeschwindigkeit v ansteigt und ebenso mit \sqrt{M} wegen

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad (\text{Formel 1-7}).$$

Deshalb ist z. B. das Kompressionsverhältnis für Stickstoff wesentlich höher als das für Wasserstoff.

Saugvermögen

Das Saugvermögen S_0 ist proportional der Ansaugfläche A und der mittleren Umlaufgeschwindigkeit der Schaufeln v , also der Drehzahl [9]. Unter Berücksichtigung des Schaufelwinkels α erhält man:

Formel 2-10
Saugvermögen Turbopumpe

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

Berücksichtigt man den Eintrittsleitwert des Flansches $L_{Bm} = \frac{\bar{c}}{4} \cdot A$ (Formel 1-19) sowie den optimalen Schaufelwinkel von 45° , so erhält man das effektive Saugvermögen S_{eff} einer Turbopumpe für schwere Gase (Molekulargewicht > 20) näherungsweise nach der folgenden Formel:

Formel 2-11
S_{eff} Turbopumpe

$$S_{eff} = \frac{S_0 + L_{Bm}}{S_0 \cdot L_{Bm}} = \frac{A \cdot v}{4 \cdot \left(\frac{v}{\bar{c}} + 1\right)}$$

Dividiert man das effektive Saugvermögen durch die beschauelte Eintrittsfläche der obersten Scheibe, so erhält man das maximale spezifische Saugvermögen einer Turbopumpe für z. B. Stickstoff (Kurve in Abbildung 2.18):

Formel 2-12
Spezifisches Saugvermögen

$$S_A = \frac{S_{eff}}{A} = \frac{d_f \cdot v}{4 \cdot \left(\frac{v}{\bar{c}} + 1\right)}$$

In Abbildung 2.18 ist auf der Ordinate das spezifische Saugvermögen für $d_f = 1$ in $l/(s \cdot \text{cm}^2)$ und auf der Abszisse die mittlere Schaufelgeschwindigkeit $v = \pi \cdot f \cdot (R_o + R_i)$ aufgetragen. Geht man von diesem Punkt senkrecht nach oben, so zeigt der Schnittpunkt mit der Kurve das maximale spezifische Saugvermögen der Pumpe S_A . Multipliziert man diesen Wert mit der beschauelten Fläche der Eingangsscheibe: $A = (R_o^2 - R_i^2) \cdot \pi$, so erhält man das Saugvermögen der Pumpe und kann dies mit den Katalogangaben vergleichen.

Die in der Abbildung 2.18 eingetragenen Punkte wurden aus Messwerten der angegebenen Pumpen von Pfeiffer Vacuum ermittelt. Punkte weit oberhalb der Kurve sind unrealistisch.

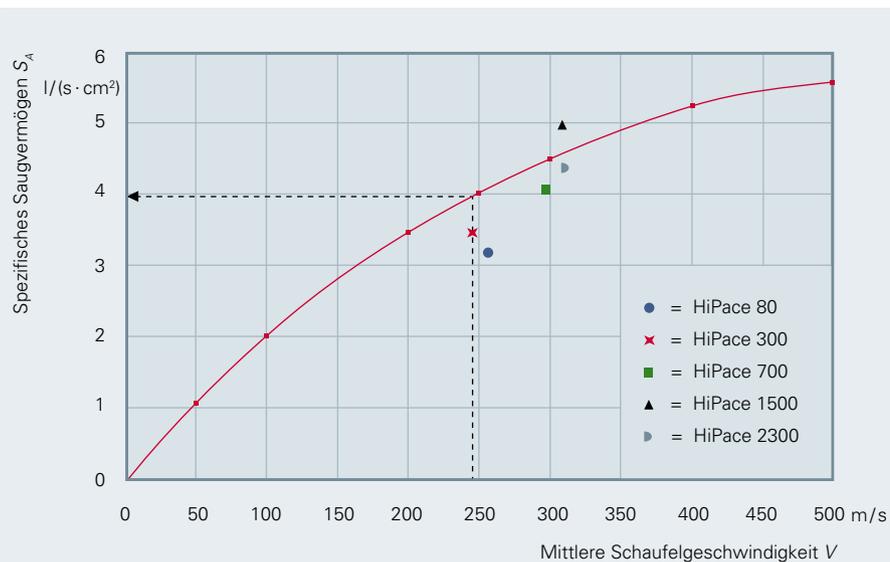


Abb. 2.18: Spezifisches Saugvermögen von Turbopumpen

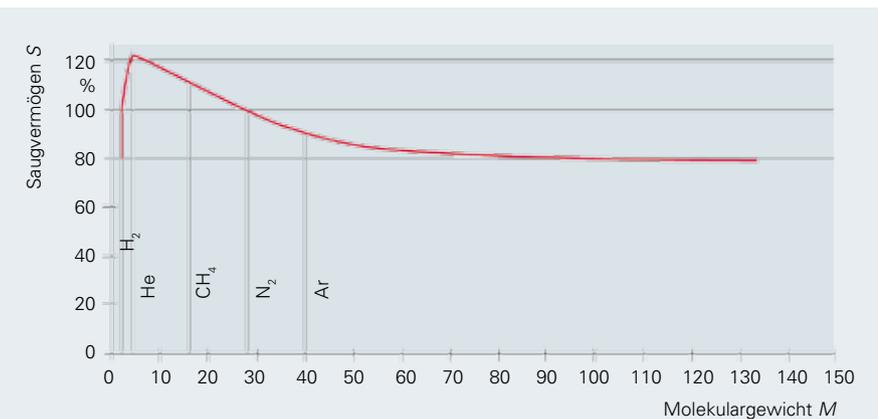


Abb. 2.19: Saugvermögen als Funktion des Molekulargewichtes

Die so ermittelten Saugvermögen sagen noch nichts über die Werte für leichte Gase, z. B. für Wasserstoff, aus. Normalerweise werden in einer Turbopumpe Pumpstufen mit verschiedenen Schaufelwinkeln verwendet und die Abstufung wird auf maximales Saugvermögen für Wasserstoff optimiert. So erhält man Pumpen mit ausreichenden Kompressionsverhältnissen sowohl für Wasserstoff (etwa 1.000) als auch für Stickstoff, das wegen des hohen Partialdruckes in der Luft 10^9 betragen sollte. Bei reinen Turbomolekularpumpen braucht man wegen der Molekularströmung Vorvakuumdrücke von etwa 10^{-2} mbar.

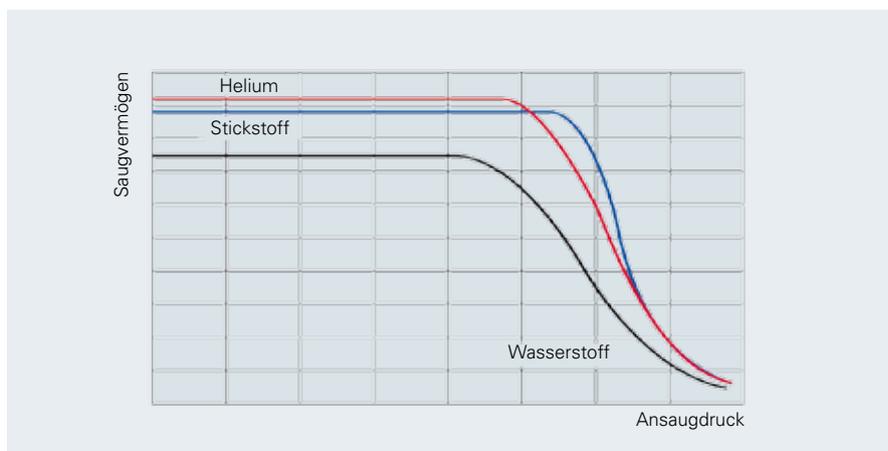
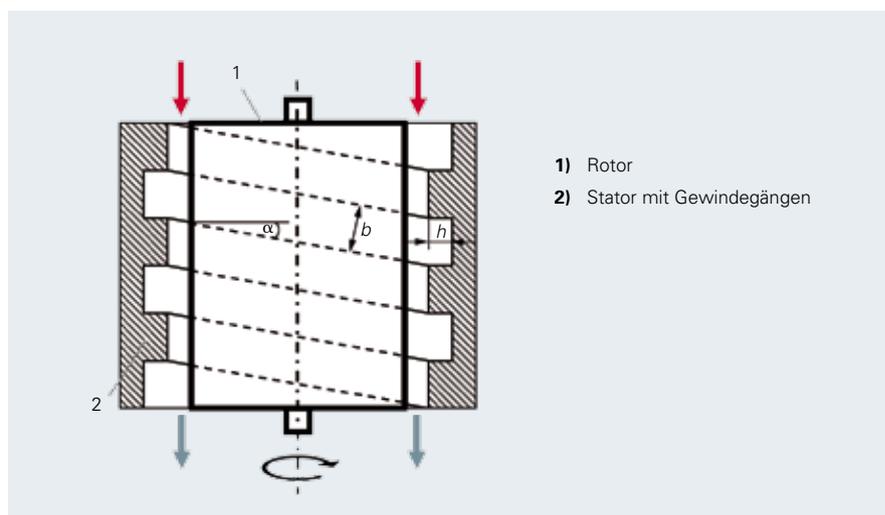


Abb. 2.20: Saugvermögen als Funktion des Ansaugdruckes

2.8.1.2 Funktionsprinzip Holweckstufe

Die Holweckstufe ist eine mehrstufige Gaede'sche Molekularpumpe [10] mit schraubenförmig aufgewickeltem Pumpkanal. Durch die Drehung des Rotors erhalten die in den Pumpkanal eintretenden Gasmoleküle eine Vorzugsgeschwindigkeit in Richtung des Kanals. Rückströmverluste entstehen durch Spalte zwischen den Stegen, die die Holweckkanäle voneinander trennen und dem Rotor. Die Spaltweiten müssen klein gehalten werden, um die Rückströmung zu minimieren. Als Holweckstufen benutzt man zylindrische Hülssen (1), die um schraubenförmige Kanäle im Stator (2) rotieren. Durch Anordnung von Statoren sowohl außerhalb als auch innerhalb des Rotors kann man leicht zwei Holweckstufen in eine Pumpe integrieren.



- 1) Rotor
- 2) Stator mit Gewindegängen

Abb. 2.21: Funktionsprinzip der Holweckstufe

Das Saugvermögen S_0 der Holweckstufen ist gleich:

Formel 2-13
Saugvermögen
Holweckstufe

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot v \cdot \cos\alpha$$

Hierbei ist $b \cdot h$ der Kanalquerschnitt und $v \cdot \cos\alpha$ die Geschwindigkeitskomponente in Kanalrichtung.

Das Kompressionsverhältnis steigt exponentiell mit der Kanallänge L und der Geschwindigkeit $v \cdot \cos\alpha$ [4]:

Formel 2-14
Kompressionsverhältnis
Holweckstufe

$$K_0 = \frac{v \cdot \cos\alpha \cdot L}{\bar{c} \cdot g \cdot h} \text{ mit } 1 < g < 3$$

Die nach dieser Formel ermittelten Werte sind viel zu groß, da die Rückströmung aus dem Nachbarkanal über den Steg das Kompressionsverhältnis drastisch mindert und dieser Einfluss in der Formel 2-14 nicht berücksichtigt wird.

Um kleine trockene Vorpumpen, z. B. Membranpumpen mit einem Enddruck < 5 mbar verwenden zu können, werden Turbopumpen heute mit Holweckstufen ausgerüstet. Man nennt solche Pumpen Turbodragpumpen. Da man wegen der hohen Vorverdichtung der Turbopumpe für die Holweckstufen nur noch kleine Saugvermögen braucht, kann man die Förderkanäle und besonders die Kanalhöhe sowie die Abstände zu den Rotoren sehr klein halten und so die Molekularströmung noch bis in den Bereich 1 mbar erhalten. Gleichzeitig werden die Kompressionsverhältnisse für Stickstoff um den erforderlichen Faktor 10^3 erhöht. Man erkennt in Abbildung 2.22 die Verschiebung der Kompressionsverhältniskurven um etwa zwei Zehnerpotenzen hin zu höherem Druck.

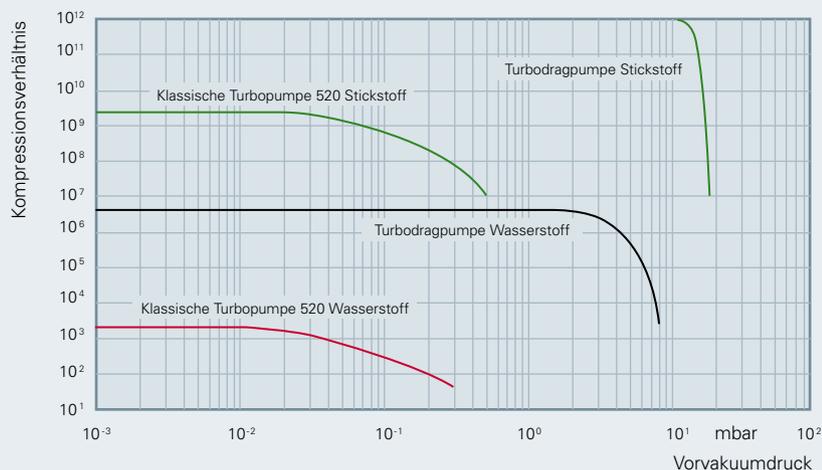


Abb. 2.22: Kompressionsverhältnisse von reinen Turbo- und Turbodragpumpen

2.8.1.3 Pumpeigenschaften von Turbopumpen

Gaslasten

Die Gaslasten, $q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$ (Formel 1-13), die man mit einer Turbomolekularpumpe fördern kann, steigen im Bereich konstanten Saugvermögens proportional zum Druck an und erreichen im abfallenden Bereich ein Maximum, das auch von der Größe der Vorpumpe abhängt. Die maximal zulässigen Gaslasten sind abhängig von der Kühlung und der Gasart.

Problematisch ist das Fördern schwerer Edelgase, da sie bei Stößen auf den Rotor viel Verlustleistung erzeugen und wegen ihrer geringen spezifischen Wärme nur wenig davon zum Gehäuse hin abführen. Durch Messung der Rotortemperatur und Reduzierung der Drehzahl wird die Pumpe im sicheren Bereich betrieben. In den technischen Daten der Turbopumpen sind die maximal zulässigen Gaslasten bei Nenndrehzahl für die Gasarten Wasserstoff, Helium, Stickstoff und Argon angegeben.

Vorvakuumverträglichkeit

Unter der Vorvakuumverträglichkeit versteht man den maximalen Druck auf der Vorvakuumseite der Turbomolekularpumpe, bei dem die Kompression der Pumpe absinkt. Dieser Wert wird im Rahmen der Messungen zur Bestimmung der Kompressionsverhältnisse nach ISO 21360-1 durch Erhöhung des Vorvakuumdruckes ohne Gaseinlass auf der Saugseite ermittelt. Die maximale Vorvakuumverträglichkeit ist in den technischen Daten der Turbomolekularpumpen immer für Stickstoff angegeben.

Basisdruck, Enddruck, Restgas

Man unterscheidet bei Vakuumpumpen zwischen Enddruck und Basisdruck (siehe auch 2.1.3). Während der Basisdruck p_b von der Pumpe unter den in den Messvorschriften angegebenen Bedingungen in der vorgeschriebenen Zeit erreicht werden muss, kann der Enddruck p_e wesentlich tiefer liegen. Der Basisdruck wird bei sauberen Bedingungen und metallischer Abdichtung im HV-Bereich nach 48 Stunden Ausheizen erreicht. Bei Pumpen mit Aluminiumgehäuse ist der Basisdruck angegeben, der ohne Ausheizen mit sauberen FPM-Dichtungen erreicht wird.

Pumpen in Korrosivgasausführung haben wegen der Beschichtung der Rotoroberfläche eine höhere Desorptionsrate, die vorübergehend zu höheren Basisdrücken führen kann.

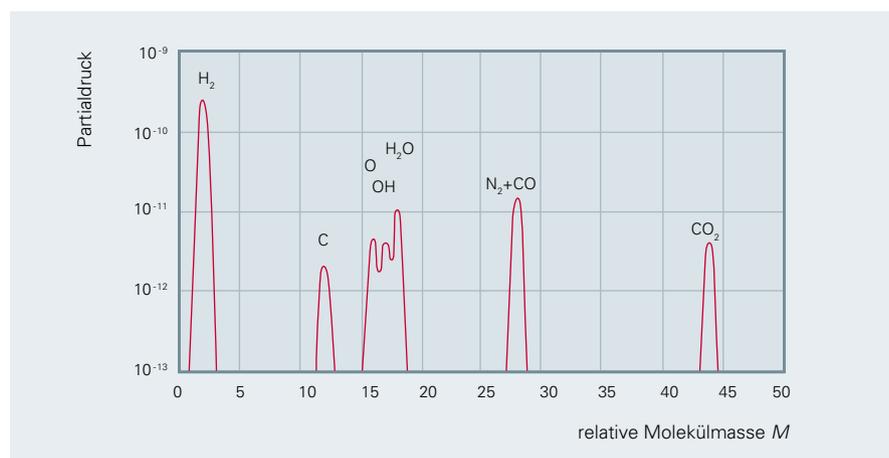


Abb. 2.23: Typisches Restgasspektrum einer Turbomolekularpumpe

Der Enddruck ergibt sich durch Division des Vorvakuumdruckes durch das Kompressionsverhältnis:

Formel 2-15
Enddruck

$$p_e = \frac{p_v}{K_0}$$

Ob er erreicht wird, hängt von der Größe und Sauberkeit der Apparatur und der Pumpe sowie von den Ausheizbedingungen ab. Nach extremem Ausheizen (bis 300 °C) findet man im Restgas nur noch H₂, CO und CO₂. Das sind Gase, die im Metall des Rezipienten gelöst sind und permanent austreten.

Bei der verwendeten Vorpumpe sollte hin und wieder der Gasballast eingeschaltet werden, um eine Ansammlung von Wasserstoff im Vorvakuumbereich zu verhindern. In vielen Fällen wird der sich tatsächlich einstellende Enddruck durch die Desorptionsbedingungen auf der Hochvakuumseite der Turbopumpe und deren Saugvermögen bestimmt und nicht durch die Kompressionsverhältnisse der verwendeten Pumpen.

2.8.2 Anwendungshinweise

Erzeugung eines sauberen Vakuums

Turbopumpen sind zur Erzeugung sauberer Vakua im Bereich 10⁻³ bis 10⁻¹⁰ mbar geeignet. Durch ihr hohes Kompressionsverhältnis sperren sie Öl aus dem Ansaugbereich von Drehschieberpumpen zuverlässig vom Rezipienten ab. Die Modelle mit Edelstahlgehäusen und CF-Flanschen sind ausheizbar. Damit sind diese Pumpen ideal für Anwendungen in Forschung und Entwicklung geeignet, wo Verunreinigungen des Restgases unerwünscht sind.

Turbopumpen können zum Evakuieren großer Behälter mit Drehschieberpumpen als Vorpumpen betrieben werden. Für Turbodragpumpen reichen schon zweistufige Membranpumpen als Vorpumpen aus, die jedoch wegen ihres geringen Saugvermögens lange Zeit benötigen, um größere Behälter auszupumpen. Auch ist der Gasdurchsatz der Pumpenkombination durch die Membranpumpe stark eingeschränkt. Diese Kombination ist jedoch eine sehr kostengünstige Lösung für einen trockenen Pumpstand. Er findet oft Anwendung bei differenziell gepumpten Massenspektrometern. Pumpstände aus Vorpumpe und Turbopumpe kommen ohne Ventile aus. Man schaltet beide Pumpen gleichzeitig ein. Sobald die Vorpumpe den notwendigen Vorvakuumdruck erreicht hat, beschleunigt die Turbopumpe schnell auf ihre Nenn-drehzahl und evakuiert mit ihrem hohen Saugvermögen den Behälter in kurzer Zeit auf einen Druck $p < 10^{-4}$ mbar. Kurzzeitige Stromausfälle werden durch die hohe Drehzahl des Rotors überbrückt. Bei längeren Stromausfällen kann nach Unterschreiten einer Mindestdrehzahl des Rotors die Pumpe und auch der Rezipient automatisch geflutet werden.

Die Effekte, die beim Auspumpen von Behältern eine Rolle spielen, werden in Kapitel 7 beschrieben, ebenso Fragen der Dimensionierung sowie die Berechnung von Auspumpzeiten.

Auspumpen von Schleusenammern

Das Auspumpen von Schleusenammern verlangt definitiv ein sauberes Handling beim Umlagern von Teilen, die in einem Vakuumprozess behandelt werden. Werden die Objekte von Atmosphärendruck eingeschleust, sollte die Kammer zunächst über eine Bypass-Leitung vorevakuiert werden. Danach wird die laufende Turbopumpe zwischen Vorpumpe und Kammer über Ventile zugeschaltet.

Anwendungen in der Analytik

In Analysegeräten werden heute in vielen Fällen Massenspektrometer eingesetzt. Oft werden Flüssigkeiten injiziert und in der Eingangskammer des Vakuumsystems verdampft. Die Herabsetzung des Druckes erfolgt in mehreren Stufen, wobei die einzelnen Kammern durch Blenden voneinander getrennt sind. Da man an jeder Kammer pumpen muss, versucht man durch geschickte Kombination von Vor- und Turbopumpen, die Gasströme über Anzapfungen an der Turbopumpe zusammenzuführen. Für Serienanwendungen werden speziell modifizierte Turbopumpen mit Anzapfungen verwendet.

Auch Helium-Lecksucher werden mit Turbopumpen ausgerüstet. Man verwendet hier oft das Gegenstromprinzip, bei dem ein Massenspektrometer auf der Hochvakuumseite der Pumpe angeordnet ist. Wegen des geringeren Kompressionsverhältnisses der Turbopumpe für Helium im Vergleich zu Stickstoff oder Sauerstoff wirkt die Pumpe als selektiver Verstärker für den Heliumpartialdruck.

Pumpen hoher Gaslasten bei Vakuumprozessen

Beim Pumpen hoher Gaslasten im Verlauf von Vakuumprozessen hat die Turbopumpe zwei Vorteile: Zu Beginn eines Prozessschrittes erzeugt sie ein sauberes Vakuum und kann anschließend Prozessgas ohne schädliche Rückströmung abpumpen. Im zweiten Schritt steht die Aufrechterhaltung eines bestimmten Druckes, bei dem der gewünschte Vakuumprozess ablaufen soll, im Vordergrund. Hier werden die Gasdurchsätze und der Arbeitsdruck durch die Anwendung bestimmt, d. h. dass ein bestimmtes Saugvermögen bei einem bestimmten Gasdurchsatz gefordert wird. Außerdem soll in kurzer Zeit ein sauberes Zwischenvakuum beim Wechsel des Objektes erreicht werden. Da diese Forderungen widersprüchlich sind, wird eine Turbopumpe ausreichender Größe für den geforderten Gasdurchsatz und das geforderte Zwischenvakuum gewählt. Der Prozessdruck wird über ein Eingangsventil (z. B. Schmetterlings-Ventil) geregelt. Ein Beispiel für die Dimensionierung eines solchen Pumpstandes finden Sie in Kapitel 7. Die in den technischen Daten angegebenen maximal zulässigen Gaslasten sind als zulässige Dauerlasten zu verstehen. Dies gilt unter den Voraussetzungen, dass eine ausreichende Kühlung gemäß Spezifikation sichergestellt ist und der Vorvakuumdruck kleiner ist als 50 % der Vorvakuumverträglichkeit.

Pumpen korrosiver und abrasiver Stoffe

Für das Pumpen von korrosiven Gasen müssen Maßnahmen ergriffen werden, die insbesondere den Motor- bzw. Lagerbereich sowie den Rotor vor Korrosion schützen. Hierzu werden alle Oberflächen, die Korrosivgas ausgesetzt sind, mit einer Beschichtung versehen oder aus Materialien gefertigt, die einem Angriff dieser Gase widerstehen. In den Motor- und Lagerbereich des Vorvakuums wird, über ein spezielles Sperrgasventil ein definierter Inertgasstrom in den Motorraum eingelassen. Von dort strömt das Gas über Labyrinthdichtungen in den Vorvakuumbereich, vermischt sich mit dem Korrosivgas und wird zusammen mit diesem von der Vorpumpe abgepumpt. Bei Staubanfall können sich die Schaufeln mechanisch abnutzen, was im Reparaturfall zum Austausch des Rotors führen kann. Ebenso ist mit Ablagerungen in der Pumpe zu rechnen, die entsprechend kürzere Serviceintervalle zur Folge haben. Es ist besonders darauf zu achten, dass Ablagerungen in der Pumpe nicht mit Luftfeuchtigkeit zu aggressiven Stoffen reagieren. Deshalb sind die Pumpen nur mit trockenen Inertgasen zu belüften und im Servicefall mit abgeschlossenem Vor- und Hochvakuumflansch auszurüsten. Turbopumpen für diese Anwendungsfälle sind stets klassische Turbopumpen ohne Holweckstufe, da sich die engen Spalte und Pumpkanäle der Holweckstufe schnell mit Staubablagerungen zusetzen und zum Blockieren des Rotors führen würden.

2.8.3 Portfolioüberblick

Als führender Hersteller von Turbomolekularpumpen bietet Pfeiffer Vacuum mechanisch gelagerte und magnetisch gelagerte Baureihen an.

2.8.3.1 Mechanisch gelagerte Turbopumpen

Bei den mechanisch gelagerten Turbopumpen HiPace mit ölgeschmiertem Kugellager auf der Vorvakuumseite und Permanentmagnetlager auf der Hochvakuumseite unterscheidet man folgende Baureihen:

- ▶ Turbodragpumpen mit Holweckstufen HiPace mit Saugvermögen < 1.000 l/s mit ISO-K-Flanschen zur Hochvakuumzeugung für Standardanwendungen
- ▶ oder mit CF-Flanschen, ausheizbar, zur Ultrahochvakuumzeugung
- ▶ Klassische Turbopumpen HiPace mit Saugvermögen > 1.000 l/s mit ISO-K-Flanschen zur Hochvakuumzeugung für Standardanwendungen
- ▶ oder mit CF-Flanschen, ausheizbar, zur Ultrahochvakuumzeugung
- ▶ Klassische Turbopumpen HiPace C mit Beschichtung und Sperrgassystem für Korrosivgasanwendungen

Klassische Turbopumpen HiPace C mit Saugvermögen < 1.000 l/s mit Beschichtung und Sperrgassystem für Korrosivgasanwendungen sind auf Anfrage lieferbar.



Abb. 2.24: Standardturbopumpen HiPace™

In der folgenden Tabelle sind die Vor- und Nachteile von klassischen Turbopumpen und Turbodragpumpen aufgelistet.

Tabelle 2.14: Vergleich von Turbo- und Turbodragpumpen

Merkmal	Vorteil	Nachteil
Reine Turbestufen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Unempfindlich gegen Partikel, Staub oder Kondensate ▶ Hohe Gaslasten möglich ▶ Robust / hohe Flutraten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Geringere Kompressionswerte ▶ Geringere Vorvakuumverträglichkeit ▶ Größere Vorpumpe mit Basisdruck < 0,1 mbar erforderlich
Turbostufen und Dragstufen (Holweck)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Höhere Kompressionswerte ▶ Höhere Vorvakuumverträglichkeit ▶ Kleinere Vorpumpe mit Basisdruck > 1 mbar einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Empfindlich gegen Partikel, Staub oder Kondensate ▶ Geringere Gaslasten (enge Spalte)

2.8.3.2 Magnetisch gelagerte Turbopumpen

Die elektromagnetisch gelagerten Turbopumpen mit ihren hohen Saugvermögen über 1.500 l/s benötigen große Vorpumpen. Membranpumpen mit Basisdrücken über 1 mbar kommen nicht in Frage. Deshalb sind diese Turbopumpen nicht mit Holweckstufen ausgerüstet. Es gibt auch bei diesen Pumpen:

- ▶ Turbopumpen HiPace mit Saugvermögen > 2.000 l/s mit ISO-K-Flanschen zur Hochvakuumherzeugung für Standardanwendungen
- ▶ oder mit CF-Flanschen, ausheizbar, zur Ultrahochvakuumherzeugung
- ▶ Turbopumpen HiPace C mit Beschichtung und Sperrgassystem für Korrosivgasanwendungen


Abb. 2.25: Magnetgelagerte Turbopumpen HiPace™ MC

Die folgende Tabelle 2.15 enthält die Kenndaten der Standardpumpen. Alle anderen Baureihen sind Modifikationen dieser Standardmodelle und haben im Wesentlichen die gleichen Kenndaten.

Tabelle 2.15: Kenndaten HiPace™

Typenbezeichnung	Saugvermögen für N ₂	Kompressionsverhältnis N ₂	Einsatzbereiche /Anwendungsgebiete
HiPace™ 10	11,5 l/s	3,0 · 10 ⁷	Analytik, Lecksucher, Gasführungssysteme, Lampen- und Röhrenfertigung
HiPace™ 80 (DN 40)	35,0 l/s	> 1,0 · 10 ¹¹	Analytik, Forschung & Entwicklung, Beschichtung, Halbleiterfertigung
HiPace™ 80 (DN 63)	67,0 l/s	> 1,0 · 10 ¹¹	
HiPace™ 300	260,0 l/s	> 1,0 · 10 ¹¹	
HiPace™ 400	355,0 l/s	> 1,0 · 10 ¹¹	
HiPace™ 700	685,0 l/s	> 1,0 · 10 ¹¹	
HiPace™ 1200	1.250,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁸	Glasbeschichtung, Solarzellenfertigung, Oberflächenveredlung, CVD, PVD/Sputtern, Ionenimplantation, Plasmaphysik, Weltraumsimulation
HiPace™ 1500	1.450,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁸	
HiPace™ 1800	1.450,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁸	
HiPace™ 2300	1.900,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁸	
HiPace™ 2400 MC	2.100,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁹	Beschichtungsindustrie, Halbleiterfertigung, Forschung & Entwicklung
HiPace™ 3400 MC	2.950,0 l/s	> 1,0 · 10 ⁹	

Die Basisdrücke der Standardpumpen mit ISO-K-Flanschen sind: $p_b < 1 \cdot 10^{-7}$ mbar. Mit den Pumpen mit CF-Flanschen erreicht man nach Ausheizen Basisdrücke $p_b < 5 \cdot 10^{-10}$ mbar.

2.8.3.3 Bedienungs-, Anzeige- und Antriebsgeräte

Zum Betrieb der Turbopumpen stehen für unterschiedliche Anwendungen vielfältige Bedienungs-, Anzeige- und Antriebsgeräte zur Verfügung, die in Tabelle 2.16 aufgeführt sind.

Die im folgenden Text verwendete Nummerierung bezieht sich auf die Abbildung 2.26 (Zubehör für Turbopumpen).

Die Typen HiPace 10 bis 300 (1a) sind mit angebautelem Antriebsgerät TC 400 (1b) versehen. Sie benötigen als Versorgungsspannung 24 VDC. Zum Betrieb ab Netz stehen Einbaunetzteile TPS 110/111 bzw. 180/181 oder Einschubnetzteile DCU 110 bzw. DCU 180 (2a) mit Bedienungs- und Anzeigegerät DCU 002 zur Verfügung.

Die Typen HiPace 400 und 700 sind mit dem Antriebsgerät TC 400 ausgestattet. Das TC 400 wird, je nach angeschlossener Pumpe, wahlweise mit 24 oder 48 VDC betrieben.

Die Versorgungsspannung von 48 V kann aus dem Einbaunetzteil TPS 400 oder dem Einschubnetzteil DCU 400 entnommen werden. Die großen Pumpen HiPace 1200 bis 2300 werden vom angebautelem TC 1200 angetrieben, das direkt aus der Netzspannung gespeist wird. Alle Pumpen der Baugröße HiPace 10 bis 700 können auch ohne angebautes Antriebsgerät, z. B. für Umgebungen mit radioaktiver Strahlung, geliefert werden. Zum Antrieb dient dann das TCP 350 mit integriertem Netzteil sowie DCU 002 (2b) zur Bedienung.

Die magnetisch gelagerten Pumpen HiPace 2400 MC und HiPace 3400 MC werden vom angebauten Betriebsgerät TM 3000 angesteuert. Die benötigte Versorgungsspannung von 140 V kann aus dem Einschubnetzteil TPS 1400 entnommen werden. Alternativ steht das Anbaunetzteil OPS 900 (Onboard Power Supply), das unter die Grundplatte der Pumpe montiert wird, zur Verfügung.

An alle Antriebsgeräte kann man das DCU 002 (2b) zur Bedienung und zum Einstellen verschiedener Parameter an die Schnittstelle RS-485 anschließen. Ebenso ist das Kontroll- und Servicegerät HPU 001 anschließbar, mit dem auch Parametersätze gespeichert und in mehrere Pumpen eingegeben werden können. Mit einem USB-Konverter (5b) kann man auch einen PC (5a) an die Schnittstelle RS-485 anschließen und Programmier- sowie Schaltfunktionen ausführen oder auch Statusanzeigen übertragen.

Außerdem stehen Profibus-DP- und Device-Net-Konverter zur Verfügung, um die Pumpen in entsprechende Anlagensteuerungen einzubinden.

Die wichtigsten Schaltfunktionen können auch über einen Fernbedienungsstecker mithilfe von Schaltern erfolgen. Außerdem können einige Statusanzeigen über Relaisausgänge abgenommen werden.

Mit einem Wahlschalter kann man die Bedienung der Pumpe entweder über diesen Weg oder über die serielle Schnittstelle anwählen.

Tabelle 2.16: Antriebsgeräte und Netzteile

	Antriebsgeräte					Netzteile			Anzeigeräte	
	TC 110 24 V	TC 400 24/48 V	TC 1200 90-240 V	TM 3000 140 V	TCP 350 mit DCU 90-240 V	Einbaunetzteile TPS	Einschubnetzteile mit DCU	Anbaunetzteile OPS	Kontroll- und Servicegerät HPU 001	Bedienungs- und Anzeigerät DCU
HiPace™										
HiPace™ 10	●					●	●		●	●
HiPace™ 80	●				●	●	●		●	●
HiPace™ 300	●	●			●	●	●		●	●
HiPace™ 400		●			●	●	●		●	●
HiPace™ 700		●			●	●	●		●	●
HiPace™ 1200			●					+	●	●
HiPace™ 1500			●					+	●	●
HiPace™ 1800			●					+	●	●
HiPace™ 2300			●					+	●	●
HiPace™ 2400 MC				●		●		●	●	
HiPace™ 3400 MC				●		●		●	●	

● empfohlen
+ immer mit OPS
(Onboard Power Supply)

2.8.3.4 Zubehör



Abb. 2.26: Zubehör für Turbopumpen

Neben den oben beschriebenen elektrischen Betriebsgeräten stehen auch noch unterschiedliche Zubehöreile für besondere Einsatzzwecke zur Verfügung.

An einige Netzgeräte DCU kann man eine Vakuummessröhre TPR 280 anschließen und so Drücke an einer Vakuumanlage messen.

Mithilfe der Relaisbox „Vorpumpe“ (6) verwandelt sich das Netzteil DCU (2a) in eine Pumpstandsteuerung, mit der Turbopumpe (1a) und Vorpumpe gleichzeitig eingeschaltet werden können. Zur Pumpenkühlung können wahlweise eine Luftkühlung (4) oder bei hoher Gaslast eine Wasserkühlung (3) angebaut werden.

Ein elektrisches Flutventil (8) belüftet die Turbopumpe beim Unterschreiten einer bestimmten Drehzahl. Bei kurzzeitigem Stromausfall bleibt das Flutventil geschlossen und das Vakuum erhalten. Der Pumpstand startet sofort wieder bei Rückkehr der Netzspannung. Voraussetzung ist allerdings eine Vorpumpe mit Sicherheitsventil, das bei Stromausfall automatisch schließt.

Für UHV-Anwendungen kann eine Heizung (9) an die Pumpe angeschlossen werden, die nach Vorwahl und Erreichen einer bestimmten Drehzahl automatisch eingeschaltet und bei Drehzahlabfall ausgeschaltet wird.

Für Korrosivgaspumpen sind elektromagnetische Sperrgasventile (7b) mit angepassten Durchsätzen sowie Sperrgasdrosseln (7a) für Pumpen verschiedener Baugrößen lieferbar.

3 Vakuummessgeräte

Druck ist definiert als flächenbezogene Kraft: $p = F/A$ (Formel 1-3). Dabei ist F die Kraft und A die Fläche, auf die die Kraft wirkt. Die SI-Einheit des Druckes ist $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$. Weitere häufig verwendete Druckeinheiten sind: $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$ und $1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa}$. Wird der Druck über die Kraft gemessen, die auf eine Fläche ausgeübt wird, spricht man von einer von der Gasart unabhängigen Druckmessung.

Die Druckmessung über die Kraft findet bei Drücken unter 1 mbar ihre Grenzen, da die ausgeübten Kräfte zu klein werden. Man muss daher andere Verfahren anwenden. So nutzt man z. B. die Wärmeleitung des eingeschlossenen Gases aus, oder man ionisiert die Gasmoleküle und misst zwischen Elektroden fließende Ionenströme.

Für Kalibrierzwecke verwendet man Kugelreibungsvakuummeter SRG (Spinning Rotor Gauge) [11]. Man lagert im Vakuum eine Kugel magnetisch, versetzt diese in schnelle Drehung und schaltet dann den Antrieb ab. Aus der Abnahme der Drehfrequenz durch Gasreibung kann man den Druck für die vorhandene Gasart berechnen. Die Geräte messen im molekularen Strömungsbereich bis zu Drücken $p > 10^{-7} \text{ mbar}$. Kalibrierte Kugeln kann man als Transferstandard benutzen.

3.1 Grundlagen der Totaldruckmessung

In der Vakuumtechnik gibt es kein Messverfahren, das den gesamten Druckbereich abdeckt. Daher ist es notwendig, verschiedene Sensoren zu verwenden. Die Kriterien für die Auswahl eines Drucksensors richten sich nach den unterschiedlichen Rahmenbedingungen:

- ▶ Druckbereich, der detektiert werden soll
- ▶ Gaszusammensetzung: inert oder korrosiv
- ▶ Geforderte Genauigkeit und Wiederholbarkeit
- ▶ Umgebungsbedingungen wie z. B. Radioaktivität

3.1.1 Direkte, gasartunabhängige Druckmessung

Membran-Vakuummeter

Bei einem Membran-Vakuummeter wird der Druck entsprechend der Definition gemessen. Auf eine Membran mit einer definierten Fläche A wirkt der Druck p und lenkt die Membran proportional zum Druck aus. Ein Sensor misst die Auslenkung. Piezo-resistive oder kapazitive Sensoren nehmen das Drucksignal auf und wandeln es in ein elektrisches um.

Piezo-Membran-Vakuummeter

Eine einfache und sehr robuste Methode ist die Verwendung eines piezo-resistiven Aufnehmers. Den Aufbau zeigt Abbildung 3.1. Über einem gut evakuierten Volumen mit dem Referenzdruck p_0 ist eine Membran angeordnet, in die Dehnungsmesswiderstände eindiffundiert sind. Die gemessene Widerstandsänderung infolge der Membranauslenkung ist ein Maß für den Druck. Dieser Aufnehmer zeichnet sich durch seine Unempfindlichkeit gegen Gaseinbrüche und durch eine hohe Genauigkeit aus.

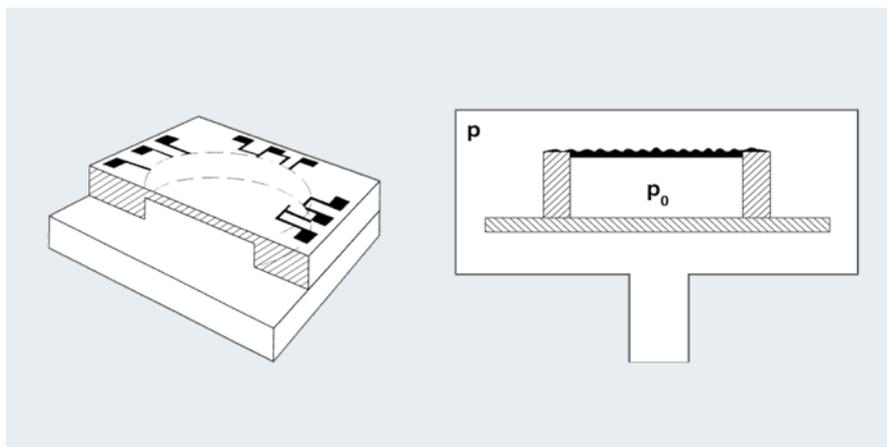


Abb. 3.1: Aufbau eines Membran-Vakuummeters

Quelle: Wutz, Handbuch der Vakuumtechnik, Wiesbaden 2006, S. 453

Kapazitives Membran-Vakuummeter

Bei einem Kapazitätsmembran-Vakuummeter (Abbildung 3.2) wird die Auslenkung der Membran als Kapazitätsänderung eines Plattenkondensators gemessen, der von der Membran und einer festen Gegenplatte in einem gut evakuierten Raum mit dem Druck p_0 gebildet wird. Die Membran besteht entweder aus Keramik mit aufgedampfter Metallschicht oder aus Edelstahl. Mit dieser Methode und unterschiedlich empfindlichen Membranen lässt sich über jeweils vier Dekaden messen. Die untere Messgrenze liegt bei 10^{-5} mbar.

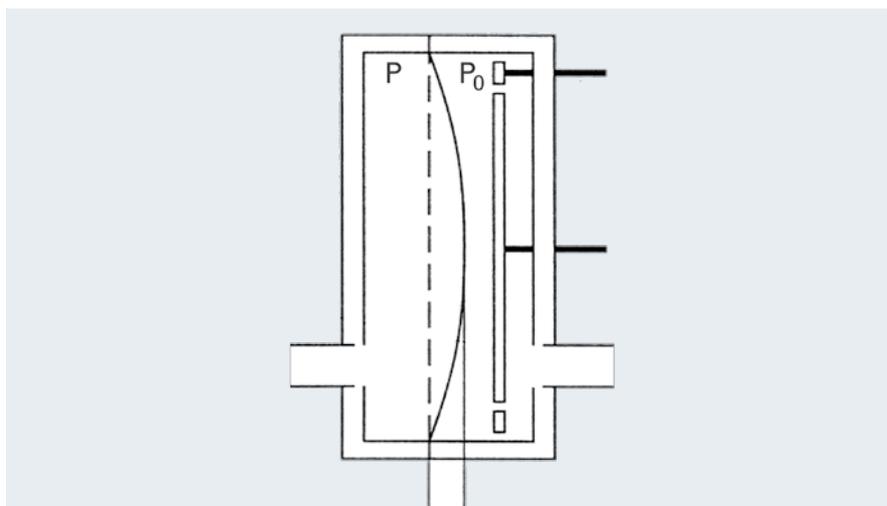


Abb. 3.2: Aufbau eines kapazitiven Membran-Vakuummeters

Quelle: Wutz, Handbuch der Vakuumtechnik, Wiesbaden 2006, S. 459

Die limitierenden Effekte sind:

- ▶ Durch Temperatureinfluss bedingte Abstandsänderung innerhalb des Druckaufnehmers
- ▶ Mit niedrigen Drücken kleiner werdende Kräfte auf die Membran

Der Temperatureinfluss lässt sich durch elektronische Kompensation einer bekannten Temperaturdrift oder durch eine eingebaute Heizung eliminieren, die den Sensor auf konstanter Temperatur hält. Durch Verwendung von keramischem Membranmaterial wird der Temperatureinfluss weiter minimiert.

3.1.2 Indirekte, gasartabhängige Druckmessung

Bei sehr niedrigen Drücken wird der Einfluss der Kraft auf eine Membran vernachlässigbar klein. Aus diesem Grund wird der Druck über die druckproportionale Teilchenzahldichte bestimmt. Für ein ideales Gas gilt die Zustandsgleichung: $p = n \cdot k \cdot T$ (Formel 1-5). Also ist der Druck bei gleicher Temperatur T der Teilchenzahldichte proportional. Für die in der Vakuumtechnik herrschenden Drücke ist diese Gleichung erfüllt. Es werden dabei verschiedene physikalische Effekte wie Wärmetransport, Ionisationsfähigkeit oder elektrische Leitfähigkeit gemessen. Diese Größen sind nicht nur vom Druck abhängig, sondern auch vom Molekulargewicht. Dies führt zu einer Druckmessung, die für verschieden schwere Gase unterschiedliche Ergebnisse produziert.

Pirani-(Wärmetransport-)Vakuummeter

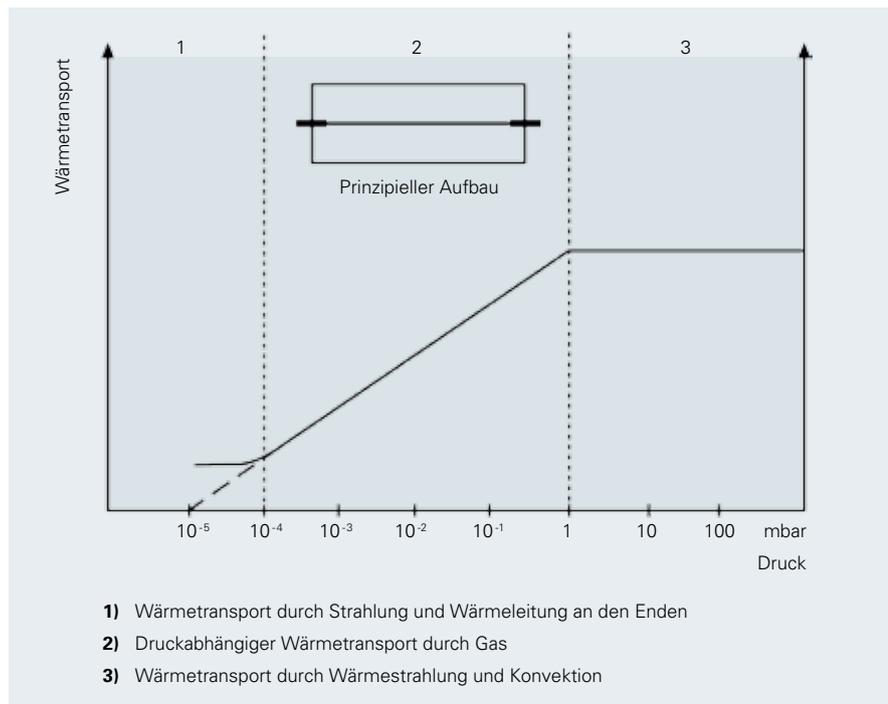


Abb. 3.3: Funktionsweise des Pirani-Vakuummeters

Quelle: Inficon Katalog 2000-2001, S. 82

Beim Pirani-Vakuummeter macht man sich die Wärmeleitfähigkeit von Gasen bei Drücken $p < 1$ mbar zunutze. Man heizt einen in einem Rohr konzentrisch ausgespannten Draht (meist Wolfram), durch Stromdurchgang elektrisch auf eine konstante Temperatur zwischen 110 °C und 130 °C auf. Durch das umgebende Gas wird Wärme an die Rohrwand abgeleitet. Der Wärmetransport ist im molekularen Strömungsbereich der Teilchenzahldichte und damit dem Druck proportional. Hält man die Temperatur des Drahtes konstant, so ist dessen Heizleistung druckabhängig. Sie hängt jedoch nicht linear vom Druck ab, da Wärmeleitung über die Aufhängung des Drahtes und Wärmestrahlung ebenfalls die Heizleistung beeinflussen.

Die limitierenden Effekte sind:

- ▶ Im Bereich von 1 mbar bis Atmosphärendruck (laminarer Strömungsbereich) ist die Wärmeleitung druckunabhängig
- ▶ Bei Drücken unter 10^{-4} mbar ist die Wärmeleitfähigkeit des Gases klein gegen den Wärmetransport über die Drahtenden und beeinflusst so die Heizleistung des Drahtes nicht mehr; deshalb liegt die Messgrenze etwa bei 10^{-4} mbar
- ▶ Wärmestrahlung überträgt ebenfalls einen Teil der Heizleistung auf die Rohrwand

Die Abbildung 3.4 zeigt die unterschiedlichen Kennlinien für verschiedene Gase zwischen 1 mbar und Atmosphärendruck. Zwar ist bei Stickstoff und Luft noch eine gute Linearität zu erkennen, für leichte (He) und schwere Gase (Ar) zeigen sich jedoch starke Abweichungen. Bei gasartabhängigen Messverfahren spricht man deshalb auch vom Stickstoffäquivalent, das angezeigt wird.

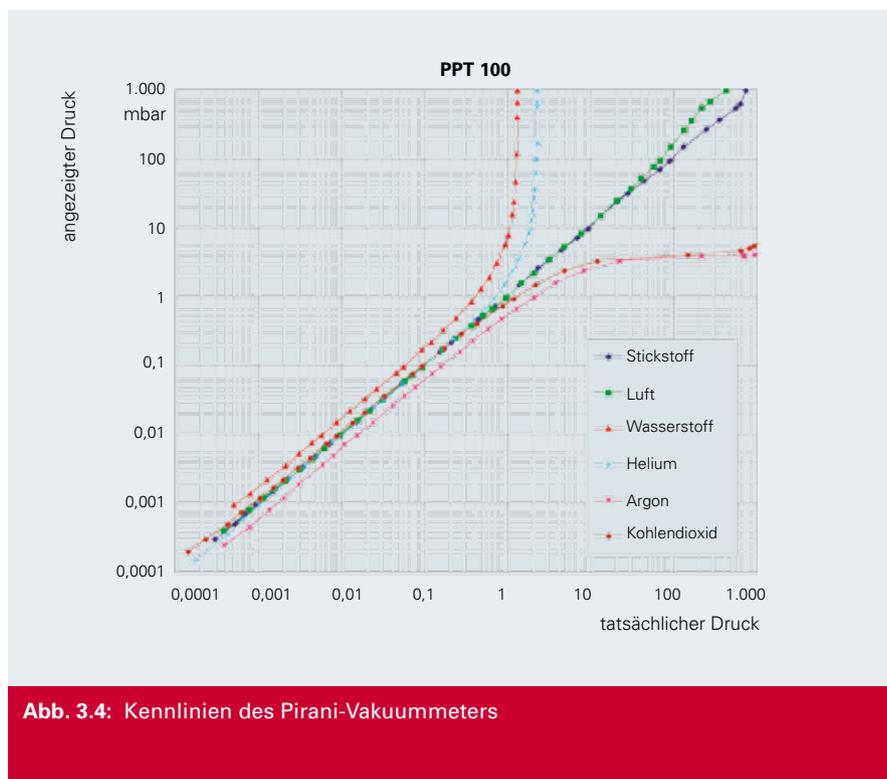


Abb. 3.4: Kennlinien des Pirani-Vakuummeters

Kalkkathoden-Ionisations-Vakuummeter

Kalkkathoden-Ionisations-Vakuummeter bestehen prinzipiell aus nur zwei Elektroden: Kathode und Anode, zwischen die über einen Vorwiderstand eine hohe Spannung angelegt wird. Die negativ geladenen Elektronen verlassen die Kathode durch die hohe Spannung und bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit von der Kathode in Richtung der Anode. Auf diesem Weg ionisieren sie neutrale Gasteilchen. Damit wird eine Gasentladung gezündet. Der gemessene Gasentladungsstrom (Abbildung 3.5) ist ein Maß für den Druck. Jedoch werden bei gradliniger Bewegung der Elektronen nur wenig Teilchen ionisiert, was zu einer geringen Empfindlichkeit und einem Abbruch der Gasentladung bei etwa 1 mbar führt. Ein Aufbau, der diesen Nachteil vermeidet, ist das invertierte Magnetron nach Hobson und Redhead [12]. Ein Metallstift (Anode) wird von einer rotationssymmetrischen Messkammer (Kathode) umschlossen (Abbildung 3.5). Außen auf die Messkammer ist ein axial magnetisierter zylindrischer Permanentmagnetring aufgesetzt, der im Inneren ein Magnetfeld erzeugt.

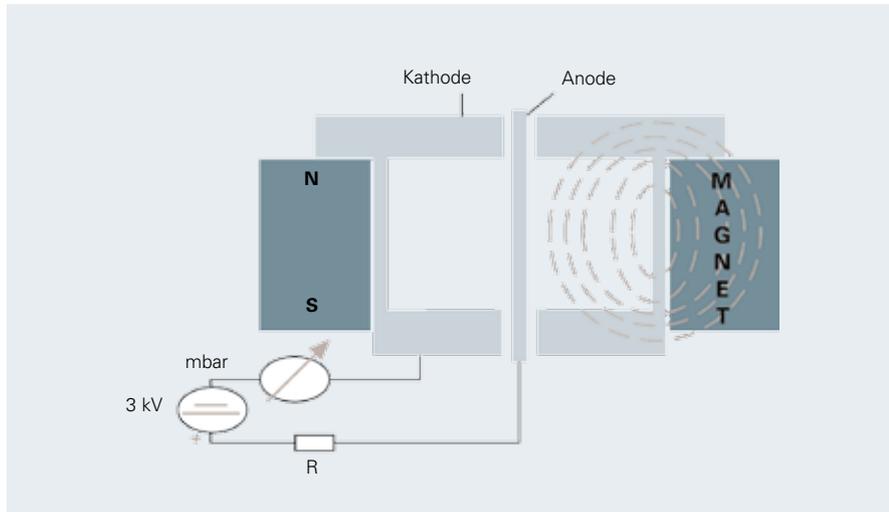


Abb. 3.5: Aufbau eines invertierenden Magnetrons

Durch das Magnetfeld bewegen sich die Elektronen auf Spiralbahnen (Abbildung 3.6). Die auf diese Weise verlängerten Wege der Elektronen erhöhen die Stoßwahrscheinlichkeit mit den Gasmolekülen und sorgen dafür, dass auch bei Drücken unter 1 mbar noch genügend Ionen erzeugt werden, um die Gasentladung aufrechtzuerhalten. Durch unterschiedliche Ionisationswahrscheinlichkeiten der Gase ist die Druckanzeige von der Gasart abhängig. So wird z. B. bei Helium ein niedrigerer Druck angezeigt als bei Luft.

Kalkkathoden-Vakuummeter können unter folgenden Bedingungen leicht verschmutzen:

- ▶ Wenn das Gerät bei Drücken $p > 10^{-1}$ mbar eingeschaltet wird
- ▶ Bei Anwendungen in Sputteranlagen wird oft Argon verwendet. Dies führt auch zur Absputterung der Kathode und kann zu Kurzschlüssen und damit zu Ausfällen der Messröhre führen
- ▶ Es werden auch Gase an den Flächen der Kathode gegettert. Damit tritt eine Pumpwirkung auf, die zu einer Verfälschung des Messsignals führt

Bei der Montage der Messröhre an eine Vakuumanlage muss das Magnetfeld beachtet werden, das empfindliche Apparaturen stören kann.

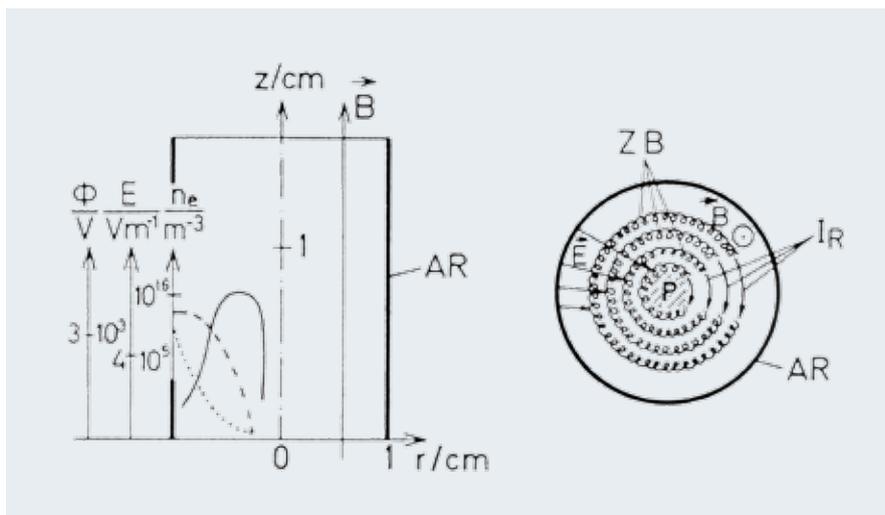


Abb. 3.6: Funktionsweise des invertierenden Magnetrons

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter

Anders als bei Kaltkathoden-Ionisations-Vakuummetern werden hier Elektronen mithilfe einer beheizten Kathode erzeugt. Abbildung 3.7 zeigt den Aufbau einer Messröhre nach Bayard-Alpert. In der Mitte der zylindrischen, gitterförmigen Anode ist ein dünner Draht angeordnet, der Auffänger für die Ionen. Zwischen Anode und Kathode legt man eine Spannung von etwa 100 V an. Dadurch werden alle emittierten Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Man misst im Anodenkreis den Emissionsstrom, der über die Heizleistung der Kathode eingestellt werden kann. Auf dem Weg zur Anode werden durch Elektronenstoß Gasmoleküle ionisiert, die auf den Kollektor treffen, der auf Kathodenpotenzial liegt.

Der gemessene Kollektorstrom ist ein Maß für den Druck. Da der Emissionsstrom dem Ionenstrom proportional ist, kann man über diesen die Empfindlichkeit der Messröhre einstellen.

Mit Bayard-Alpert Sensoren können Drücke mit guter Genauigkeit bis $1 \cdot 10^{-10}$ mbar gemessen werden. Messfehler sind bedingt durch die Pumpwirkung des Sensors sowie durch zwei limitierende Effekte:

- ▶ **Röntgenbremsstrahlung:** Durch Elektronen, die auf den Anodenkäfig treffen, wird Röntgenstrahlung emittiert, die zum Teil auf den Kollektor trifft. Durch diesen Röntgeneffekt werden vom Kollektor Photoelektronen emittiert, die zur Anode abfließen. Der resultierende Photoelektronenstrom erhöht den druckabhängigen Kollektorstrom und verfälscht diesen. Deshalb wählt man den Kollektordraht möglichst dünn, damit er nur wenig Röntgenstrahlung auffängt
- ▶ **EID-Ionen:** EID (Electron Impact Ion Desorption) bedeutet, dass durch Elektronen am Anodenkäfig angelagerte Gasteilchen desorbiert und ionisiert werden [13]. Diese Ionen erhöhen ebenfalls den druckproportionalen Ionenstrom.

Die Heißkathoden-Messröhre misst ebenfalls gasartabhängig. Die Messergebnisse sind aber wesentlich genauer als die des Kaltkathoden-Ionisations-Vakuummeters.

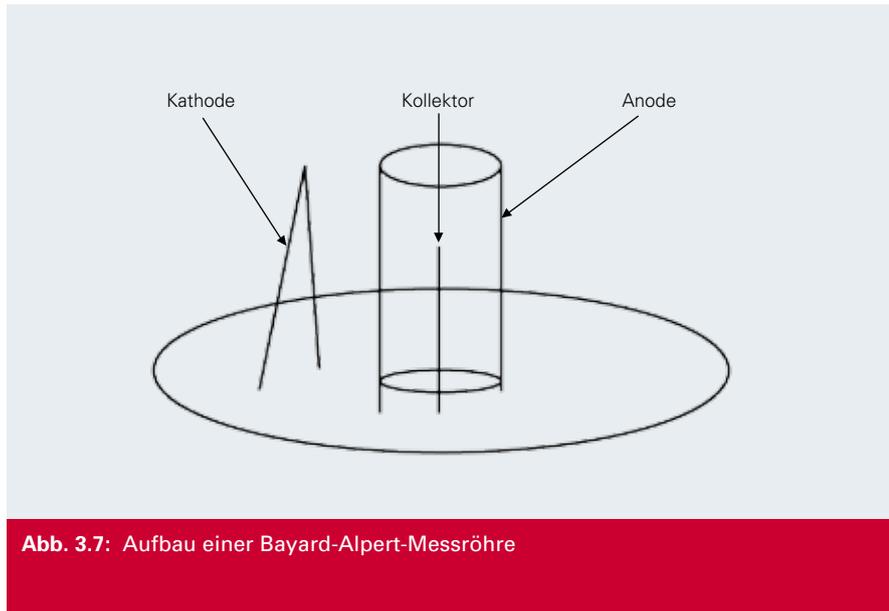


Abb. 3.7: Aufbau einer Bayard-Alpert-Messröhre

3.2 Anwendungshinweise

Bei Auswahl und Einbau der Messgeräte sind folgende Bedingungen zu beachten:

- ▶ Geeigneten Einbauort wählen wegen eventueller Druckgradienten im Rezipienten
- ▶ Eventuelle Pumpwirkung der Sensoren
- ▶ Sputterwirkung der Kaltkathodenröhren
- ▶ Starke Magnetfelder und elektrische Felder
- ▶ Bei UHV-Erzeugung Apparatur und Messröhren ausheizen
- ▶ Einschaltpunkte für Ionisationsmessröhren so legen, dass Verschmutzung verhindert wird

Bei Verschmutzung können Kaltkathoden-Messröhren leicht demontiert und gereinigt werden. Bayard-Alpert-Eintauchmesssysteme kann man ebenfalls reinigen und defekte Teile wie Heizfäden, Anodengitter und Auffänger ersetzen. Verschmutzte Anodengitter und Auffänger können durch Aufladungseffekte zu starken Messfehlern führen.

3.2.1 Messbereiche

Im Druckbereich von 1.000 bis 1 mbar benutzt man Zeigervakuummeter, die jedoch nur eine beschränkte Genauigkeit aufweisen und nur direkt am Einbauort abgelesen werden können. Für genauere Messungen verwendet man Membran-Vakuummeter.

Zwischen 1 und 10^{-4} mbar werden Pirani-Wärmeleitungs-Vakuummeter eingesetzt. Man kann schon bei Drücken $p < 10^{-2}$ mbar spezielle „Hochdruck“-Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter anwenden.

Bei Drücken unter 10^{-3} mbar verwendet man entweder Kaltkathoden-Ionisations-Vakuummeter oder bei sauberen Bedingungen und hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit Ionisations-Vakuummeter nach Bayard-Alpert. Sinnvoll ist immer eine Kombination von Messsensoren, die den gesamten genutzten Druckbereich abdeckt.

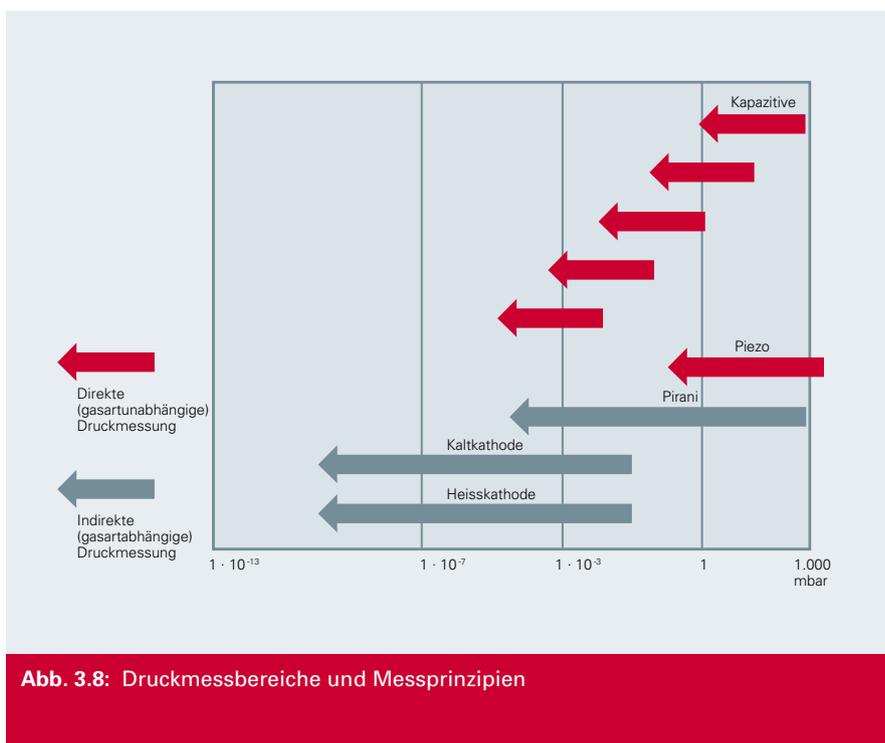


Abb. 3.8: Druckmessbereiche und Messprinzipien

Mit Membran- und Pirani-Vakuummetern erzeugt man Druckschaltpunkte, um Ionisations-Vakuummeter erst bei ausreichend niedrigem Druck einzuschalten und diese so vor Verschmutzung oder Durchbrennen der beheizten Kathode zu schützen. Es werden deshalb auch Kombinationssensoren angeboten, die weiter unten beschrieben werden.

3.2.2 Transmitter

Transmitter sind Messsensoren, die den gemessenen Druck als analoges Messsignal (0 – 10 V) oder als digitales Signal an einer genormten Schnittstelle ausgeben. Sie müssen mit einer Gleichspannung (z. B. 24 V) versorgt werden. Zu den Transmittern werden auch Versorgungsgeräte mit Messwertanzeige angeboten.

3.2.3 Messröhren

Messröhren werden über Kabel mit Steuergeräten verbunden, die die Energieversorgung, Messdatenauswertung und Anzeige übernehmen. Sie enthalten meistens auch analoge Spannungsausgänge.

Tabelle 3.1: Transmitter und Messröhren

Aufbau des Sensors	Bezeichnung
Vakuumsensor mit adaptierter Elektronik	Transmitter
Input: Speisespannung (z. B. 24 V)	
Output:	
analoges Signal (z. B. 0-10 V)	
oder	
digitales Signal (RS-232, -485, Profibus, DeviceNet)	
Vakuumsensor, der über ein Kabel mit der notwendigen Speise- und Auswerteelektronik verbunden ist	Messröhre

3.2.4 Kombisensoren

Kombisensoren vereinigen zwei Drucksensoren in einer Messzelle und bieten folgende Vorteile:

- ▶ Erweiterung des Messbereichs
- ▶ Nur ein Messwertausgang
- ▶ Schutz empfindlicher Hochvakuummessröhren vor Einschalten bei zu hohem Druck
- ▶ Nur ein Anschlussflansch erforderlich

Die verschiedenen Kombinationen werden bei den einzelnen Baureihen beschrieben.

3.3 Portfolioüberblick

3.3.1 Baureihen

Pfeiffer Vacuum bietet Transmitter als Einzel- oder Kombisensoren an aber auch als konventionelle Messröhren.

3.3.1.1 DigiLine™

Die Sensoren der DigiLine Baureihe werden mit 24-Volt-Gleichspannung versorgt. Die Messwerte werden über eine digitale Schnittstelle RS-232 oder RS-485 ausgegeben. In der Abbildung 3.9 sind die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

Mit dem Versorgungsgerät DPG 101 können einzelne Transmitter betrieben und deren Messwerte angezeigt werden. Das DPG 109 kann bis zu neun Transmitter versorgen. Transmittersignale können auch direkt in einem PC oder einer SPS mithilfe der Software DokuStar Plus dargestellt und verarbeitet werden.

Mithilfe von Konvertern wird das RS-485-Signal in ein Feldbussignal (Profibus-DP oder DeviceNet) umgewandelt und kann so mit einer Feldbussteuerung, die eine besonders einfache und sparsame Verkabelung ermöglicht, in Anlagensteuerungen genutzt werden.

Tabelle 3.2: Auswahltabelle Drucksensoren

	Messbereich			Applikation					
		max. (mbar)	min. (mbar)	Vakuuöfen	Sputtern	Verdampferkammern	Reaktive Prozesse	Schleusen	Beschleuniger
● empfohlen ▲ möglich									
Transmitter / Messröhren									
DigiLine™									
Digital Piezo Transmitter	CPT 100	2.000	1	▲	▲	▲	▲	▲	
Digital Pirani Transmitter	PPT 100	1.000	1 · 10 ⁻⁴	●	▲	●	▲	●	
Digital Piezo/Pirani Transmitter	RPT 100	1.200	1 · 10 ⁻⁴	●	▲	●	▲	●	
Digital Pirani/Kaltkathode Transmitter	MPT 100	1.000	5 · 10 ⁻⁹	●	●	●	●	▲	▲
Digital Pirani/Bayard-Alpert Transmitter	HPT 100	1.000	1 · 10 ⁻⁹	▲	●				
ActiveLine									
Active Piezo Transmitter	APR 250	1.100	1 · 10 ⁻¹	▲	▲	▲	▲	▲	
	APR 260	1.100	1 · 10 ⁻¹	▲	▲	▲	▲	▲	
	APR 262	2.200	2 · 10 ⁻¹	▲	▲	▲	▲	▲	
	APR 265	5.500	0,5	▲	▲	▲	▲	▲	
	APR 266	11.000	1	▲	▲	▲	▲	▲	
	APR 267	55.000	5	▲	▲	▲	▲	▲	
Active Kapazitiv Transmitter Temperaturkompensiert	CMR 361	1.100	1 · 10 ⁻¹	▲	●	●	●		
	CMR 362	110	1 · 10 ⁻²	▲	●	●	●		
	CMR 363	11	1 · 10 ⁻³	▲	●	●	●		
	CMR 364	1,1	1 · 10 ⁻⁴	▲	●	●	●		
	CMR 365	0,11	1 · 10 ⁻⁵	▲	●	●	●		
Temperaturgeregelt	CMR 271	1.100	1 · 10 ⁻¹	▲	●	●	●		
	CMR 272	110	1 · 10 ⁻²	▲	●	●	●		
	CMR 273	11	1 · 10 ⁻³	▲	●	●	●		
	CMR 274	1,1	1 · 10 ⁻⁴	▲	●	●	●		
	CMR 275	0,11	1 · 10 ⁻⁵	▲	●	●	●		
Active Pirani Transmitter	TPR 280	1.000	5 · 10 ⁻⁴	●	▲	▲		▲	
	TPR 281	1.000	5 · 10 ⁻⁴	●	▲	▲	▲	▲	
Active Pirani/Kapazitiv Transmitter	PCR 260	1.500	5 · 10 ⁻⁴	●	▲	▲		●	
Active Kaltkathode Transmitter	IKR 251	0,01	2 · 10 ⁻⁹	▲	▲	●	▲		
	IKR 261	0,01	2 · 10 ⁻⁹	▲	▲	●	▲		
	IKR 270	0,01	5 · 10 ⁻¹¹	▲	▲	●	▲		
Active Pirani/Kaltkathode Transmitter	PKR 251	1.000	5 · 10 ⁻⁹	▲	▲	▲	▲		
	PKR 261	1.000	5 · 10 ⁻⁹	▲	▲	▲	▲		
Active Heißkathode Transmitter	IMR 265	1.000	2 · 10 ⁻⁶	▲	●	▲			
Active Pirani/Bayard-Alpert Transmitter	PBR 260	1.000	5 · 10 ⁻¹⁰	▲	▲	▲	▲		
ModulLine									
Pirani Messröhre	TPR 010	1.000	8 · 10 ⁻⁴	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	TPR 017	1.000	8 · 10 ⁻⁴	▲	▲	▲	▲	▲	●
	TPR 018	1.000	8 · 10 ⁻⁴	▲	▲	▲	●	▲	●
Kaltkathode Messröhre	IKR 050	5 · 10 ⁻³	2 · 10 ⁻⁹	▲	▲	●	▲		●
	IKR 060	5 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻¹⁰	▲	▲	●	▲		●
	IKR 070	5 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻¹¹	▲	▲	●	▲		●

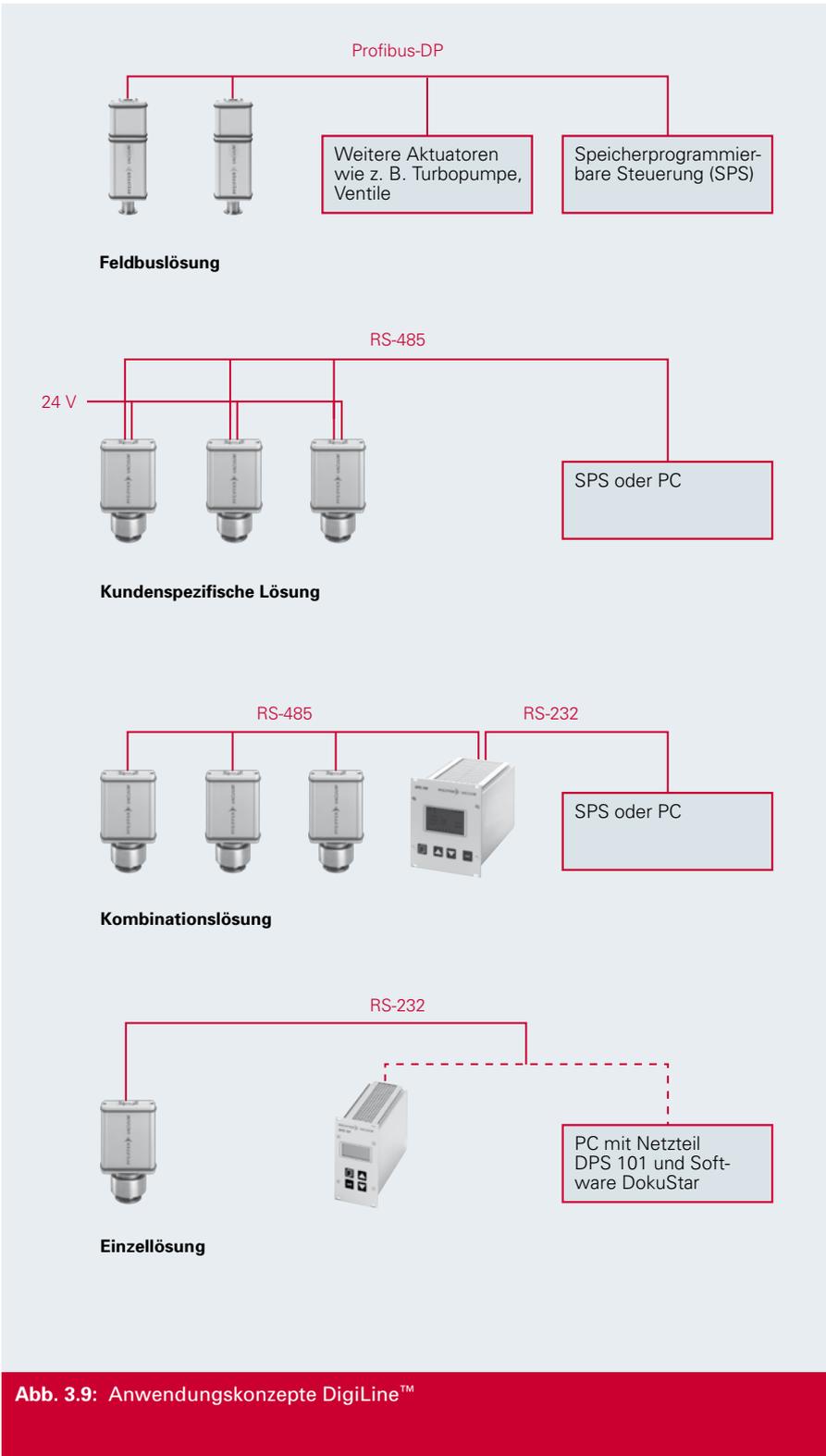


Abb. 3.9: Anwendungskonzepte DigiLine™

Die DigiLine Sensoren bieten folgende Vorteile:

- ▶ Komponenten frei kombinierbar
- ▶ Messwerte werden direkt übertragen, keine Kennlinienkorrektur erforderlich
- ▶ Sichere Datenübertragung durch digitale Signale
- ▶ Serielle Schnittstelle RS-232/-485 umschaltbar
- ▶ Daten mit Software DokuStar Plus direkt im PC auswertbar
- ▶ Mit Feldbuskonverter in Anlagensteuerung integrierbar
- ▶ Einfache Kalibrierung
- ▶ Für den Industrieinsatz geeignet

Transmitter mit Einzelsensoren gibt es als **Piezo-Membran-System CPT 100** (2.000 – 1 mbar) und als **Pirani-System PPT 100** (1.000 – 10^{-4} mbar).

Folgende Kombisensoren sind in der DigiLine Baureihe verfügbar:

- ▶ **Piezo-Pirani-Kombination RPT 100.** Bedingt durch die Druckunabhängigkeit des Wärmeleitungseffektes beim Pirani-Vakuummeter wird bei Drücken $p > 1$ mbar mit einem Membran-Vakuummeter gemessen. So erhält man eine gute Genauigkeit im gesamten Messbereich von 1.200 bis $1 \cdot 10^{-4}$ mbar und kann damit Prozesse steuern.
- ▶ **Pirani-Kaltkathoden-Kombination MPT 100.** Diese Kombination deckt den Druckbereich 1.000 bis $5 \cdot 10^{-9}$ mbar ab. Über den mit dem Pirani-Sensor gemessenen Druck wird die Gasentladung des Kaltkathodenmessensors gestartet. Mithilfe dieses Verfahrens wird versehentliches Einschalten der Kaltkathode bei zu hohem Druck und damit Verschmutzung vermieden.
- ▶ **Pirani-Bayard-Alpert-Kombination HPT 100.** Es wird ein Druckbereich von 1.000 bis $5 \cdot 10^{-10}$ mbar abgedeckt. Die Drucküberwachung des Pirani-Sensors schützt die Heißkathoden-Messröhre vor Betrieb bei zu hohem Druck und verhindert ein Durchbrennen der Heißkathode. Damit werden sehr lange Standzeiten der Kathode erreicht.

3.3.1.2 ActiveLine

Die Familie der ActiveLine umfasst drei Steuergeräte und acht Transmitter.

Die Piezo-Transmitter APR decken mit sechs Typen fünf Messbereiche von 55 bar bis 0,1 mbar ab.

Die kapazitiven Membran-Transmitter CMR gibt es sowohl als temperaturkompensierte als auch als temperaturgeregelte Variante in jeweils vier bzw. fünf Messbereichen von 1.100 bis 10^{-5} mbar. Mit den verschiedenen dicken Membranen ergeben sich folgende Abstufungen:

- ▶ 1.100 bis 10^{-1} mbar
- ▶ 110 bis 10^{-2} mbar
- ▶ 11 bis 10^{-3} mbar
- ▶ 1,1 bis 10^{-4} mbar
- ▶ 0,11 bis 10^{-5} mbar

Diese kapazitiven Membran-Vakuummeter von Pfeiffer Vacuum mit Keramiktechnologie haben sich in vielen, auch korrosiven Anwendungen bewährt.

Im Sensor des Heißkathoden-Transmitters IMR 265 sind die Elektroden (Anode, Kathode, Kollektor) mit sehr kleinen Abständen zueinander aufgebaut. So hat man schon bei Drücken $p < 10^{-2}$ mbar Molekularströmung und kann dort Ionenströme messen. Ein weiterer Vorteil liegt in der im Vergleich zum Bayard-Alpert-Aufbau geringeren Verschmutzungsempfindlichkeit.

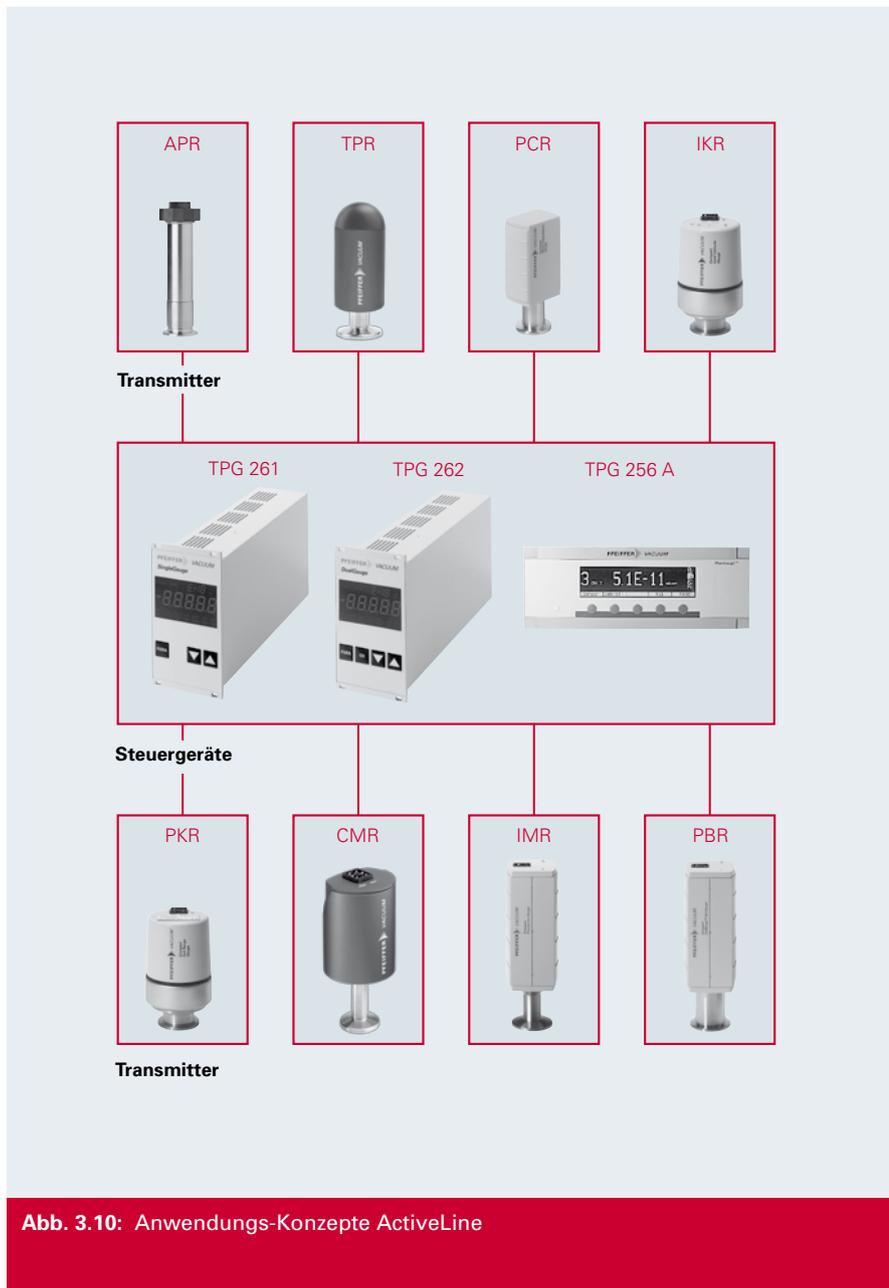


Abb. 3.10: Anwendungs-Konzepte ActiveLine

Außerdem gibt es noch zwei Pirani-Transmitter TPR und drei Kaltkathoden-Transmitter IKR mit Messbereichen von 0,01 bis $5 \cdot 10^{-11}$ mbar.

Die Pirani-Messröhren TPR 280 kann auch an Pumpstandsteuergeräte DCU von Turbopumpständen angeschlossen werden und ermöglichen so eine Druckanzeige ohne zusätzlichen Aufwand.

Folgende Kombisensoren stehen zur Verfügung:

- ▶ **Kapazitiv-Membran-Pirani Kombitransmitter PCR 260** mit einem Messbereich von 1.500 bis $5 \cdot 10^{-4}$ mbar
- ▶ **Pirani-Kaltkathoden-Kombitransmitter PKR 251 und 261** mit einem Messbereich von 1.000 bis $5 \cdot 10^{-9}$ mbar
- ▶ **Pirani-Bayard-Alpert-Kombitransmitter PBR 260** mit einem Messbereich von 1.000 bis $5 \cdot 10^{-10}$ mbar. Die Transmitter der ActiveLine bieten folgende Vorteile:
 - ▶ Es gibt drei Steuergeräte für ein, zwei oder sechs Transmitter
 - ▶ Jeder Transmitter kann mit jedem Steuergerät betrieben werden
 - ▶ Einheitliche Verbindungskabel

3.3.1.3 ModulLine

Die ModulLine Baureihe umfasst drei Pirani-Messröhren TPR mit einem Messbereich von 1.000 bis $8 \cdot 10^{-4}$ mbar und drei Kaltkathoden-Messröhren IKR mit einem Messbereich von $5 \cdot 10^{-3}$ bis 10^{-11} mbar. Da die Messröhren keine Elektronik enthalten, sind sie zum Einsatz an Orten mit hoher Strahlung geeignet.

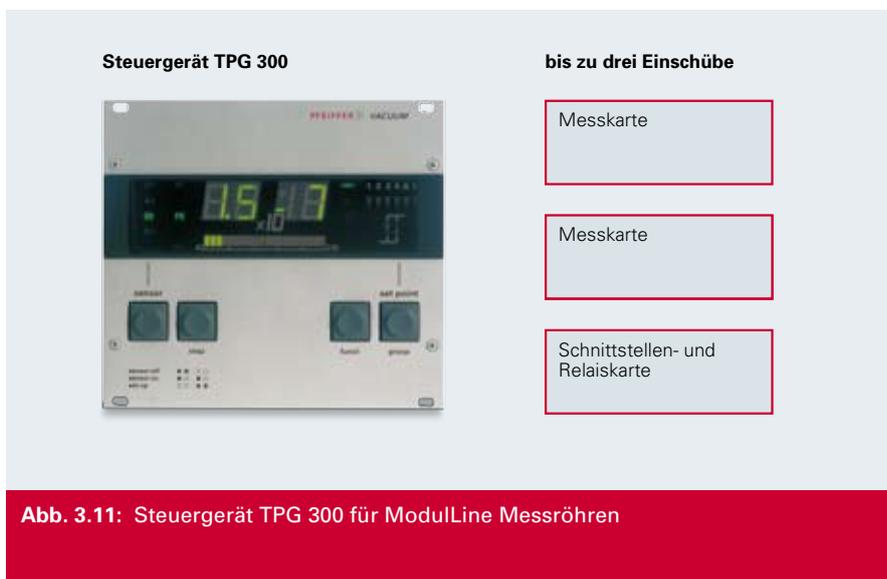


Abb. 3.11: Steuergerät TPG 300 für ModulLine Messröhren

Als Steuergerät dient das TPG 300 mit folgenden Merkmalen:

- ▶ Zwei Messkarten können eingesteckt werden und zusätzlich eine RS-232/-485-Schnittstellenkarte mit Relaisausgängen
- ▶ Anschluss von bis zu vier Messröhren
- ▶ Feldbusanbindung möglich

4 Massenspektrometer und Restgasanalyse

4.1 Einleitung, Funktionsprinzip

Die Massenspektrometrie ist heutzutage eines der meistverbreiteten Analyseverfahren. Ein Massenspektrometer analysiert die Zusammensetzung chemischer Substanzen mithilfe einer Partialdruckmessung.

Masse und Ladung

- ▶ Totaldruck ist die Summe aller Partialdrücke eines gegebenen Gasgemisches
- ▶ Zur Ermittlung des Partialdruckes einer bestimmten Gaskomponente muss diese aus dem Gemisch isoliert gemessen werden
- ▶ Eine vorherige Trennung des Gemisches ist notwendig
- ▶ Dies geschieht entsprechend dem Verhältnis von Masse zu Ladung: m/e

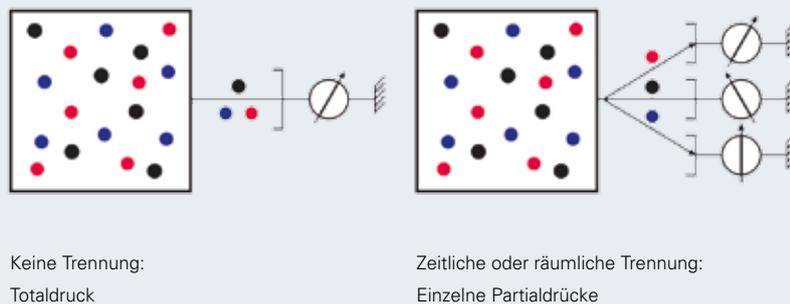


Abb. 4.1: Totaldruck- und Partialdruckmessung

Quelle: Pupp / Hartmann, *Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen*, Hanser Verlag

Typische Analysen werden im Bereich Forschung & Entwicklung und bei der Herstellung von Produkten des täglichen Lebens durchgeführt:

- ▶ Analyse von Produkten der chemischen Industrie
- ▶ Entwicklung von Medikamenten
- ▶ Dopingkontrollen
- ▶ Qualitätssicherung von Lebensmitteln
- ▶ Überwachung von Produktionsprozessen bei der Halbleiterherstellung
- ▶ Isotopenanalyse

In ein Massenspektrometer werden gasförmige oder flüssige Substanzen, die im Vakuum verdampfen, eingelassen. Das Gas wird durch partielles Abpumpen in einer Vakuumkammer auf einen niedrigen Druck (molekularer Strömungsbereich) verdünnt und durch Elektronenbeschuss ionisiert. Die so erzeugten Ionen werden in ein Massenfilter eingeleitet und nach dem Verhältnis Ladung zu Masse getrennt.

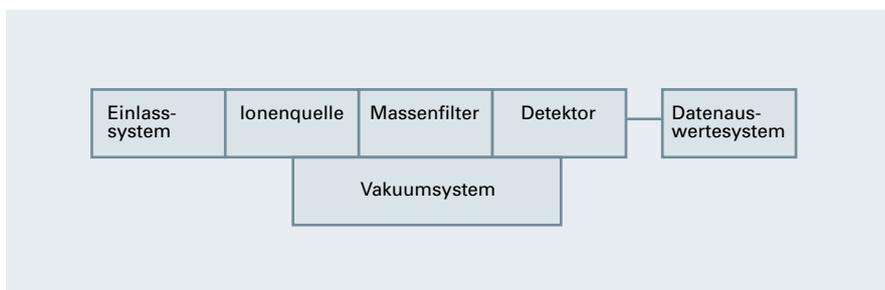


Abb. 4.2: Komponenten eines Massenspektrometers

Abbildung 4.2 stellt den typischen Aufbau eines Massenspektrometersystems dar:

- ▶ Durch das **Einlasssystem** werden die zu analysierenden Substanzen, z. B. über eine Kapillare oder ein Dosierventil, in eine Vakuumkammer eingelassen und
- ▶ mit dem **Vakuumsystem** teilweise bis auf den Arbeitsdruck des Systems abgepumpt.

Der eigentliche Analysator befindet sich im Vakuum und besteht aus folgenden Komponenten:

- ▶ Die **Ionenquelle** ionisiert neutrale Gasteilchen, die dann
- ▶ im **Massenfilter** nach dem Masse-Ladungs-Verhältnis m/e sortiert werden
- ▶ Mithilfe eines Faraday-**Detektors** oder eines Sekundärelektronenvervielfachers (SEM) wird der Ionenstrom gemessen, nachdem die Ionen das Trennsystem verlassen haben. Der gemessene Strom ist ein Maß für den Partialdruck der jeweiligen Gasteilchen oder von eventuell in der Ionenquelle erzeugten Bruchstücken
- ▶ Ein **Datenauswertesystem** verarbeitet die mithilfe des Detektors gemessenen Ionenströme und stellt sie in verschiedenen Formen dar. Softwareprogramme zur Datenauswertung sind heute in der Lage, den Anwender bei der Interpretation von Massenspektren zu unterstützen

Massenspektrometer unterscheiden sich durch eine Vielzahl von Varianten. Der Hauptunterschied liegt in den Trennsystemen. Die folgenden vier Typen von Massenfiltern sind heute verbreitet:

- ▶ **Sektorfeldgeräte** nutzen die Ablenkwirkung eines Magnetfeldes auf bewegte Ladungsträger
- ▶ Beim **Flugzeitmassenspektrometer** (TOF = Time Of Flight) wird die unterschiedliche Geschwindigkeit der Teilchen bei gleicher Energie zur Trennung genutzt
- ▶ Bei **Ionenfallen** werden die Flugbahnen der Ionen durch ein Hochfrequenzfeld beeinflusst.
- ▶ Bei **Quadrupolmassenspektrometern** wird die Resonanz bewegter Ionen in einem Hochfrequenzfeld ausgenutzt (ähnlich wie bei Ionenfallen)

Wir wollen uns im Folgenden auf die Sektorfeld- und Quadrupolmassenspektrometer beschränken, da diese in der Vakuumtechnik am meisten genutzt werden.

4.1.1 Sektorfeldmassenspektrometer

Sektorfeldmassenspektrometer werden wegen ihrer einfachen und robusten Bauart für Helium-Lecksucher verwendet, bei denen an die Auflösung nur geringe Anforderungen gestellt werden.

Die Funktionsweise des Sektorfeldmassenspektrometers ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

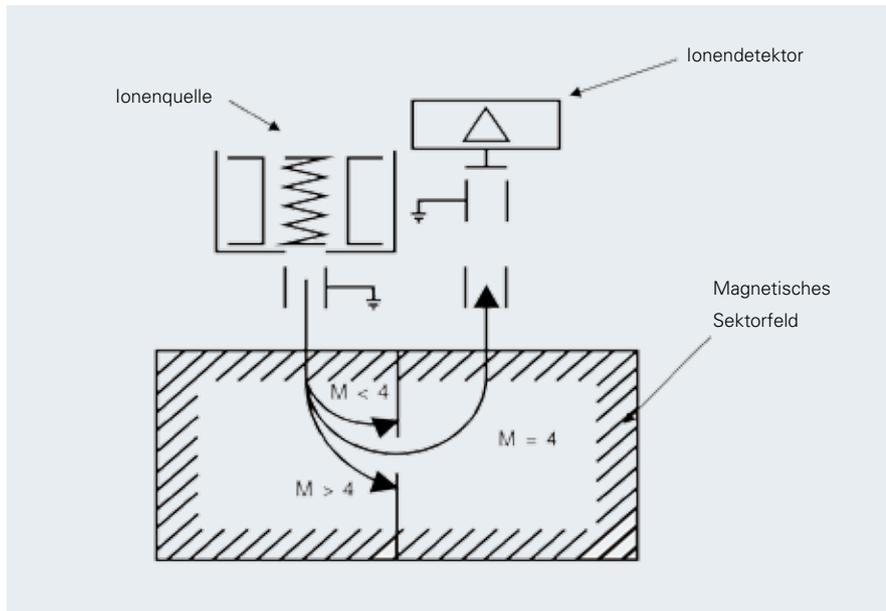


Abb. 4.3: Funktion des Sektorfeldmassenspektrometers

Neutrale Gasteilchen werden in einer Ionenquelle durch Elektronenbeschuss ionisiert. Die so erzeugten Ionen werden mithilfe einer elektrischen Spannung in das magnetische Sektorfeld hinein beschleunigt. Das Magnetfeld ist im Bereich der Flugbahnen der Ionen homogen und senkrecht zur Bildebene gerichtet. Heliumionen mit der Masse 4 amu gelangen durch einen Schlitz zum Detektor. Alle anderen Teilchen können den Schlitz nicht passieren und werden wieder neutralisiert. Der vom Detektor gemessene Ionenstrom für Helium ist proportional zum Heliumpartialdruck.

4.1.2 Quadrupolmassenspektrometer QMS

4.1.2.1 Quadrupolmassenfilter

Vier parallele, in einem Quadrat angeordnete, Stäbe bilden das Filtersystem eines Quadrupolmassenspektrometers. Je zwei gegenüberliegende Stäbe, in Abbildung 4.4 mit (+) oder (-) gekennzeichnet sind verbunden. Zwischen beiden Stabpaaren ist eine Spannung

Formel 4-1
Quadrupol-
Ablenkspannung

$$U_1 = U + V \cdot \cos \omega t$$

angelegt.

Es soll hier nur eine phänomenologische Kurzbeschreibung der Funktionsweise gegeben werden. Für eine ausführliche Darstellung wird auf die Literatur [14, 15, 16] verwiesen.

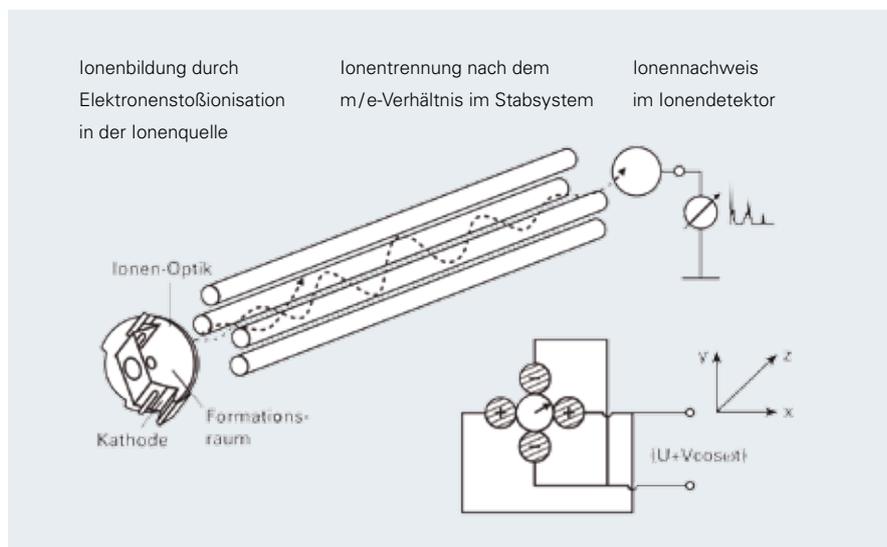


Abb. 4.4: Prinzip des Quadrupolmassenspektrometers

Ideale Quadrupolfelder benötigen Stäbe mit hyperbolischem Profil. In der Praxis werden jedoch runde Stäbe verwendet, bei denen der Stabradius gleich dem 1,144-fachen des Feldradius r_0 ist. Zwischen den Stäben bildet sich ein elektrisches Quadrupolfeld aus. Man schießt Ionen verschiedener Massen mit etwa gleicher Energie axial in das Stabsystem ein, durch das sie sich mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit hindurch bewegen. Das angelegte Quadrupolfeld lenkt die Ionen in X- und Y-Richtung ab, sodass sie schraubenförmige Bahnen durch das Massenfilter beschreiben. Zur Lösung der Bewegungsgleichungen führt man die dimensionslosen Variablen.

Formel 4-2
Stabilitätsparameter a

$$a = \frac{8 \cdot e \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

und

Formel 4-3
Stabilitätsparameter q

$$q = \frac{4 \cdot e \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

ein und erhält die Mathieu'schen Differenzialgleichungen. Deren Lösungen ergeben den stabilen Bereich mit Schwingungsamplituden $< r_0$ unter dem Dreieck der beiden Grenzkurven in Abbildung 4.5. Für die Spitze des Dreiecks gelten die Werte: $a_p = 0,23699$ und $q_p = 0,706$. Alle Lösungen außerhalb führen zu größer werdenden Schwingungsamplituden und damit zur Neutralisation der Ionen an den Stäben des Quadrupolfilters.

Dividiert man beide Gleichungen durcheinander, so erhält man: $\frac{a}{q} = 2 \frac{U}{V}$

Das ist die Steigung der sogenannten Arbeitsgeraden des Massenfilters.

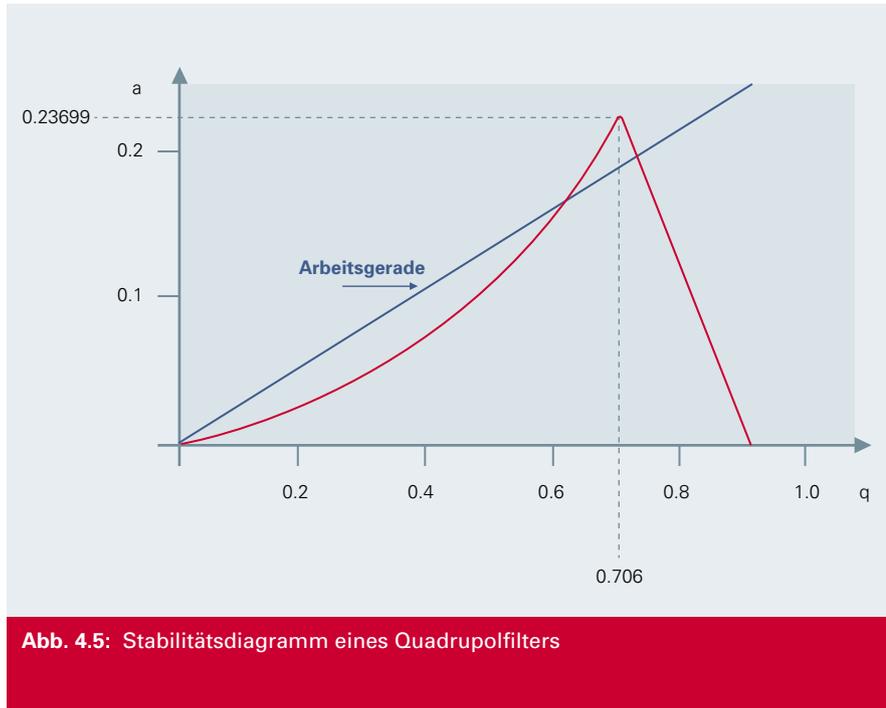


Abb. 4.5: Stabilitätsdiagramm eines Quadrupolfilters

Man ersieht aus Abbildung 4.5:

- ▶ Alle Ionen, deren Parameter a und q in das Dreieck oberhalb der Arbeitsgeraden fallen, erreichen den Detektor.
- ▶ Nur für Spannungsverhältnisse $\frac{U}{V} = \frac{a_p}{2 \cdot q_p} < 0,1678$ erreichen die Ionen den Detektor.

Führt man das Verhältnis der atomaren Masseinheit $1 \text{ amu} = 1,66055 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ zur Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$ $\frac{m_{\text{amu}}}{e} = 1,0365 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}}$ ein und multipliziert dies mit der dimensionslosen Massenzahl M des entsprechenden Ions, so erhält man für die Spitze des Stabilitätsdreiecks die folgenden Bedingungen für U und V :

Formel 4-4
Stabilitätsbedingung U

$$U = 1,2122 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

und

Formel 4-5
Stabilitätsbedingung V

$$V = 7,2226 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Bei abgeschalteter Gleichspannung $U = 0$ sind alle Bahnen der Ionen mit $q < 0,905$ stabil, das sind nach Formel 4-5: alle Massen mit

Formel 4-6
Hochpassbedingung

$$M > \frac{1,0801 \cdot 10^7 \cdot V}{r_0^2 \cdot f^2} \cdot \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

Das Filter arbeitet also als Hochpass. Mit steigender HF-Amplitude (V) werden, von den leichten Massen her beginnend, immer schwerere Ionenarten instabil und damit ausgesondert. Man erhält in diesem Betriebsmodus ein integrales Spektrum.

Entscheidend für die Transmission von Ionen durch das Filter sind die Einschussbedingungen: Ionen parallel zum Stabsystem müssen innerhalb eines Durchmessers:

Formel 4-7
Einschussblende

$$D = \frac{1}{2} \cdot r_0 \cdot \frac{M}{\Delta M}$$

eingeschossen werden. Der maximale Einschusswinkel muss der Bedingung:

Formel 4-8
Einschusswinkel

$$\operatorname{tg} \psi < 11,85 \cdot \frac{r_0^2}{L^2}$$

genügen und die Energie sollte möglichst gleichmäßig sein. Durch die in 4.1.4.1 beschriebenen Vorteile der Pfeiffer Vacuum Ionenquellen wird eine hohe Transparenz und damit eine hohe Empfindlichkeit erreicht.

Damit die Amplituden der instabilen Ionen groß genug werden, um auf die Stäbe zu treffen wo sie neutralisiert werden, müssen diese eine Mindestanzahl von Schwingungen im Trennfeld ausführen. Für die maximale Beschleunigungsspannung in Z-Richtung gilt:

Formel 4-9
Maximale Beschleunigungsspannung U_{zmax}

$$U_{zmax} \approx 4,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot L^2 \cdot f^2 \cdot M \cdot \frac{\Delta M}{M}$$

Im praktischen Betrieb wird das Verhältnis U/V in Abhängigkeit von der Massenzahl so angesteuert, dass nicht das eigentliche Auflösungsvermögen $\Delta M/M$, sondern die Linienbreite ΔM konstant bleibt. Dies bedeutet eine Zunahme des Auflösungsvermögens proportional zur Massenzahl. Wegen Formel 4-5 (V proportional M) erzielt man beim Quadrupol im Gegensatz zum Sektorfeldmassenspektrometer eine lineare Massenskala.

Ein Punkt von wesentlicher Bedeutung für ein Quadrupolmassenspektrometer ist die erforderliche HF-Leistung. Bezeichnet man mit C die gesamte Kapazität des Systems und mit Q die Kreisgüte des Leistungskreises, so wächst die erforderliche HF-Leistung

Formel 4-10
HF-Leistung

$$N_{HF} \approx \frac{C}{Q} \cdot M^2 \cdot f^5 \cdot r_0^4$$

mit hohen Potenzen von f und r_0 an. Eine Vergrößerung des Feldradius r_0 verringert die auftretenden relativen mechanischen Toleranzen und führt so zu einem verbesserten Verhalten. Es ist im Grunde vorteilhaft, f_0 und r_0 so groß wie möglich zu wählen. Wegen der damit verbundenen Zunahme der HF-Leistung (Formel 4-10) sind dem jedoch Grenzen gesetzt. Eine Verlängerung des Stabsystems erlaubt zwar eine geringere Betriebsfrequenz, jedoch sollte auch die Baugröße eines Seriengerätes bestimmte Maße nicht überschreiten.

Der erforderliche Massenbereich und die gewünschte Auflösung legen die Abmessungen des Filters und die Wahl der Betriebsfrequenz fest. Gestuft nach den Anforderungen findet man Geräte mit 6, 8 und 16 mm Stabdurchmesser und entsprechend darauf abgestimmter Elektronik.

An dieser Stelle noch ein kurzer Exkurs zum Zusammenhang zwischen Auflösung und mechanischer Präzision. Betrachten wir ein Quadrupolmassenfilter, das in der Spitze des Stabilitätsdiagramms, also mit einer hohen Auflösung arbeitet.

Es gilt

$$U = 1,2122 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2 \quad (\text{Formel 4-4}) \text{ für die Gleichspannung und}$$

$$V = 7,2226 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2 \quad (\text{Formel 4-5}) \text{ für die Wechsellspannungsamplitude,}$$

wobei wir mit M die Masse des Ions, mit r_0 den Feldradius und mit f die Frequenz, mit der das Filter betrieben wird, bezeichnen. Wir machen die idealisierte Annahme, dass beide Spannungen U und V und auch die Frequenz f „beliebig präzise“ eingestellt und eingehalten werden.

Daraus folgt: $M = c_k \cdot \frac{1}{r_0^2}$ (c_k ist eine Konstante für die festgewählten Frequenz- und Spannungswerte) und nach Differenziation und Division durch M die Streuung des Filters verursacht durch r_0 :

Formel 4-11
Streuung

$$\frac{dM}{M} = \frac{-2 \cdot dr_0}{r_0}$$

Nehmen wir an, dass sich der Feldradius r_0 über die Länge des Massenfilters um $\Delta r_0 = 0,03$ mm ändert. Nun betrachten wir die Auswirkung dieser Änderung auf die Streuung $\Delta M/M$ bei zwei verschieden großen Massenfiltern. Für optimale Transmission muss gelten, dass die am Spektrometer eingestellte Auflösung (wir wählen: $\Delta M/M = 1/100$) größer ist als die durch die Schwankung von r_0 erzeugte Streuung:

$$\frac{\Delta M}{M} > \frac{-2 \cdot \Delta r_0}{r_0}.$$

Bei dem Filter (a) mit einem Feldradius von 3 mm ergibt sich $\Delta M/M = 0,02$, also ein Widerspruch, und für ein Filter (b) mit einem Feldradius von 12 mm $\Delta M/M = 0,005$, also eine Übereinstimmung mit der obigen Bedingung. Mit anderen Worten: Hat man bei beiden Filtern eine Auflösung von $\Delta M/M = 0,01$ eingestellt, so werden im Fall (a) die meisten Ionen das Filter nicht passieren können. Beim großen Filter (b) können alle Ionen das Filter passieren, da die eingestellte Auflösung größer ist als die Streuung.

Diese vereinfachte Fehlerrechnung berücksichtigt bei Weitem nicht alle Effekte, die zur Transmission beitragen, sie zeigt aber einige fundamentale Beziehungen:

- ▶ Der Feldradius muss, abhängig vom gewählten Massenbereich, über die gesamte Länge des Filters wesentlich besser als 1% eingehalten werden. Schwankungen im Feldradius führen zu Transmissionsverlusten
- ▶ Je größer die Abmessungen des Stabsystems gewählt werden, desto geringer ist der Einfluss der absoluten mechanischen Toleranzen

- ▶ Je höher der Massenbereich ist und man benachbarte Massen noch unterscheiden will, desto strenger werden die Anforderungen an die relative Genauigkeit des Massenfilters. In diesem einfachen Bild skaliert die geforderte relative Genauigkeit linear mit dem Massenbereich

Zusammenfassung

Das Quadrupolmassenfilter ist ein dynamisches Massenfilter für positive und negative Ionen. Die Massenskala ist linear mit der angelegten Amplitude der HF-Spannung. Die Massenauflösung lässt sich elektrisch durch das Verhältnis der Gleichspannung U zur HF-Spannungsamplitude V komfortabel einstellen. Wegen ihrer geringen Abmessungen und ihres geringen Gewichtes eignen sich Quadrupolmassenspektrometer sowohl zu reinen Restgasanalytoren, als auch, in einer qualitativ höherwertigen Ausführung, als Sensoren für die Gasanalyse.

4.1.2.2 Ionenquellen

Bevor Gase in einem Massenfilter analysiert werden können, muss man sie in einer Ionenquelle durch Elektronenbeschuss ionisieren (Abbildung 4.8).

Aus einer elektrisch beheizten Kathode (1) (Filament) treten Elektronen aus. Zwischen Anode (3) und Kathode wird eine Spannung angelegt, die die Elektronen beschleunigt. Die in den Formationsraum (4) zwischen Anode und Kathode eintretenden neutralen Gasteilchen werden durch Elektronenstoß ionisiert. Dabei werden einfach und mehrfach positive Ionen gebildet. Die Energie der Stoßelektronen hat sowohl auf die Anzahl als auch auf die Art der gebildeten Ionen einen starken Einfluss.

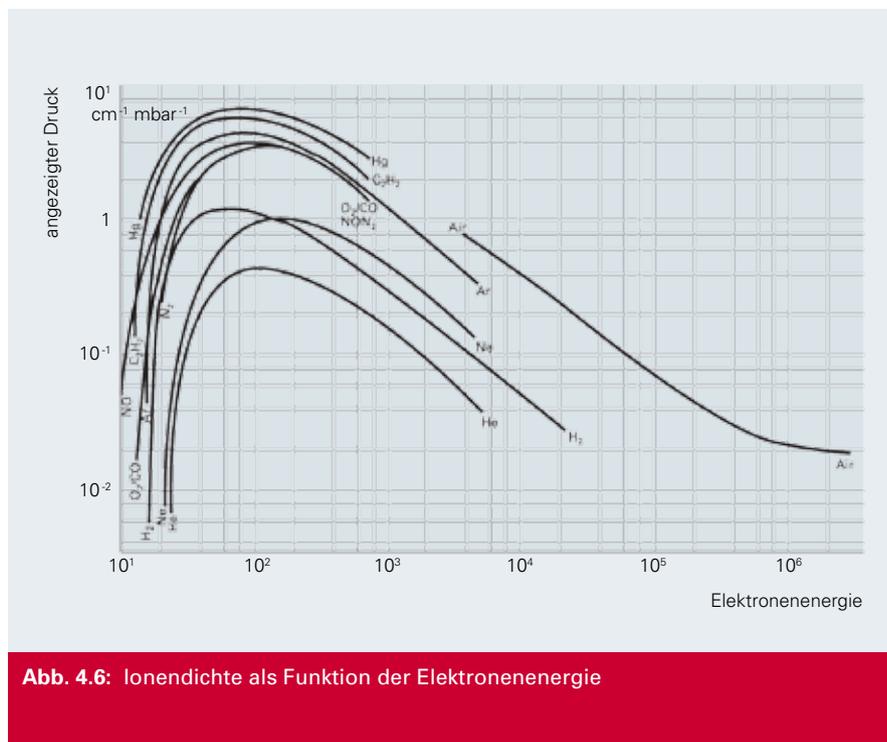


Abb. 4.6: Ionendichte als Funktion der Elektronenenergie

Quelle: Pupp / Hartmann, Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen, Hanser Verlag

Bei einer Mindestenergie der Elektronen von 10 bis 30 eV („appearance potential“) (Abbildung 4.6) setzt die Ionisierung der Neutralteilchen ein. Die Zahl der gebildeten Ionen nimmt mit wachsender Elektronenenergie (Beschleunigungsspannung) schnell zu, erreicht je nach Gasart bei 50 bis 150 eV ein Maximum und fällt mit weiter steigender Energie wieder langsam ab. Da die Ausbeute an Ionen und damit die Empfindlichkeit des Massenspektrometers möglichst groß sein soll, arbeitet man meist mit Elektronenenergien zwischen 70 und 100 eV.

Der Ionenstrom I_{K^+} einer Gaskomponente K lässt sich aus folgender Beziehung berechnen:

Formel 4-12
Ionenstrom

$$I_{K^+} = \dot{i}_- \cdot l_e \cdot s \cdot p_K$$

mit:

\dot{i}_- = Elektronenstrom (Emissionsstrom) in A

l_e = Mittlere Weglänge der Elektronen in cm

s = Differenzieller Ionisierungswirkungsquerschnitt von K in $1/(\text{cm} \cdot \text{mbar})$

p_K = Partialdruck der Gaskomponente K in mbar

Bei der Ionisierung komplexer Moleküle werden sehr viele Ionenarten gebildet. Neben einfach und mehrfach geladenen Molekülionen (ABC^+ , ABC_{++}^+) treten zusätzlich Bruchstückionen auf:

- ▶ $ABC^+ + 2e^-$
- ▶ $ABC_{++}^+ + 3e^-$
- ▶ $AB^+ + C + 2e^-$
- ▶ $BC^+ + A + 2e^-$
- ▶ $A^+ + BC + 2e^-$
- ▶ $C^+ + AB + 2e^-$
- ▶ $B^+ + A + C + 2e^-$

Neben diesen Arten können auch noch Rekombinationsionen, z. B. AC^+ , gebildet werden. Das Auftreten und die relative Häufigkeit der einzelnen Ionenarten sind charakteristisch für eine bestimmte Molekülart und dienen als wichtiges Hilfsmittel zur Identifikation des Moleküls und somit zur qualitativen Gasanalyse. Abbildung 4.7 zeigt die Bruchstückionenverteilung (cracking pattern oder fractal pattern) des einfachen Moleküls CO_2 , aufgenommen bei 70 eV Elektronenenergie.

Die Wahl der Ionenquelle und das optimale Filamentmaterial richten sich nach den Anforderungen der Messaufgabe. Die Applikationen stellen oft widersprüchliche Anforderungen an die Ionenquelle. Will man optimale Ergebnisse erzielen, so muss man die Ionenquelle der Aufgabenstellung anpassen. Dies hat zur Entwicklung verschiedenartiger Ionenquellen geführt, die fast alle mit Kathoden aus Rhenium (Re), Wolfram oder yttriertem Iridium (Y_2O_3/Ir) ausgestattet werden können. Die W-Kathoden werden bevorzugt im UHV-Bereich bzw. dort, wo der Dampfdruck von Re schon störend wirken kann, eingesetzt. Zu beachten ist jedoch die Versprödung von Wolfram-Kathoden durch den Wolfram-Kohlenstoff-Sauerstoff-Zyklus, d. h. durch die Bildung von W_2C . Anstelle der früheren Reinmetallkathoden wird zunehmend yttriertes Iridium eingesetzt. Die Vorteile dieser Kathoden liegen in der erheblich geringeren Betriebstemperatur und der relativen Unempfindlichkeit gegenüber Lufteinbrüchen. Bevorzugte Einsatzgebiete für diese Kathoden sind daher die Analyse temperaturempfindlicher Substanzen, z. B. metallorganischer Verbindungen oder die Analyse von Verunreinigungen in Gasgemischen mit hohem Sauerstoffanteil.

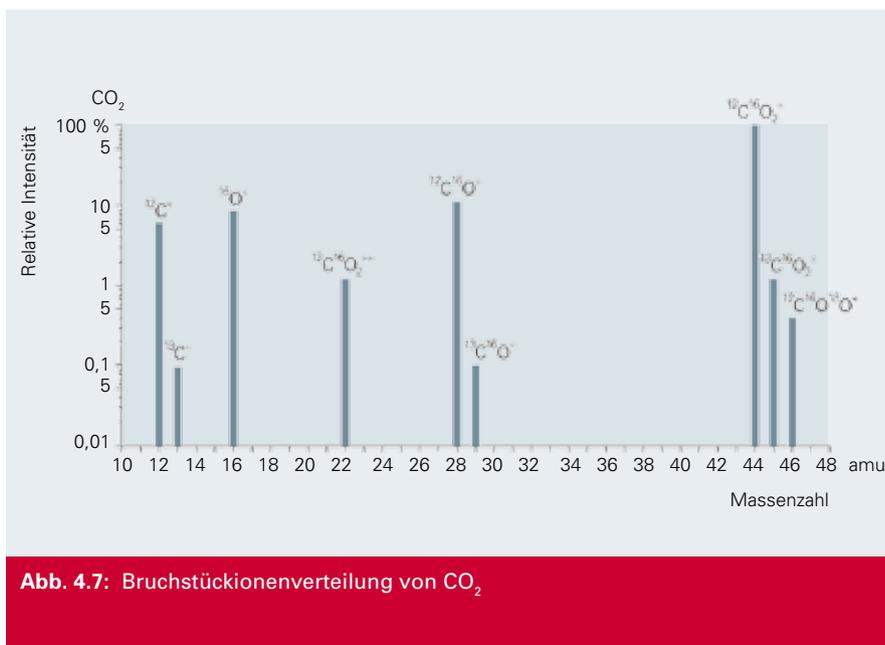


Tabelle 4.1: Filamentmaterialien und deren Anwendungen

Material	Temperatur	Verwendbar für Gase	Kommentar
Y ₂ O ₃ /Ir	1.300 °C	Inerte Gase, Luft/O ₂ , NO _x , SO _x	Kurze Standzeit bei Halogenen, unempfindlich gegen hohe O ₂ -Konzentrationen, erzeugt etwas CO/CO ₂ , bei O ₂ - oder H ₂ O-Untergrund
W	1.800 °C	Inerte Gase, H ₂ , Halogene, Freone	Kurze Standzeit bei O ₂ -Anwendungen, erzeugt etwas CO/CO ₂ , aus O ₂ - oder H ₂ O-Untergrund, Versprödung durch C
Re	1.800 °C	Inerte Gase, Kohlenwasserstoffe, H ₂ , Halogene, Freone	Ca. drei Monate Standzeit durch Verdampfung des Materials, wird bei Kohlenwasserstoffen eingesetzt

Die unterschiedlichen Ionenquellen werden im Folgenden anhand Ihrer Eigenschaften und Anwendungsgebiete beschrieben. Allen Ionenquellen ist gemeinsam, dass sie auf bis zu 150 V elektrisch hochgelegt werden können. So wird ein Signaluntergrund durch EID-Ionen vermieden. Diese Technik wird später im Detail erläutert.

Axialionenquelle

Diese Ionenquelle zeichnet sich besonders durch einen mechanisch robusten Aufbau und eine hohe Empfindlichkeit aus. Sie findet wegen ihrer offenen Bauweise vornehmlich Anwendung bei der Restgasanalyse in Hochvakuumanlagen. Den prinzipiellen Aufbau einer Axial-Ionenquelle zeigt Abbildung 4.8.

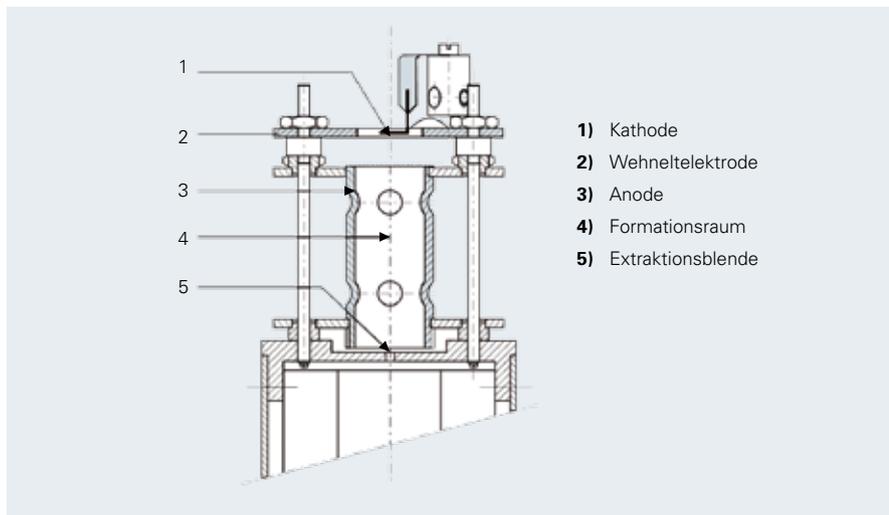


Abb. 4.8: Schnitt durch eine Axialionenquelle

Die Kathode (1) ist innerhalb einer Bohrung der Wehneltelektrode (2) angeordnet und einseitig mit dieser verbunden. Die zur Anode (3) hin beschleunigten Elektronen ionisieren Gasmoleküle im Formationsraum (4). Die positiven Ionen gelangen durch die Extraktionsblende (5) in das Massenfilter. Durch die verhältnismäßig offene Bauweise treten nur geringe Verfälschungen durch Desorption und Oberflächenreaktionen auf.

Gitterionenquelle

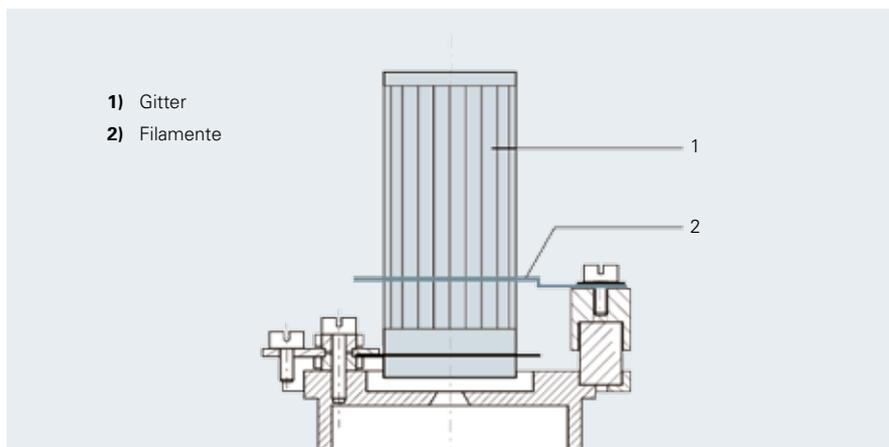


Abb. 4.9: Gitterionenquelle

Zur Restgasuntersuchung in UHV- oder gar XHV-Anwendungen benutzt man die Gitterionenquelle. Die extrem offene Bauweise und die Materialwahl sorgen für eine sehr geringe Eigen- gasabgabe. Diese Ionenquelle ist mit zwei Wolfram-Filamenten ausgerüstet, die zur Entga- sung gleichzeitig beheizt werden können. Soll bei Drücken unterhalb 10^{-11} mbar gearbeitet werden, so benutzt man speziell für diesen Zweck hoch entgaste Stabsysteme. Messungen im Druckbereich kleiner 10^{-10} mbar können durch sogenannte EID-Ionen (Electron Impact Desorption Ions) verfälscht werden. Diese Ionen (H^+ , O^+ , F^+ , Cl^+) werden durch Elektronen- beschuss von Oberflächen mit oft hoher Ausbeute direkt desorbiert. EID-Ionen stammen aus adsorbierten Schichten, deren Ursprung in der Vorgeschichte der UHV-Apparatur bzw. der Ionenquelle zu suchen ist und haben in der Regel eine Anfangsenergie von einigen eV. Diese Eigenschaft wird durch geschickte Wahl der Feldachsenspannung zur Unterdrückung der EID-Ionen gegenüber Ionen aus der Gasphase mit einer Energie von ca. 100 eV genutzt (Abbildung 4.10).

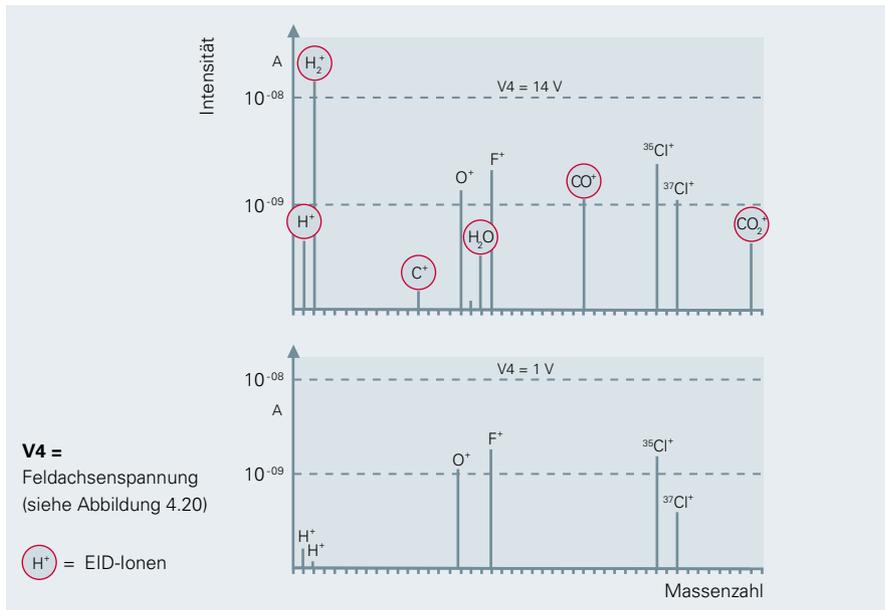


Abb. 4.10: Diskriminierung von EID-Ionen

Cross-Beam-Ionenquelle

Die Cross-Beam-Ionenquelle (Abbildung 4.11) gestattet den direkten Durchtritt von Molekular- strahlen senkrecht und parallel zur Systemachse. Wahlweise werden vom linken oder rechten Filament (1) Elektronen mit einstellbarer Energie (90 – 120 eV) in den Formationsraum (3) emittiert. Der Wehneltzylinder (4) auf Filamentpotenzial verhindert eine Streuung der Elektronen in die Umgebung. Wegen der in weiten Grenzen einstellbaren Elektronenenergie kann diese Ionenquelle zur Bestimmung des Appearance-Potenzials eingesetzt werden. Die Einschussbedingungen der Ionen ins Massenfilter werden bei der Cross-Beam-Ionenquelle besonders präzise eingehalten.

Cross-Beam-Ionenquellen werden zur Diagnose gebündelter Molekularstrahlen eingesetzt. Hierbei schießt man den Molekularstrahl senkrecht zur Zeichenebene durch die Blende (7) in den Formationsraum ein. Neutrale Gasmoleküle, die nicht ionisiert wurden, werden nach Durchgang durch die Ionenquelle entweder in eine Pumpe oder in eine Kühlfalle zwecks Kondensation eingeleitet. Massenspektrometer mit dieser Ionenquelle werden auch als „Rate-Meter“ in der Molekularstrahlepitaxie verwendet.

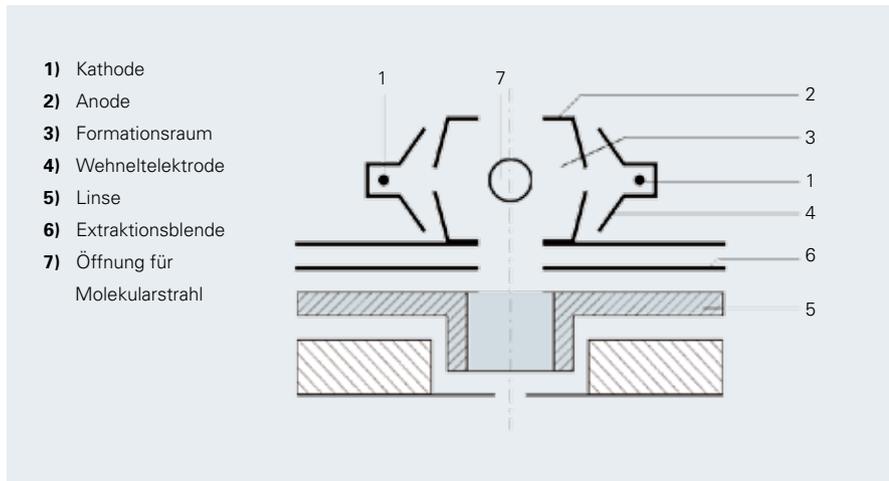


Abb. 4.11: Cross-Beam-Ionenquelle

Gasdichte Ionenquelle

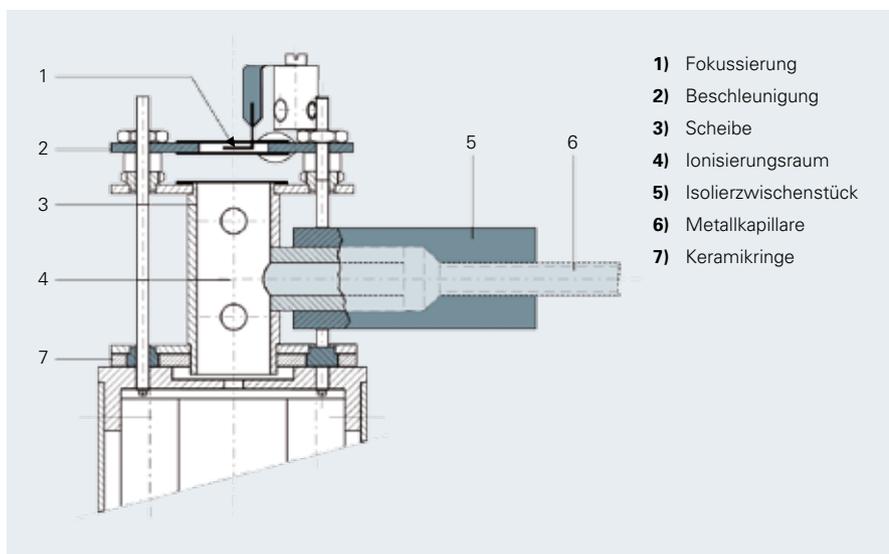


Abb. 4.12: Gasdichte Axialionenquelle

Einige der zuvor beschriebenen Ionenquellen sind auch in gasdichten Versionen erhältlich. Gasdichte Ionenquellen werden eingesetzt, wenn nur geringe Mengen Probegas zur Verfügung stehen, oder wenn der durch Restgas erzeugte Signaluntergrund wirksam unterdrückt werden soll. Hierbei müssen Gaseinlasssystem (z. B. eine beheizte Kapillare) und Ionenquelle aufeinander abgestimmt sein. Die einströmende Gasmenge bestimmt über den Leitwert der Ionenquelle den Druck im Formationsraum, der ein Vielfaches des Druckes im umgebenden Vakuumraum betragen kann. Am Beispiel der Axialionenquelle soll die Funktionsweise dargestellt werden (Abbildung 4.12).

Das zu analysierende Gas wird über eine auf Erdpotenzial liegende Metallkapillare (6) und ein Isolierzwischenstück (5) direkt in den Ionisierungsraum (4) der Ionenquelle eingeleitet. Der Leitwert zum Vakuumraum hin beträgt etwa 1 l/s.

SPM-(Sputter-Process-Monitor)-Ionenquelle

Bei dieser Ionenquelle ist der Formationsraum (7) direkt mit der Prozesskammer verbunden. Der Analysator ist mit einem kleinen Turbopumpstand (1) ausgerüstet, der auch den Kathodenraum (5) mit auf etwa 10^{-5} mbar evakuiert. Von der Niederdruckseite werden durch kleine Löcher Elektronen zur Ionisierung in den Formationsraum (7) eingeschossen.

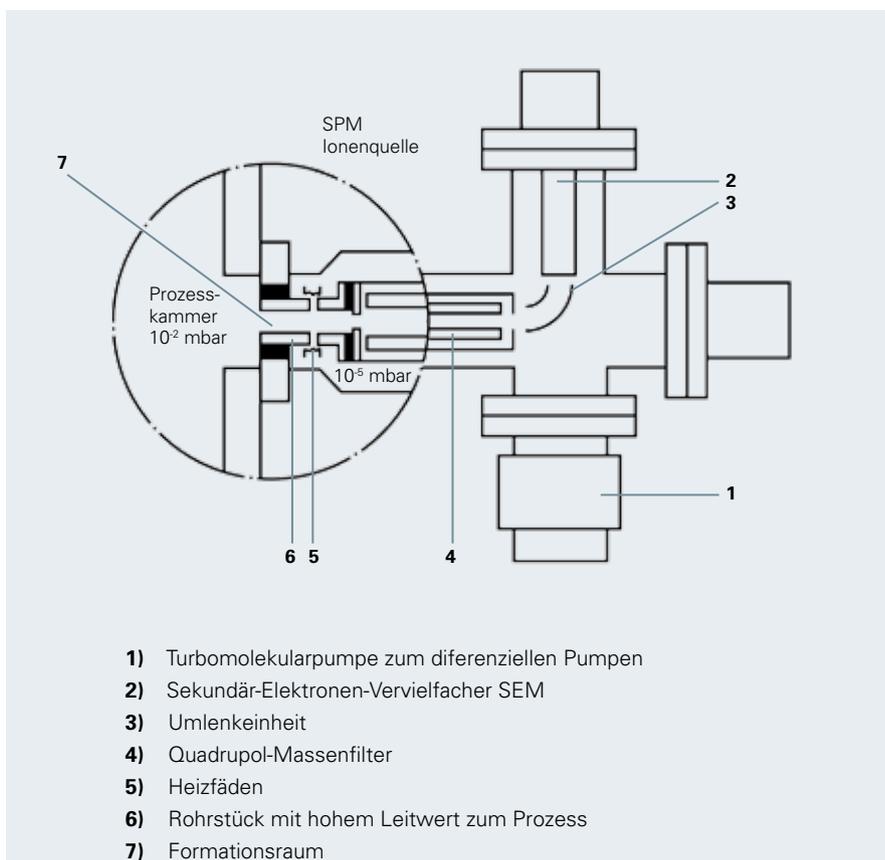


Abb. 4.13: SPM-Ionenquelle

Die gebildeten Ionen werden ebenfalls durch eine kleine Öffnung zur Niederdruckseite in das Massenfilter extrahiert. Diese Ionenquelle hat zwei entscheidende Vorteile bei der Untersuchung der Gaszusammensetzung in Sputterprozessen: Zum einen erfolgt die Analyse bei einem bis zu drei Größenordnungen höheren Druck in der Ionenquelle, d. h. man kann einen höheren Restgasanteil im Rezipienten tolerieren. Zum anderen steht das heiße Filament nicht in direktem Kontakt mit dem Sputterprozess. Dadurch wird bei empfindlichen Prozessen eine Kontamination durch die heiße Kathode vermieden.

Standard-PrismaPlus™-Ionenquelle

Das PrismaPlus Massenspektrometer von Pfeiffer Vacuum ist mit dieser robusten und hochempfindlichen Ionenquelle ausgestattet. Diese Ionenquelle ist speziell für Restgasanalysen geeignet. Der Aufbau ist vergleichbar mit einer Gitterionenquelle und verfügt wie diese über zwei Kathoden und erlaubt damit einen besonders sicheren Betrieb. Es gibt eine offene und eine gasdichte Ausführung mit Gaseinlass in Achsrichtung.



Abb. 4.14: PrismaPlus™-Ionenquelle

Alle hier beschriebenen Ionenquellen ionisieren durch Elektronenstoß. Man kann die Ionenquellen in zwei Typen aufteilen:

- ▶ Offene Ionenquellen werden benutzt, wenn das Prozessgas analysiert werden soll und keine weitere Druckreduktion erforderlich ist
- ▶ Geschlossene Ionenquellen werden angewendet, z. B. in der Analytik um mit geringen Gasmengen auszukommen oder die Empfindlichkeit gegenüber dem Untergrund des Vakuumsystems zu erhöhen

Letztere werden zusammen mit einem differenziell gepumpten System (Abbildung 4.13) benutzt, um Gase höherer Drücke zu analysieren.

4.1.2.3 Detektoren

Die nach ihrem Masse-Ladungs-Verhältnis im Stabsystem getrennten Ionen können mit verschiedenen Detektortypen elektrisch nachgewiesen werden:

- ▶ Faraday-Cup zur direkten Messung des Ionenstromes mithilfe eines Elektrometerverstäkers
- ▶ Anhand des Sekundärelektronenvervielfachers, diskret aufgebaut mit einzelnen Dynoden (Secondary Electron Multiplier = SEM)
- ▶ Durch den kontinuierlichen Sekundärelektronenvervielfacher (C-SEM)

Die Auswahl des Detektors richtet sich primär nach den Anforderungen an die Nachweisempfindlichkeit, die Nachweisgeschwindigkeit und das Signal-Rausch-Verhältnis. Sie wird aber auch durch andere applikationsspezifische Forderungen an die Stabilität, die thermische und chemische Beständigkeit sowie den Platzbedarf bestimmt.

Faraday-Cup

Im einfachsten Fall treffen die Ionen auf einen Faraday-Kollektor (Faraday-Cup) und geben dort ihre elektrische Ladung ab.

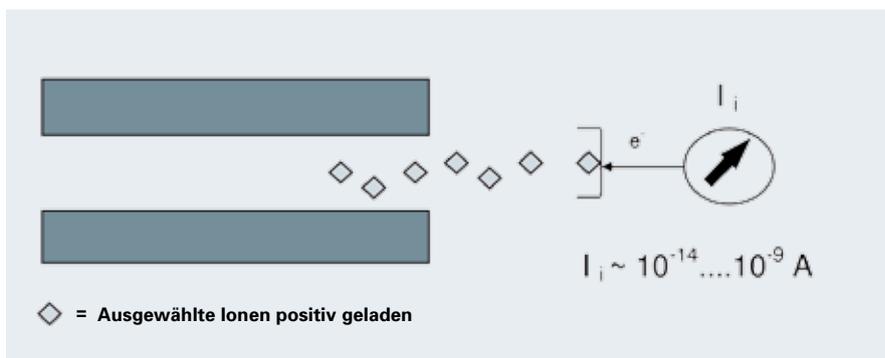


Abb. 4.15: Funktionsweise des Faraday-Cups

Der daraus resultierende Strom wird mit einem empfindlichen Strom-Spannungs-Wandler (Elektrometerverstäker) in eine dem Ionenstrom proportionale Spannung überführt. Da der Eingangswiderstand R des Stromverstärkers sehr hoch sein muss, ergeben sich zusammen mit den Kapazitäten C der Messleitung Zeitkonstanten $\tau = R \cdot C$ mit $0,1 \text{ s} < \tau < 100 \text{ s}$.

Die Messgrenze liegt je nach Zeitkonstante zwischen $1 \cdot 10^{-16}$ und $1 \cdot 10^{-14}$ A. Neben der einfachen, robusten Bauweise zeichnet sich ein Faraday-Detektor durch Langzeitstabilität und hohe Temperaturbelastbarkeit aus. Um die Zeitkonstanten klein zu halten und andere störende Einflüsse zu vermeiden, wird der Elektrometerverstäker direkt an den Analysator angeschlossen und sein Ausgangssignal wird dem Datenauswertesystem zugeleitet. Der Faraday-Cup ist deshalb auch bei allen Pfeiffer Vacuum Massenspektrometern vorhanden. Er ist nur zum Nachweis positiver Ionen geeignet.

Sollen sehr kleine Ionenströme gemessen werden oder wird eine sehr hohe Messgeschwindigkeit gefordert, so verwendet man physikalische Vorverstärker, die sogenannten Sekundärelektronenvervielfacher.

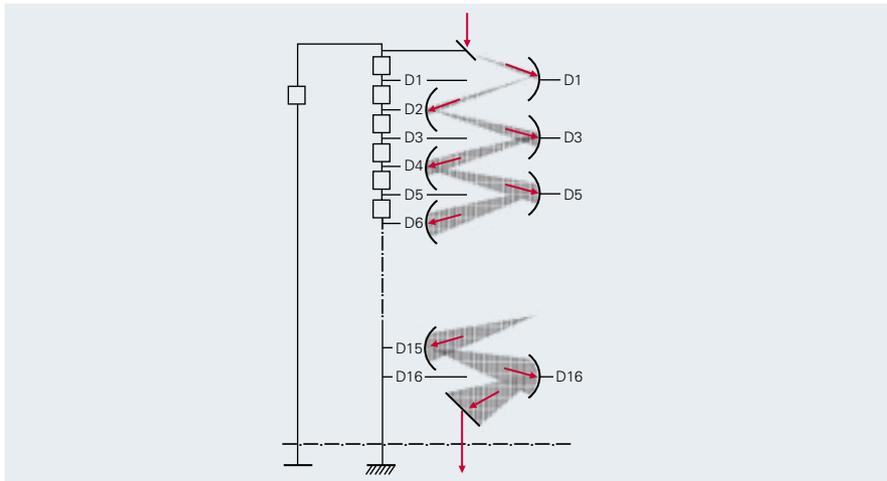


Abb. 4.16: Sekundärelektronenvervielfacher SEM

Abbildung 4.16 zeigt den Aufbau eines solchen Verstärkers. Zylindrisch geformte Bleche (Dynoden) sind von einer Schicht mit geringer Austrittsarbeit für Elektronen überzogen. Ein Ion oder ein Elektron erzeugt beim Auftreffen auf diese Schicht je nach seiner Bewegungsenergie mehrere Sekundärelektronen. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Stufen erhält man aus einem einzelnen Ion eine Elektronenlawine. Zur Beschleunigung der Elektronen legt man positive Spannungen von ca. 100 V zwischen den Dynoden an. Technisch wird diese Anordnung durch eine mit einer Hochspannung (ca. 3.000 V) versorgten Widerstandskette realisiert, an deren Anzapfungen die einzelnen Dynoden angeschlossen sind. Man erdet den positiven Pol der Hochspannung, damit die austretenden Elektronen etwa auf Erdpotenzial liegen. Man erzielt mit solchen Anordnungen Stromverstärkungsfaktoren von 10^7 .

Der Sekundärelektronenvervielfacher hat gegenüber dem Faraday-Cup folgende Vorteile:

- ▶ Die Empfindlichkeit des Instruments wird drastisch erhöht. Bis zu 10 A/mbar sind möglich
- ▶ Hierdurch können niedrigere Partialdrücke mit dem nachgeschalteten Elektrometerverstärker in kürzeren Zeitintervallen abgetastet werden
- ▶ Das Signal-Rausch-Verhältnis ist wesentlich höher als das eines Elektrometerverstärkers und somit kann die Nachweisgrenze um mehrere Größenordnungen gesenkt werden. Das gilt nur, wenn bei hoher Verstärkung im SEM auch ein geringer Dunkelstrom (Rauschanteil) fließt. Eine Erhöhung der Empfindlichkeit alleine nutzt wenig

Ein SEM hat aber auch Nachteile:

- ▶ Die Verstärkung kann sich durch Verschmutzung oder chemische Veränderung der aktiven Schicht modifizieren
- ▶ Die Anzahl der Elektronen (Konversionsfaktor), die ein auftreffendes Ion erzeugt (ca. 1 bis 5 Stück), hängt von der Ionenenergie ab (Massendiskriminierung)

Durch diese Effekte verändert sich die Verstärkung. Sie muss deshalb von Zeit zu Zeit kalibriert werden. Verstärkungsänderungen lassen sich leicht durch Änderung der Hochspannung anpassen. Der Konversionsfaktor kann konstant gehalten werden, indem man die erste Dynode mit einer separaten, hohen Spannung versorgt, die die Energie der verschiedenen Ionen angleicht.

Tabelle 4.2: Detektoren und deren Eigenschaften

	PrismaPlus™	HiQuad® mit SEM 217	HiQuad® mit SEM 218
Detektoren	Faraday / C-SEM	Faraday / SEM	Faraday / SEM mit Konversionsdynode
Höchst möglicher Druck Faraday	10^{-3} mbar	10^{-4} mbar	10^{-4} mbar
Höchst möglicher Druck SEM/C-SEM	10^{-5} mbar	10^{-5} mbar	10^{-5} mbar
Höchste Messgeschwindigkeit/amu	2 ms	125 μ s	125 μ s
Ausheiztemperatur (max.)	300	400	400
Zählbetrieb	Nein	Ja	Ja
Detektion positiver Ionen	Ja	Ja	Ja
Detektion negativer Ionen	Nein	Ja	Nein
Zähleroption	Nein	Ja	Ja

Mithilfe von Sekundärelektronenvervielfachern sind sehr schnelle Messungen möglich. Wie aus der Tabelle 4.2 ersichtlich ist, sind die Messgeschwindigkeiten im Vergleich zu Faraday-Cups wesentlich höher.

Diskret aufgebaute SEM eignen sich nicht nur als Stromverstärker, sondern auch als Ionenzähler. Mit dieser Konfiguration lassen sich extrem kleine Zählraten von 1 Ion/10 s erreichen. Auch hohe Zählraten sind möglich, sodass sich im Vergleich mit dem Betrieb als Stromverstärker ein sehr großer dynamischer Bereich ergibt.

Im Zählbetrieb bestimmt die Schnelligkeit des SEM die obere Grenze für den dynamischen Bereich. Bei einer Pulsbreite von 20 ns setzt bei einer Zählrate von 10^6 Ereignissen/s Nichtlinearität ein. Der SEM muss von seiner Pulsbreite her als Zähler geeignet sein.

Allen Sekundärelektronenvervielfachern gemeinsam ist die Beschränkung auf den Betrieb bei Drücken $< 10^{-5}$ mbar. Bei Drücken größer 10^{-5} mbar kann die Wasserschicht auf den Dynoden bei Betrieb zur Pyrolyse und damit zu vorzeitiger Alterung führen. Bedingt durch die hohen Spannungen, kann es bei hohen Drücken zu Gasentladungen kommen, die den SEM zerstören.

Ein C-SEM (Abbildung 4.17) wird meist als kontinuierlicher Sekundärelektronenvervielfacher bezeichnet, bei dem Ionen durch Sekundärelektronenemission eine Elektronenlawine auslösen. Er besteht aus einem Glasrohr, das innen mit einer leitfähigen Schicht mit hohem Widerstand und kleiner Austrittsarbeit belegt ist. Man legt eine Hochspannung an die Schicht an und erhält so über die Länge des Rohres ein gleichmäßiges Spannungsgefälle. Ionen aus dem Quadrupolsystem werden auf die Konversionsdynode gelenkt und erzeugen Sekundärelektronen, die eine Elektronenlawine im Rohr auslösen. Es werden Stromverstärkungsfaktoren von 10^6 bei 2,5 kV Verstärkungsspannung erreicht.

Auch hier bestimmen die Verstärkung und der Dunkelstrom das Signal-Rausch-Verhältnis und das Verhältnis Maximalstrom/Dunkelstrom = 10^6 den Stromverstärkungsfaktor. Durch eine zur Achse des Quadrupols etwas versetzte Anordnung des C-SEM kann man sowohl den Faraday-Cup als auch den C-SEM nebeneinander im Analysator benutzen und bei Bedarf sogar von einem Detektor auf den anderen umschalten.

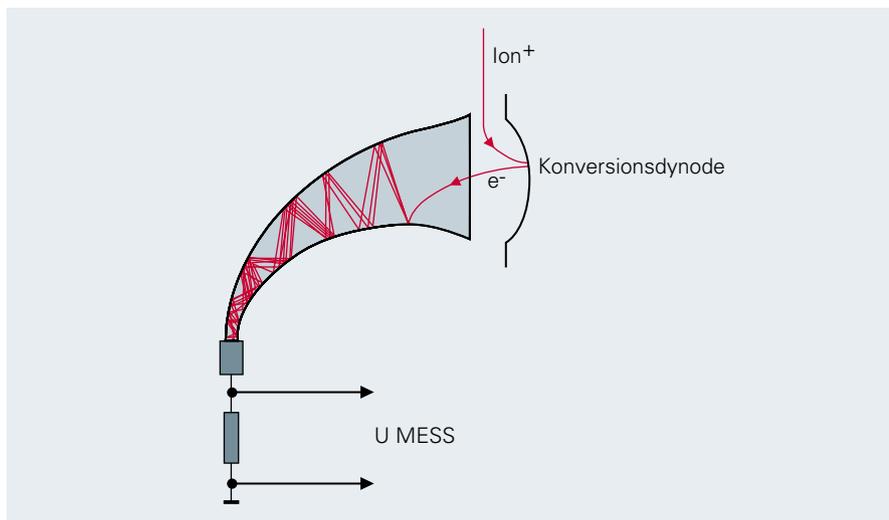


Abb. 4.17: Funktionsweise des kontinuierlichen C-SEM

4.1.2.4 Vakuumsysteme

Zum Betrieb von Quadrupolmassenspektrometern sind Drücke $< 10^{-4}$ mbar erforderlich. Dies setzt einen entsprechenden Pumpstand mit Drucküberwachung voraus. Damit eine Gasanalyse mit optimaler Empfindlichkeit durchgeführt werden kann, ist nicht nur ein geringer Basisdruck erforderlich, sondern das Restgas sollte ausschließlich unvermeidliche Partialdruckanteile der Desorption von den Wänden der Apparatur beinhalten. Restgasspektren dieser Art und niedrige Basisdrücke erreicht man am besten mit Turbodragpumpständen (Abbildung 2.22). Eine zusätzliche Totaldruckmessröhre schützt das Massenspektrometer vor dem Einschalten bei zu hohem Druck. Während des Aufbaus eines solchen Systems ist auf die sinnvolle Anordnung von Gaseinlass, Ventilen, Pumpen und Messgeräten zu achten, um Verfälschungen durch ungünstige Strömungsverhältnisse zu vermeiden. Im Verlauf von Vakuumprozessen, die bei hohem Druck ablaufen, ist oft ein getrennter Pumpstand erforderlich, der das Messsystem evakuiert. Zu diesem Zweck benutzt man kleine Pumpstände mit Turbodragpumpen und Membranpumpen.

4.1.2.5 Einlasssysteme

Viele vakuumtechnische Prozesse, die mit Massenspektrometern überwacht werden, finden in Druckbereichen $> 10^{-4}$ mbar statt. Auch müssen Gase, die analysiert werden sollen, von Atmosphärendruck auf Drücke $< 10^{-4}$ mbar entspannt werden. Je nach Druckgradient werden unterschiedliche Verfahren zur Druckreduktion eingesetzt.

Gasgemische müssen möglichst ohne Entmischung in das Massenspektrometer eingelassen werden:

- ▶ Bei Drücken $p > 10$ mbar reduziert man den Druck über eine (beheizte) Kapillare, in der Laminarströmung herrscht, mit nachgeschaltetem Gaseinlassventil. Unter Umständen ist vor dem Ventil noch eine Druckreduzierung über eine zusätzliche Pumpe notwendig
- ▶ Bei Drücken $p < 10$ mbar reduziert man den Druck über eine Blende und ein mit einer Turbomolekularpumpe differenziell gepumptes Massenspektrometer

Hierbei wird die Verfälschung durch den gasartabhängigen Blendenleitwert durch den ebenfalls gasartabhängigen Leitwert des Stömungsweges zur Pumpe hin wieder aufgehoben, sodass die Konzentrationen im QMS der wahren Gaszusammensetzung entsprechen

- ▶ Bei Drücken $p < 10^{-4}$ mbar kann das Massenspektrometer mit einer offenen Ionenquelle direkt in der Prozesskammer eingebaut werden

Tabelle 4.3: Verschiedene Gaseinlasssysteme und deren Eigenschaften

Einlasssystem	Druckbereich	Produktbeispiel	Charakteristik
Ohne Druckreduktion	10^{-12} bis 10^{-4} mbar	PrismaPlus QMG 220, HiQuad QMG 700	Mit verschiedenen Ionenquellen kann ein weiter Druckbereich abgedeckt werden
SPM-Ionenquelle	10^{-9} bis 10 mbar	PrismaPlus SPM 220, HiQuad SPM 700	Spezielle Ionenquelle für die Analyse von Sputterprozessen. Mit diesem System wird der Zustand der Anlage ohne Verfälschung durch eine Druckreduktion analysiert
Kapillareinlass	700 bis 1.100 mbar, abhängig von der Kapillarlänge und der vorgeschalteten Blende	OmniStar, ThermoStar, Einlasssystem GES 020 und GES 010	Differenziell gepumptes Einlasssystem, geringe Massendiskriminierung, nicht geeignet für wechselnde Einlassdrücke
Blendeneinlass	0,1 bis 10 mbar, abhängig vom Blendendurchmesser	PrismaPlus HPA 220	Blenden mit Durchmesser 0,01 bis 0,5 mm, einfacher, robuster Aufbau, Massendiskriminierung, mit unterschiedlichen Blendendurchmessern sind wechselnde Einlassdrücke möglich, ungeeignet für schnell wechselnde Gaszusammensetzungen
Dosierventil	0,1 bis 1.000 mbar	PrismaPlus HPA 220, Dosierventile UDV 040 bis 146	Dosierventile eignen sich für den Gaseinlass über einen sehr weiten Messbereich, differenziell gepumpte Ventile erlauben auch eine Analyse schnell wechselnder Gaszusammensetzungen
Druck geregelter Gaseinlass	10^{-3} bis 1.000 mbar	EVR 016 mit RVC 300, OmniStar mit druckgeregeltem Einlass	Differenziell gepumptes Einlasssystem, bestehend aus einer Regelschleife mit Regelventil und Druckmessung, relativ großes Totvolumen, lange Gaswechselzeiten

4.1.3 Anwendungshinweise

So vielfältig wie die Anwendungen des Vakuums ist auch die Massenspektrometeanalyse. Bei der Gasanalyse im Druckbereich bis 1 bar setzt man die oben beschriebenen Gaseinlasssysteme mit beheizten Kapillaren ein. Gasströme kann man direkt in gasdichte Ionenquellen einleiten und so den Untergrund der Vakuumumgebung reduzieren. Gasstrahlen lässt man durch Cross-Beam-Ionenquellen hindurch treten und den Strahl entweder direkt in eine Vakuumpumpe einfallen oder er wird in einer Kühlfalle kondensiert.

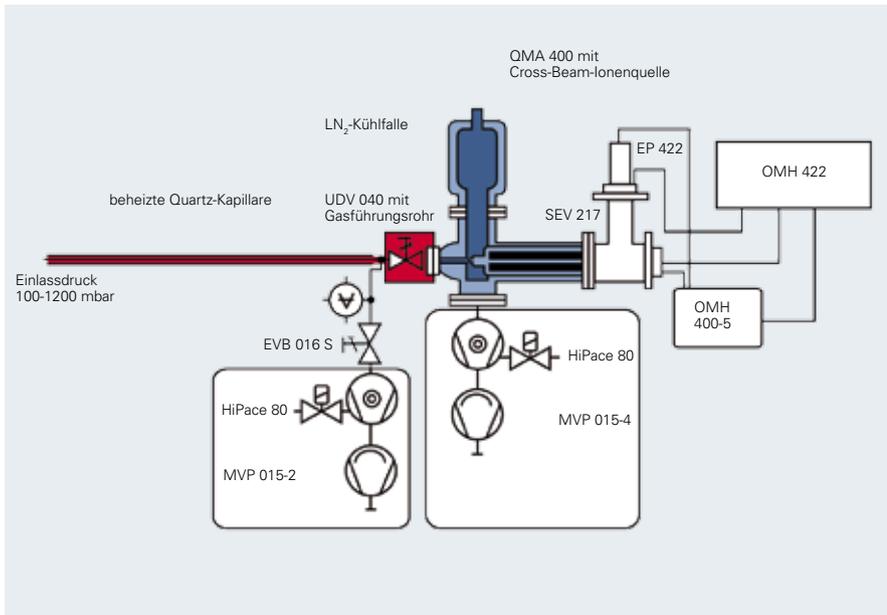


Abb. 4.18: Quadrupolmassenspektrometer mit Gaseinlassystem, Cross-Beam-Ionenquelle und Kühlfalle

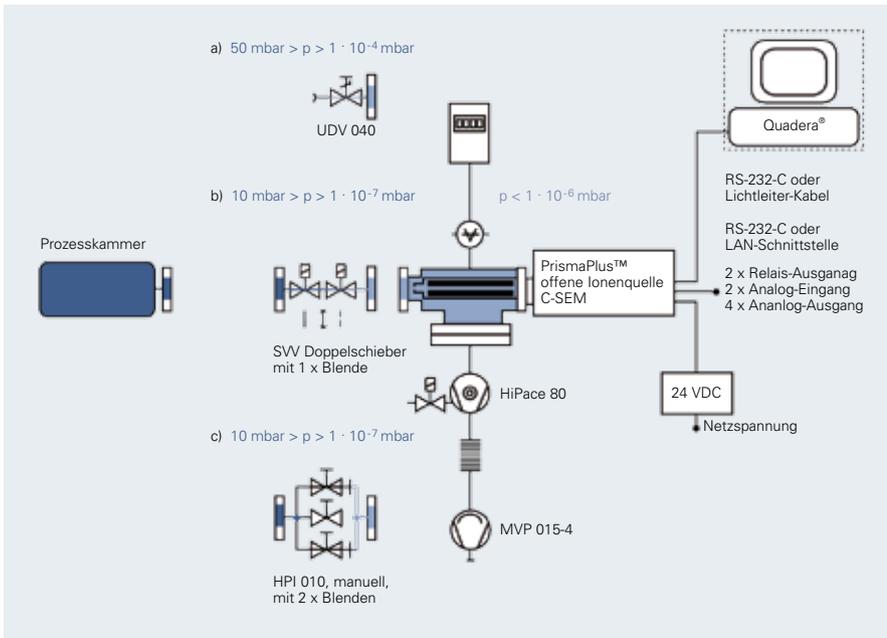


Abb. 4.19: Differenziell gepumptes Quadrupolmassenspektrometer mit verschiedenen Gaseinlässen

Im Druckbereich $p < 10$ mbar (Ätz-, Sputter- oder sonstige Beschichtungsprozesse) wird das Gas über eine Blende oder ein Ventil in das Massenspektrometer eingelassen. Am Messsystem ist zur Druckreduzierung eine Turbopumpe angebracht. Für korrosive Gase gibt es Spezialausführungen.

Bei sehr niedrigen Drücken, besonders im UHV-Bereich, benutzt man offene Ionenquellen. Wegen der geringen Gasdichten muss man Sekundärelektronenvervielfacher (SEM) als Detektoren verwenden, die senkrecht zur Achse des Quadrupols angeordnet sind. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses ist gegenüber dem SEM eine Turbopumpe angebaut, die einströmende Neutralteilchen abpumpt.

Einen Sonderfall stellt die Sekundärionenmassenspektrometrie (SIMS) dar. Hierbei werden Ionen auf Oberflächen geschossen, die ihrerseits positiv oder negativ geladene Sekundärionen erzeugen. Diese werden direkt von einem Quadrupolmassenspektrometer ohne Ionenquelle nachgewiesen. Auch hier benutzt man die im vorigen Abschnitt beschriebene Messanordnung.

4.1.4 Portfolio

Pfeiffer Vacuum bietet zwei Grundmodelle von Massenspektrometern an:

- ▶ Das kompakte PrismaPlus mit 6-mm-Stabsystem und 100 mm Länge
- ▶ Und das hochauflösende HiQuad mit Massenfiltern von 8 und 16 mm Durchmesser und 300 mm Länge

PrismaPlus™

Es handelt sich hierbei um ein kompaktes Gerät, dessen gesamte Elektronik an den Analysator angebaut ist und zum Ausheizen abgenommen werden kann. Das PrismaPlus vereinigt folgende Eigenschaften:

- ▶ Massenbereiche 100, 200 und 300 amu
- ▶ Als Detektoren stehen ein Faraday-Cup und ein C-SEM zur Verfügung
- ▶ Ausrüstung mit verschiedenen Ionenquellen und Filamenten
- ▶ Der Analysator ist bis zu 150 °C ausheizbar

Das PrismaPlus wird sowohl als Einzelgerät eingesetzt als auch in Module und Analysensysteme integriert.

HiQuad®

Diese Geräte von höchster Präzision vereinigen folgende Merkmale:

- ▶ Die Massenbereiche: 1–16 amu, 1–128 amu, 1–340 amu, 1–300 amu, 1–512 amu, 1–1.024 amu und 1–2.048 amu werden von unterschiedlichen Modellen abgedeckt
- ▶ Es gibt verschiedene Massenfilter mit folgenden Stabdurchmessern: 6 mm, 8 mm Molybdän, 8 mm Edelstahl und 16 mm Molybdän
- ▶ Nahezu alle oben beschriebenen Ionenquellen können mit den Analysatoren kombiniert werden
- ▶ Es gibt Ionenoptiken zur Analyse von Neutralteilchen und positiven sowie negativen Ionen (SIMS)
- ▶ Alle Arten von Detektoren, also Faraday-Cups, Faraday-Cups und SEM, Faraday-Cups und C-SEM sowie Ionenzähler sind in unterschiedlichen Anordnungen verfügbar
- ▶ Diese Massenspektrometer können mithilfe von Ein-Ausgabe-Modulen in Analysensysteme integriert werden

Module

Module sind Spezialgeräte zur Prozessüberwachung oder zur Gasanalyse mit verschiedenen Gaseinlasssystemen und angebauten Turbodragpumpständen zum Evakuieren des Analysators:

- ▶ Der HPA 220 High Pressure Analyzer basiert auf dem PrismaPlus
Prozessdruck: bis 5 mbar
- ▶ Der SPM 220 Sputter Process Monitor basiert auf dem PrismaPlus
Prozessdruck: bis 10^{-2} mbar oder 10 mbar
- ▶ Der SPM 700 Sputter Process Monitor basiert auf dem HiQuad
Prozessdruck: wie SPM 220
- ▶ Der EPD 700 dient zum Nachweis positiver Ionen beim Ätzen in der Gasphase und basiert auf dem HiQuad, Prozessdruck: bis 10^{-2} mbar

Benchtop-Massenspektrometer

Es gibt komplette Systeme für Prozessdruck 1 bar basierend auf dem PrismaPlus:

- ▶ Der Omnistar GSD 320 O mit einem Gaseinlass dient zur quantitativen Gasanalyse bei Atmosphärendruck mit beheizten und temperaturgeregelten Gaseinlasssystemen
 - ▶ Der Thermostar GSD 320 T ist für die Kopplung mit Thermowaagen vorgesehen
- Diese Geräte oder Teile davon werden von OEM-Kunden in Kompletteräte eingebaut.

4.1.4.1 Vorteile der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer

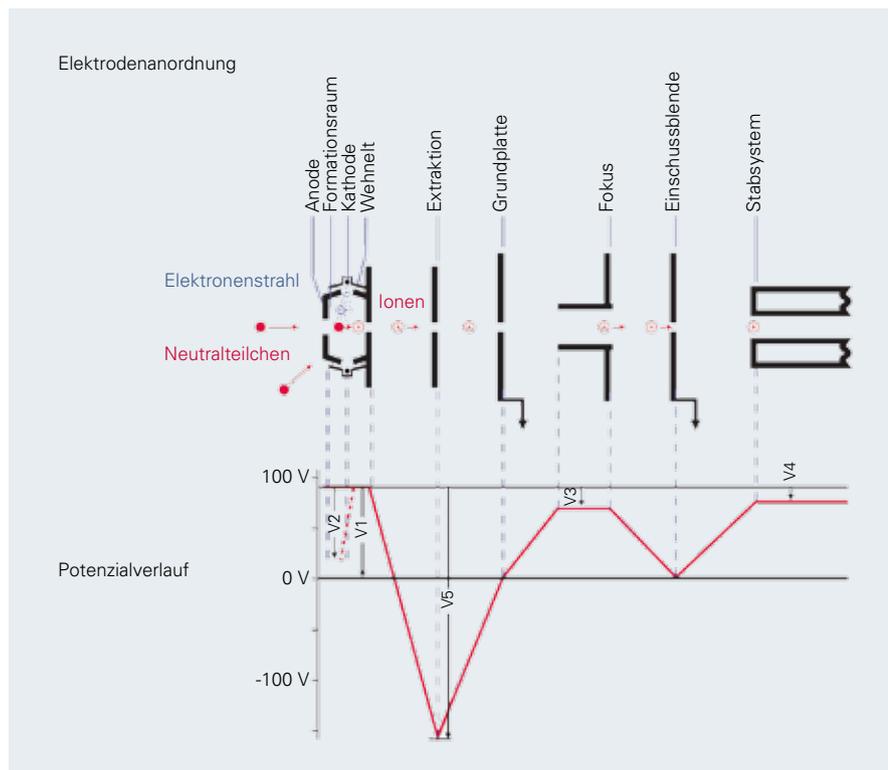


Abb. 4.20: Potenzialverlauf in einer elektrisch hochgelegten Ionenquelle

Der Potenzialverlauf in einer Pfeiffer Vacuum Ionenquelle ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Die beheizte Kathode, die Elektronen emittiert, liegt auf einem Potenzial von etwa 20 V. Üblicherweise ist die Wehneltelektrode mit dem positiven Pol der Kathode verbunden und verhindert, dass Elektronen in die Umgebung der Ionenquelle gestreut werden. Die Elektronen werden durch die Anodenspannung $V_2 = 80$ V in den Formationsraum (100 V) hinein beschleunigt und ionisieren dort eindringende neutrale Gasmoleküle. Durch eine Blende werden die Ionen von der Extraktionselektrode mit einem Potenzial $V_5 = -150$ V beschleunigt und von der Fokussierungselektrode wieder auf $V_3 = 80$ V abgebremst. Die Einschussblende beschleunigt die Ionen nochmals, bevor sie dann vom Feldachsenpotenzial $V_4 = 85$ V abgebremst mit einer Energie von etwa 15 eV (Differenz zwischen Formationsraum und Feldachse) ins Massenfilter eintreten.

Die Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer PrismaPlus und HiQuad zeichnen sich durch die elektrisch hochgelegte Ionenquelle und die Feldachsenttechnologie aus.

Elektrisch hochgelegte Ionenquelle

Bei vielen Quadrupolmassenspektrometern liegt die Kathode auf Erd- oder gar negativem Potenzial. Die emittierten Elektronen werden von der Kathode (Filament) zum Ionisationsraum (Anode) hin beschleunigt und ionisieren dort neutrale Gasteilchen, die dann in das Massenfilter extrahiert werden. Bei diesen Feldverhältnissen können aber auch Elektronen auf andere Flächen im Vakuum auftreffen und dort EID-Ionen auslösen. Dies führt zu einem unerwünschten Untergrund und kann bei stark belegten Oberflächen des Rezipienten zu beträchtlichen Gasausbrüchen beim Einschalten des Filaments führen.

Pfeiffer Vacuum Ionenquellen liegen auf positivem Potenzial (ca. 10 – 100 V). Von dort emittierte Elektronen werden von allen Oberflächen mit negativem Potenzial abgestoßen und von diesen ferngehalten, sodass keine störenden EID-Ionen ausgelöst werden.

Feldachsenttechnologie

Die in der Ionenquelle gebildeten Ionen werden mit hoher kinetischer Energie in Richtung des Massenfilters beschleunigt. Dies hat zur Folge, dass die Ionen nicht durch Rand- oder Störfelder beeinflusst werden können und sich mit einer zunächst hohen Energie auf das Massenfilter zubewegen. So erreicht man auch ohne Pre-Filter, wie sie bei anderen Massenspektrometern verwendet werden müssen, optimale Einschussbedingungen in das Quadrupolfeld. Das Massenfilter selbst ist entsprechend elektrisch auf die Feldachsenspannung hochgelegt, sodass die Ionen bei Eintritt ins Filter wieder auf eine kinetische Energie von ca. 15 eV abgebremst werden. Diese Energie – im Fachjargon Feldachsenspannung genannt – bestimmt zusammen mit der Masse der Ionen deren Geschwindigkeit und damit auch deren Laufzeit im Massenfilter. Durch die so erzeugten günstigen Einschussbedingungen wird eine über einen weiten Massenbereich hohe Transmission der Ionen durch das Massenfilter und somit auch eine hohe Empfindlichkeit des Gesamtsystems erreicht.

SEM: 90 grad off axis

Ein weiterer Vorteil der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer ist die Anordnung der Sekundärelektronenvervielfacher SEM um 90° abgewinkelt zur Filterachse („SEM: 90 grad off axis“).

Ordnet man den SEM (4.1.2.3) in Achsrichtung hinter dem Massenfilter an, so erzeugen alle auftreffenden Teilchen (Neutralteilchen, Ionen, Elektronen, Photonen) Sekundärelektronen und tragen damit zum Untergrundsignal bei.

Aus diesem Grund werden die aus dem Filter austretenden Ionen um 90° abgelenkt und dann auf die erste Dynode des SEM beschleunigt. Neutralteilchen und Photonen werden von der elektrischen Umlenkeinheit überhaupt nicht und Elektronen in viel stärkerem Maße als die Ionen abgelenkt. So erreicht man, dass fast ausschließlich die durch das Filter durchgelassenen Ionen auf den Verstärker auftreffen, was zu einer erheblichen Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses führt.

Die HiQuad Analysatoren sind, von wenigen Spezialausführungen abgesehen, mit „SEM: 90 Grad off axis“ ausgestattet.

Beim PrismaPlus wird als Stromverstärker ein C-SEM in Axialrichtung angeboten. Auch hier werden die aus dem Massenfilter austretenden Ionen in Richtung auf den C-SEM leicht abgelenkt und damit in abgeschwächtem Maße von den unerwünschten Teilchen getrennt.

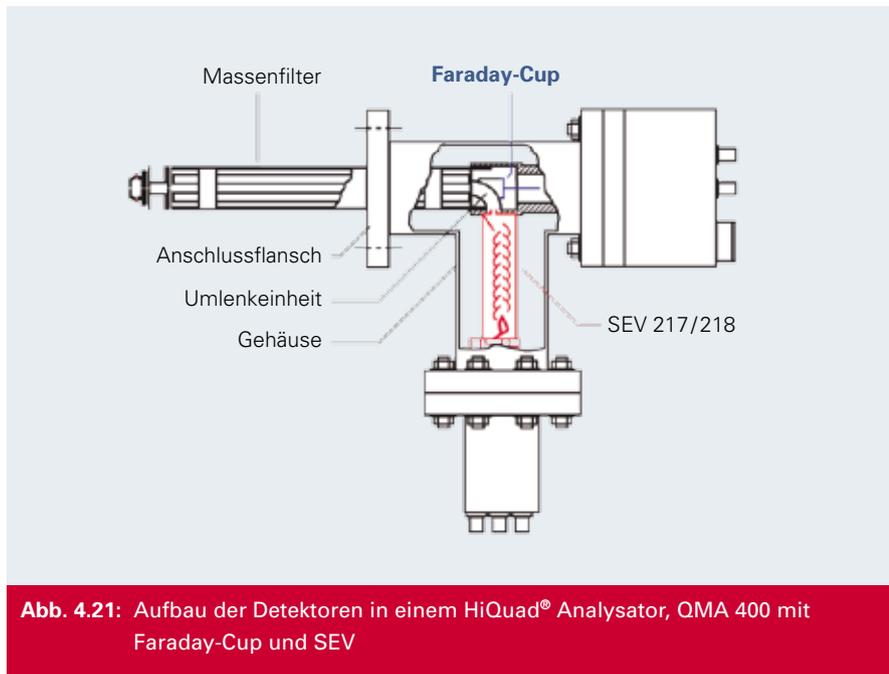


Abb. 4.21: Aufbau der Detektoren in einem HiQuad® Analysator, QMA 400 mit Faraday-Cup und SEV

Massendiskriminierung

Treffen Ionen mit unterschiedlichem Impuls auf die erste Dynode des SEM auf, so werden unterschiedliche Anzahlen von Sekundärelektronen erzeugt. Die Konversionsrate am Verstärker ist massenabhängig. Der Effekt wird Massendiskriminierung genannt und ist bei einem diskret aufgebauten SEM weniger stark ausgeprägt als bei einem C-SEM. Durch Beschleunigung der Ionen auf eine hohe Energie vor dem Auftreffen auf die Konversionsdynode kann die Massendiskriminierung reduziert werden.

Zusammenfassung

Um über einen großen Massenbereich eine möglichst hohe Transmission bei vorgewählter Massenauflösung zu erzielen, ist sowohl eine stabile HF-Versorgung als auch ein mechanisch präzises Filter notwendig.

Eine hochgelegte Ionenquelle mit geeignet gewählter Feldachsentechologie sowie die „90° off axis“-Anordnung des SEM verbessern das Signal-Rausch-Verhältnis erheblich. Die Massendiskriminierung an einem SEM oder einem C-SEM kann mithilfe einer auf hohe Spannung gelegten Konversionsdynode reduziert werden.

Quadrupolmassenspektrometer zeichnen sich gegenüber anderen Aufbauten aus durch:

- ▶ Kleine Baugröße und geringes Gewicht
- ▶ Linearen Zusammenhang zwischen Masse und HF-Spannungsamplitude
- ▶ Hohe Empfindlichkeit
- ▶ Großen Signal-Rausch-Abstand
- ▶ Hohe Messgeschwindigkeit und Wiederholrate
- ▶ Großen dynamischen Bereich (bis zu zehn Dekaden)
- ▶ Beliebige Einbaulage
- ▶ Das Fehlen störender Magnetfelder

Aufgrund dieser Vorteile hat sich das Quadrupolmassenspektrometer zum meistverwendeten Massenspektrometer entwickelt.

4.1.4.2 Datenauswertesystem

Die elektrischen Betriebsgeräte der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer enthalten keinerlei Bedienungs- oder Anzeigemöglichkeiten. Die Bedienung, Datenauswertung, Anzeige und Datenspeicherung erfolgen deshalb mit einem PC und der Software „Quadera“.

Die Pfeiffer Vacuum Massenspektrometersoftware Quadera ist ein modulares System und für die mit neu entwickelter Elektronik ausgestatteten Geräte PrismaPlus und HiQuad anwendbar. Der PC kann über Ethernet mit den Massenspektrometern PrismaPlus und HiQuad verbunden werden.

Zur Einstellung des Massenspektrometers werden bei bestimmten Messaufgaben Parametersätze vom PC an das Gerät übergeben. Die nach oder während der Messung ermittelten Daten werden zurück an den Rechner übertragen und können dort ausgewertet, gespeichert oder angezeigt werden.

Typischerweise werden angezeigt:

- ▶ Massenspektren mit einstellbarem Massenbereich und linearer oder logarithmisch eingeteilter Achse für die Konzentration
- ▶ Darstellung des zeitlichen Verlaufs von Partialdrücken
- ▶ Bargraphmessungen zur Reduzierung der Datenmengen

Typische Messaufgaben wie z. B. Restgasanalyse oder Lecksuche sind programmiert und lassen sich mit einem Mausklick starten.

Sollen quantitative Analysen durchgeführt werden, ist vorher das Massenspektrometer zu kalibrieren. Handelt es sich um wiederkehrende Abläufe wie z. B. Kalibrierung mit anschließender quantitativer Analyse, lassen sich diese mittels „visual basic for applications“ programmieren. Da dafür vorgefertigte Module benutzt werden können, sind keine Programmierkenntnisse erforderlich.

Zur Lösung komplizierter Messaufgaben steht in der Software Quadera eine Bibliothek mit Bruchstückionenverteilungen für einige häufig vorkommende Gase und Verbindungen zur Verfügung.

Diese und andere, aus Spektrenbibliotheken gewonnenen, Verteilungen können jedoch nur als Richtwerte angesehen werden, da verschiedene Parameter wie die Ionisierungsenergie, die Temperatur oder die Transmissionseigenschaften des Massenanalysators diese Werte beeinflussen.

Bei der Analyse von Gemischen mit mehreren Gaskomponenten tritt häufig das Problem der Überlappung von Ionenströmen verschiedener Herkunft auf gleichen Massenzahlen auf. Es gibt Massenzahlen, deren Intensität ausschließlich durch eine einzige Gaskomponente hervorgerufen wird (z. B. Argon auf der Massenzahl 40, Sauerstoff auf der Massenzahl 32, Kohlendioxid auf der Massenzahl 44 und Wasser auf der Massenzahl 18).

Bei anderen Massenzahlen wird die Gesamtintensität des detektierten Ionenstromes durch die Überlagerung verschiedener Anteile von Bruchstückionen von diversen Gaskomponenten bestimmt. Je nach Zusammensetzung und Konzentrationsverhältnissen im zu analysierenden Gasgemisch sind also jeweils geeignete Algorithmen und Kalibrierverfahren für die jeweilige Messaufgabe zu formulieren. Vor der Ausführung quantitativer Gasanalysen sind die jeweiligen Kalibrierfaktoren für jede einzelne Gaskomponente auf allen überlappenden Massenzahlen zu bestimmen, und zwar durch die Umschaltung geeigneter Kalibriergasmischungen mit jeweils nicht überlappenden Komponenten. Danach kann die Konzentration bzw. der Partialdruck für diese Gase im Rahmen einer Matrixrechnung ermittelt werden.

Die Massenspektrometersoftware Quadera unterstützt solche Matrixrechnungen und die notwendigen gasspezifischen Kalibrierroutinen.

5 Lecksuche

5.1 Allgemeines

5.1.1 Lecks und deren Nachweis

Was ist ein Leck? Ein Leck bzw. eine Undichtigkeit ermöglicht den Stofffluss in Richtung eines Druckgradienten. Einfacher ausgedrückt handelt es sich dabei um kleine Löcher, durch die Gase oder Flüssigkeiten von der Seite des höheren Druckes zur Seite des niedrigeren Druckes strömen. Es kann sich dabei um einfache, harmlose Undichtigkeiten wie z. B. einen tropfenden Wasserhahn handeln, aber natürlich können auch gefährliche toxische Substanzen durch Lecks austreten.

Sehr viele technische Produkte funktionieren nicht oder nicht ausreichend lange, wenn sie Undichtigkeiten dieser Art aufweisen. Dazu an dieser Stelle einige Beispiele: der Kältekreislauf von Kühlschränken, Klimaanlage in Autos, Autoreifen, Benzin- und Heizöltanks oder auch Destillationsanlagen in der chemischen bzw. pharmazeutischen Industrie. Die Dichtheit von Maschinen und Anlagen im Produktionsprozess ist somit in vielen Fällen eine unverzichtbare Voraussetzung für die Qualität der erzeugten Produkte.

Kommen wir auf die ursprüngliche Definition eines Lecks zurück, so stellen wir fest, dass es unmöglich ist, jeglichen Stofffluss durch eine Wand zu unterbinden. Deshalb richtet sich der Begriff „dicht“ nach den jeweiligen Anforderungen der Maschine, der Anlage oder eines Behälters und muss entsprechend quantifiziert werden.

5.1.2 Leckrate

Betrachten wir einen Fahrradreifen mit einem Volumen $V = 4 \text{ l}$. Er ist auf drei bar aufgepumpt und soll nach der Zeit t (30 Tage) ohne nachzupumpen max. $\Delta p = 1.000 \text{ mbar}$ Druckverlust haben.

Die Leckrate wurde bereits in 1.3.3 definiert $Q_l = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t}$ (Formel 1-27) oder anschaulich: Die Leckrate eines Behälters mit einem Volumen von 1 Liter beträgt 1 mbar · l/s, wenn der Druck im Inneren in 1 Sekunde um 1 mbar ansteigt oder abfällt. Die Umrechnung in andere gebräuchliche Einheiten entnehmen Sie bitte der Tabelle 1.6.

Setzen wir die Werte für unseren Fahrradschlauch ein, erhalten wir die zulässige Leckrate:

$$Q_l = \frac{1.000 \text{ mbar} \cdot 4 \text{ l}}{30 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$$

und stellen fest, dass der Fahrradschlauch mit dieser Leckrate ausreichend dicht ist.

Solche Leckraten kann man mit der altbekannten Blasentestmethode (Abbildung 5.1) finden.

Betrachten wir nun einen Kühlschrank, der in zehn Jahren 10 g Kältemittel mit einem Molekulargewicht von 102 g/mol verlieren darf, also etwa 2,24 bar · l. Daraus ergibt sich eine zulässige Leckrate von

$$Q_l = \frac{2,24 \text{ l} \cdot 1.000 \text{ mbar}}{10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s}} = 7,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$$

Solche Leckraten lassen sich nur mit sehr empfindlichen Messverfahren wie z. B. der Massenspektrometrie und Prüfgasen, die in der Atmosphäre nicht vorkommen, lokalisieren und messen.

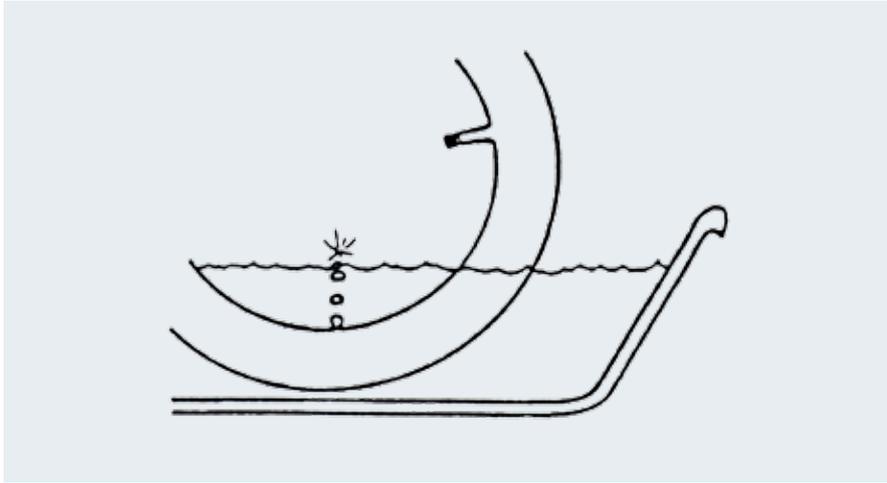


Abb. 5.1: Blasenlecktest bei einem Fahrradschlauch

5.1.3 Prüfgase

Bei der Lecksuche verwendete Prüfgase, auch Tracergase genannt, sollen folgende Voraussetzungen erfüllen:

Sie sollen

- ▶ Für Mensch, Tier und Umwelt ungiftig sein
- ▶ Die Luft nicht verdrängen, da es sonst zu bedrohlichen Situationen wie Erstickung kommen kann
- ▶ Inert, d. h. reaktionsträge, also weder chemisch reagieren noch brennbar sein
- ▶ Möglichst nicht in der Luft vorkommen. Nur mit einem Gas, das einen möglichst geringen Anteil in der Umgebungsluft hat, lassen sich auch kleinste Undichtigkeiten detektieren
- ▶ Nicht mit anderen Gasen verwechselt werden können

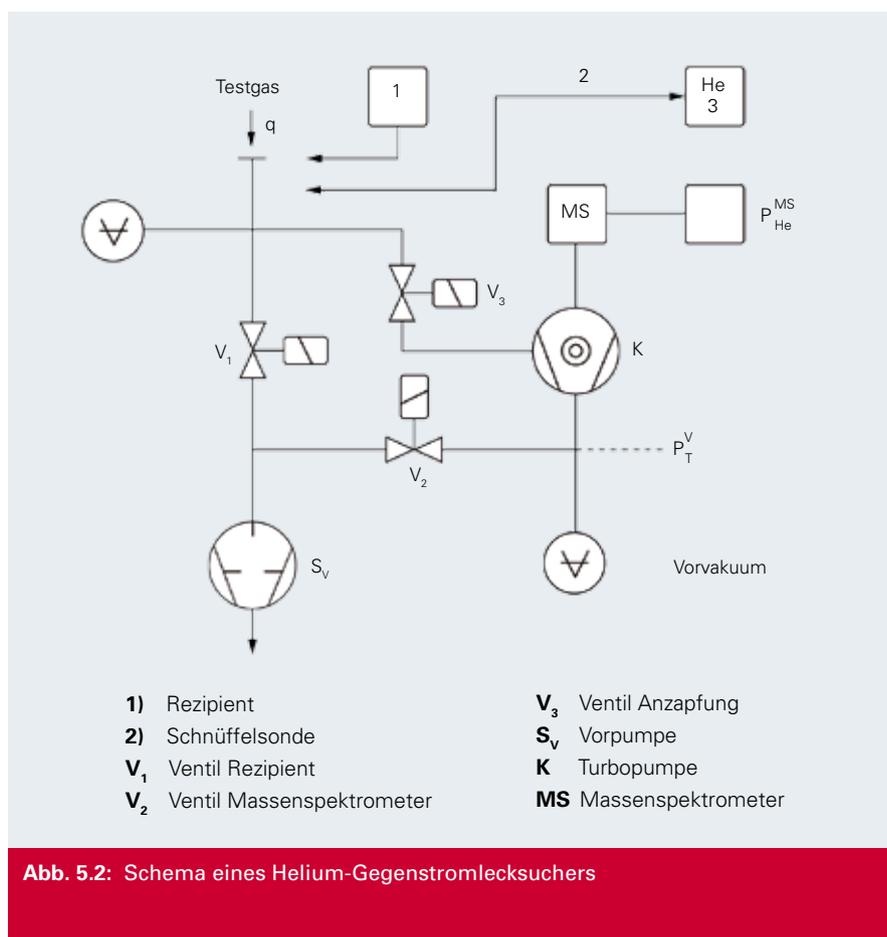
All diese Anforderungen erfüllt das Prüfgas Helium. Es ist als Edelgas nicht chemisch reaktionsfähig. In der atmosphärischen Luft kommt es nur zu 5 ppm vor und ermöglicht deswegen den Nachweis kleinster Leckagen. Es ist leichter als Luft und stellt damit kein gesundheitliches Risiko dar.

5.2 Lecksuche mit Helium

Zum Nachweis von Helium verwendet man Massenspektrometer, die auf das Atomgewicht 4 von Helium eingestellt sind. Massenspektrometer arbeiten nur im molekularen Strömungsbereich, also im Vakuum bei Drücken: $p < 10^{-4}$ mbar. Aus Kostengründen und wegen ihrer Robustheit verwendet man Sektorfeldgeräte. Deren Funktion ist in 4.1.1 beschrieben.

5.2.1 Aufbau eines Helium-Lecksuchers

Helium-Gegenstromlecksucher sind nach dem Schema in Abbildung 5.2 aufgebaut. Ein Massenspektrometer MS ist auf dem Saugflansch einer Turbomolekularpumpe montiert. Eine Vorpumpe S_v evakuiert über das Ventil V_2 die Turbomolekularpumpe. Ein Prüfling 1 wird über den Testgasanschluss bei geöffnetem Ventil V_1 evakuiert.



Die Ventile V_2 und V_1 werden so geschaltet, dass der notwendige Vorvakuumdruck der Turbopumpe immer Vorrang vor der Evakuierung des Prüflings hat. Ist der Prüfling evakuiert, so kann er je nach Druckbereich mit dem Vorvakuum oder über das Ventil V_3 an eine Anzapfung der Turbomolekularpumpe angeschlossen werden. Nun wird Helium von außen auf den Prüfling gesprüht. Dieses dringt zusammen mit der Umgebungsluft durch Lecks in den Prüfling ein. Das im Restgas vorhandene Helium strömt über die Ventile V_1 und V_2 gegen die Pump-richtung durch die Turbopumpe zum Massenspektrometer MS und wird dort nachgewiesen. Man nutzt hierbei die um mehrere Zehnerpotenzen unterschiedlichen Kompressionsverhältnisse der Turbopumpe für Helium und Luft aus.

Während Luft durch das hohe Kompressionsverhältnis der Turbopumpe vom Massenspektrometer ferngehalten wird, kommt dort Helium mit relativ hohem Partialdruck an. Die Turbopumpe wirkt so als selektiver Verstärker für Helium. Man kann deshalb schon bei Drücken < 1 mbar im Prüfling Helium mit dem Massenspektrometer nachweisen. Über verschiedene Anzapfungen an der Turbopumpe (V_3) sowie über deren Betrieb mit verschiedenen Drehzahlen, die das Kompressionsverhältnis exponentiell beeinflussen, kann man einige Zehnerpotenzen des Heliumpartialdruckes und damit auch einen Leckratenbereich zwischen 10 und 10^{-8} mbarl/s abdecken. Für die höchste Empfindlichkeitsstufe des Lecksuchers (Einlass über V_3) muss ein Druck von 10^{-3} mbar im Prüfling erreicht werden.

Durch die vorgeschaltete Turbopumpe arbeitet das Massenspektrometer immer bei sehr niedrigem Totaldruck und ist so gut gegen Verschmutzung und Ausfälle geschützt.

5.2.2 Prüfverfahren

Bei der Lecksuche unterscheidet man zwei Prüfverfahren:

- ▶ Die lokale Lecksuche, die zur Auffindung von Lecks dient
- ▶ Die integrale Lecksuche, bei der die Leckrate von Prüflingen meist zum Zweck der Qualitätssicherung bestimmt wird

Lecksucher sind für zwei Betriebsmethoden ausgerüstet:

- ▶ Die Auspumpmethode, bei der der Prüfling evakuiert wird und Helium von außen einwirkt
- ▶ Die Schnüffelmethode, bei der der Prüfling mit Heliumüberdruck $\Delta p > 100$ mbar gefüllt und das austretende Helium über ein Schnüffelventil (Kapillare, Dosierventil) in den Lecksucher eingesaugt und nachgewiesen wird

5.2.3 Kalibrierung des Lecksuchers

Zur Bestimmung von Leckraten muss der Lecksucher kalibriert werden. Man benutzt dazu ein käufliches Testleck, einen kleinen, heliumgefüllten Behälter mit einem Absperrventil, das die definierte Gasmenge abgibt. Dieses ist meistens in den Lecksucher integriert oder wird an die Saugseite des Lecksuchers angeschlossen. Für eine Kalibrierung ist oft ein entsprechendes Ablaufprogramm eingebaut, das die Kalibrierung automatisch vornimmt.

Für genaue Messungen sollte vor jedem Einsatz eine Kalibrierung vorgenommen werden. Für den Test von großen Prüflingen, bei denen zusätzliche Vakuumpumpen im Einsatz sind, ist es sinnvoll, ein externes Testleck zu verwenden. Die Messgenauigkeit kann vom Anbringungsort des Testlecks abhängen. Deshalb sind die Strömungsverhältnisse innerhalb des Vakuumbereichs zu berücksichtigen.

5.2.4 Lokale Lecksuche

Die lokale Lecksuche dient dazu, die Undichtigkeiten an einem Prüfling zu finden.

Bei der Auspumpmethode schließt man den Prüfling (Behälter) an den Lecksucher an und sprüht für kurze Zeit mit einer Sprühpistole Helium auf eine verdächtige Stelle. Ist der Druck innerhalb des Prüflings im molekularen Strömungsbereich, also $< 10^{-3}$ mbar, erhält man wegen der hohen Geschwindigkeit der He-Atome sofort eine Anzeige.

Bei höheren Drücken, besonders im laminaren Strömungsbereich ab 1 mbar, wird die Anzeigegeschwindigkeit sehr viel langsamer und durch das Saugvermögen der Vorpumpe des Lecksuchers bestimmt.

Bei der Schnüffelmethode (Abbildung 5.3) füllt man den Prüfling (3) mit Heliumüberdruck. Eine Schnüffelsonde (2) ist mit dem Testgasanschluss verbunden. Das durch Lecks im Prüfling austretende Helium kann durch Abschnüffeln mit der Sonde nachgewiesen werden.

Mithilfe der lokalen Lecksuche kann man einzelne Leckstellen auffinden. Man kann aber nicht die Summe aller Undichtigkeiten bestimmen. Dieses Verfahren ist also für eine Gut-Schlecht-Aussage als Mittel der Qualitätssicherung nur bedingt geeignet.

Schnüffellecksuche	Vakuullecksuche
Abschnüffeln des mit Helium gefüllten Testobjektes	Absprühen mit Helium
Überdruckfester Prüfling	Vakuumfester Prüfling
Nachweisgrenze $5 \cdot 10^{-8}$ mbar l/s	Nachweisgrenze $5 \cdot 10^{-12}$ mbar l/s



Abb. 5.3: Lokale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuummethode

5.2.5 Integrale Lecksuche

Die integrale Lecksuche dient der Bestimmung der Summe aller Undichtigkeiten (Gesamtleckrate) des Prüflings. Auch hier kann man mit der Auspumpmethode und der Schnüffelmethode arbeiten. Bei der Auspumpmethode hüllt man den Prüfling ein, füllt ihn mit Helium und evakuiert den umgebenden Behälter. Oder man evakuiert den Prüfling (Vakuumanlage) und füllt den Umgebungsraum mit Helium. Dabei kann die Umhüllung eine Plastikfolie oder, bei kommerziellen Prüfanlagen, auch ein fester Behälter sein.

Bei der Schnüffelmethode füllt man den Prüfling (z. B. den Kraftstofftank eines Autos) mit Helium und saugt aus dem umgebenden Behälter mit der Schnüffelsonde des Lecksuchers eine bestimmte Gasmenge ab (Abbildung 5.4). Mit der Schnüffelmethode kann bestenfalls ein grober Nachweis für die Dichtheit des Prüflings erbracht werden. Zur quantitativen integralen Leckratenmessung ist die Methode nicht geeignet.

Beim Prüfen mit Überdruck im Prüfling reicht ein Druckunterschied $\Delta p = p_1 - p_2 = 100$ mbar aus. Nimmt man für die so ermittelte Leckrate $Q_{\Delta p}$ Laminarströmung in der Leckstelle an, kann man diese auf den Wert Q_l für Vakuummessung mit Atmosphärendruck p_0 außen umrechnen, und zwar nach der Formel:

Formel 5-1
Leckratenumrechnung bei
Differenzdruckmessung

$$Q_l = \frac{Q_{\Delta p} \cdot p_0^2}{p_1^2 - p_2^2}$$

Diese Umrechnungsformel ist aus Formel 1-14 und Formel 1-21 abgeleitet.

Schnüffellecksuche	Vakuumlecksuche
Überdruckfester Prüfling	Überdruckfester Prüfling
Verwendung einer Schnüffelsonde	Prüfling mit Helium gefüllt
Nachweisgrenze $5 \cdot 10^{-8}$ mbar l/s	Nachweisgrenze $5 \cdot 10^{-12}$ mbar l/s

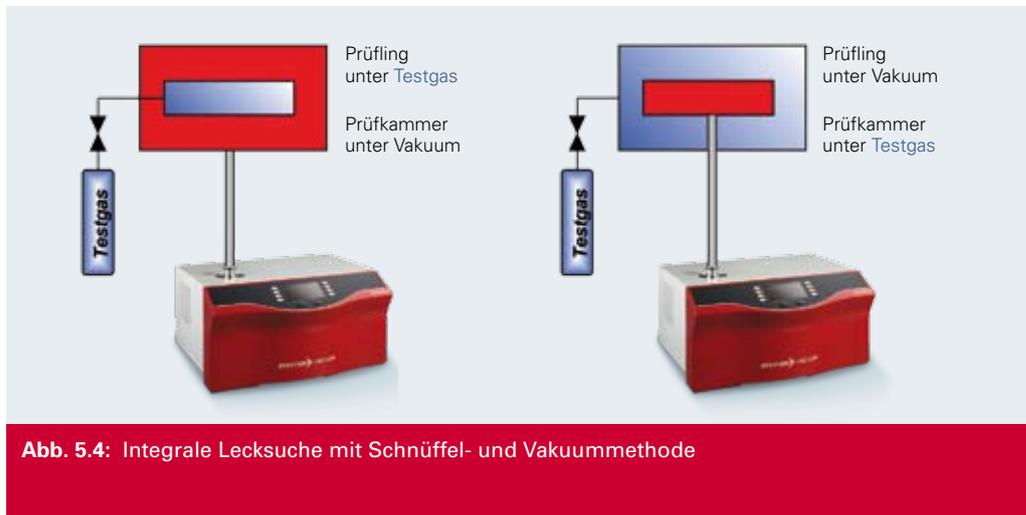


Abb. 5.4: Integrale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuummethode

5.3 Anwendungshinweise

Vor dem Beginn einer jeden Lecksuche mit Helium sind vom Anwender einige grundsätzliche Fragen zu klären:

- ▶ Ist der Prüfling vakuumfest?
- ▶ Ist der Prüfling überdruckfest?
- ▶ Soll die gesamte Leckrate des Prüflings ermittelt werden?
- ▶ Soll nur der Ort der Undichtigkeit ermittelt oder soll diese quantifiziert werden?

Aus den unter 5.2.2 bis 5.2.5 angegebenen Methoden kann ein passendes Prüfverfahren ausgewählt werden.

Lecksuche mit Helium

Vor Beginn wird der Lecksucher kalibriert. Dazu wird im Pfeiffer Vacuum Lecksucher SmartTest ein eingebautes Heliumtestleck verwendet. Die Kalibrieroutine wird durch Knopfdruck gestartet und läuft automatisch ab. Nach der Kalibrierung ist der Lecksucher bereit. Zur Lecksuche mit der Vakuummethode eignet sich am besten die Verwendung der akustischen Anzeige. Hier steigt die Frequenz des Signaltons bei erhöhter Leckrate an, und so wird beim Besprühen des Prüflings keine zweite Person zum Ablesen benötigt.

Grundsätzlich ist bei der Verwendung von Helium als Testgas auf Folgendes zu achten:

- ▶ Helium ist leichter als Luft. Deshalb sollte bei der Anwendung von Helium in der Atmosphäre immer an der höchsten Stelle des Prüflings mit der Lecksuche begonnen werden
- ▶ Es sollten keine größeren Mengen des Prüfgases versprüht werden, da es sonst zu erhöhten Heliumgehalten in der Umgebungsluft kommen kann und permanent nicht vorhandene Lecks vorgetäuscht werden

- Da sich Helium in der Vorpumpe, im Auspuffraum und im Öl ansammeln und von dort wieder in den Vorvakuumbereich gelangen kann, ist bei großen Leckraten der Gasballast in der Vorpumpe einzuschalten. Dies geschieht bei der Wahl der hohen Messbereiche im Lecksucher meistens automatisch. Bei Hilfspumpen muss der Gasballast von Hand eingeschaltet werden

Bei der Vakuummethode ist es notwendig, ein ausreichend gutes Vakuum zu erzeugen, damit der Lecksucher mit der höchsten Empfindlichkeit betrieben werden kann.

Deshalb müssen bei großen Prüflingen oft zusätzliche Vakuumpumpen (Hilfspumpen) mit hohem Saugvermögen benutzt werden. Der Lecksucher soll in diesem Fall direkt am Rezipienten und hier am Pumpstutzen für die große Vakuumpumpe angeschlossen werden. Wenn nicht, dann zumindest unmittelbar daneben.

Bei der Bestimmung der Leckrate ist bei laufender Hilfspumpe die gemessene Leckrate um das Saugvermögensverhältnis von Hilfspumpe zu Lecksucher zu erhöhen.

Bei Arbeiten mit dem Schnüffelventil muss der Druck im Behälter mindestens um 100 mbar höher liegen als der Umgebungsdruck. Durch die starke Vermischung mit Luft ist die Empfindlichkeit der Schnüffelmethode geringer als die der Vakuummethode. Außerdem ist die verzögerte Reaktion des Lecksuchers auf das einströmende Helium zu beachten.

5.4 Portfolio

Tabelle 5.1: Auswahltabelle Lecksucher SmartTest

Lecksucher	Mode	Einsatz des Prüflings		Volumen des Prüflings		Nachweisbare Leckrate in mbar l/s		Bemerkung
		Vakuum	Überdruck	> 20 l	< 20 l	< $1 \cdot 10^{-7}$	> $1 \cdot 10^{-7}$	
SmartTest HLT 550	Vakuum	●	▲	■	✘	●	●	Externe Vorvakuumpumpe erforderlich
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	
SmartTest HLT 560	Vakuum	●	▲		●	●	●	Drehschieberpumpe S = 5 m ³ /h
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	
SmartTest HLT 565	Vakuum	●	▲	●	●	●	●	Drehschieberpumpe S = 30 m ³ /h
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	
SmartTest HLT 570	Vakuum	●	▲		●	●	●	Trockene Vorvakuumpumpe S = 2 m ³ /h
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	
SmartTest HLT 572	Vakuum	●	▲		●	●	●	Trockene Vorvakuumpumpe S = 7,5 m ³ /h
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	
SmartTest HLT 575	Vakuum	●	▲	●	●	●	●	Trockene Vorvakuumpumpe S = 26 m ³ /h
	Schnüffeln		●	●	●	●	●	

- geeignet
- ▲ mit Prüfkammer
- externe Vorpumpe mit S > 10 m³/h
- ✘ externe Vorpumpe mit S < 10 m³/h

Pfeiffer Vacuum bietet den Lecksucher SmartTest mit folgender Ausstattung an:

- ▶ Gegenstromlecksucher mit Turbopumpe und Sektorfeldmassenspektrometer
- ▶ Eichleck mit automatischer Kalibrierung
- ▶ Schnüffellecksonde
- ▶ Digitalanzeige mit automatischer Messbereichswahl
- ▶ Akustische Leckanzeige über die Tonhöhe eines Signaltones
- ▶ Verschiedenartige Vorpumpen

Der SmartTest HLT 550 erlaubt den Anschluss jeder geeigneten Vorpumpe und ist damit z. B. bestens zur Integration in Lecksuchanlagen geeignet.

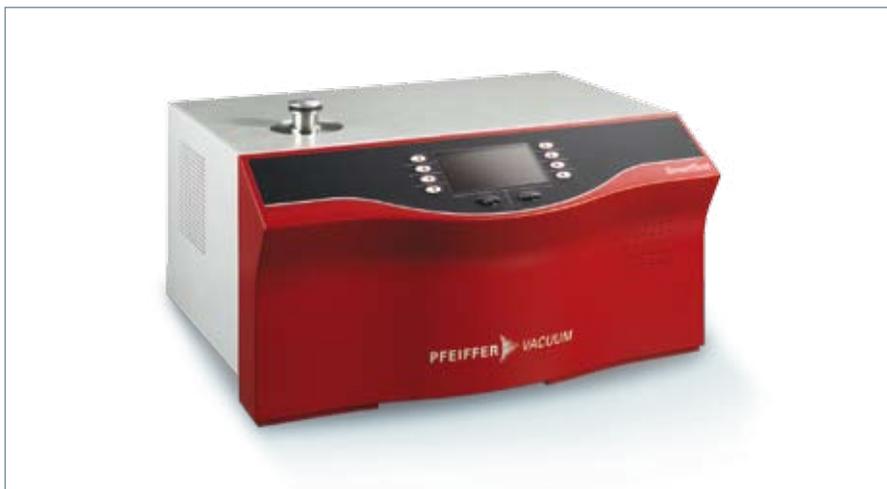


Abb. 5.5: Lecksucher SmartTest HLT 560

Beim SmartTest HLT 560 (Abbildung 5.5) handelt es sich um einen Helium-Lecksucher mit einer eingebauten Drehschieberpumpe und einem Saugvermögen von 5 m³/h. Mit dieser Konfiguration ist die Lecksuche im Vakuummodus auch für größere Prüflinge in angemessener Zeit möglich (Tabelle 5.1). Natürlich kann der HLT 560 auch im Schnüffelmodus an mit Helium beaufschlagten Behältern eingesetzt werden.

Zusammen mit größeren Vorpumpen ist der Lecksucher SmartTest auf einen Wagen montiert. Folgende Varianten sind lieferbar:

- ▶ Mit 30 m³/h Drehschieberpumpe
- ▶ Falls Ölfreiheit verlangt wird: mit trockenen Vorpumpen verschiedener Größe (Abbildung 5.6)
- ▶ Mit Bypass-Option bei der mit einer zusätzlichen Vorpumpe große Behälter vorevakuiert werden können. Während dieser Phase trennt ein vorgeschaltetes Ventil den Lecksucher vom Prüfling und vermeidet so die Verschmutzung des Lecksuchers
- ▶ Mit Fernbedienung und Schnüffelsonde als Zubehör

Die hier beschriebenen Varianten sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt.



Abb. 5.6: Lecksucher SmartTest, HLT 572 mit Bypass und trockener Vorpumpe XtraDry™

6 Ventile und Bauelemente

6.1 Allgemeines

Eine Vakuumanlage enthält eine Vielzahl unterschiedlicher Einzelbauteile wie z. B. Rezipienten, Vakuumpumpen, Messgeräte, Absperrorgane, Filter, Abscheider usw., die zu einer Einheit zusammengefügt werden müssen. Man unterscheidet dabei lösbare, mit Dichtungen versehene und nicht lösbare Verbindungen. In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Verbindungsarten beschrieben und aufgezeigt, worauf bei der Konstruktion und der Auswahl zu achten ist.

6.2 Dichtungen

Werden Bauelemente in der Vakuumtechnik lösbar zusammengefügt, müssen Dichtungen verwendet werden, damit aus der Umgebung keine Luft ins Vakuum einströmt. Dazu gibt es, je nach Anwendung und Druckbereich, verschiedene Ausführungen.

O-Ringe / Rundgummiringe

Von allen Dichtungsformen werden O-Ringe am häufigsten verwendet. Es gibt sie in verschiedenen Materialien, meist als Elastomere mit einer Härte im Bereich von 65 bis 80 Shore. Ihre Eignung als gute Vakuumdichtungen beruht darauf, dass sie in der Lage sind, sich den feinen Unebenheiten der Dichtungsflächen anzupassen. Ihre Oberfläche muss frei von Trennfett oder Talkum, glatt und ohne Risse oder Kratzer sein. Je nach Anwendung kann der O-Ring im Grobvakuumbereich mit dem dünnen Film eines Fettes mit niedrigem Dampfdruck (Silikonfett, Fomblinfett oder Fett auf Mineralölbasis) überzogen werden. Bei trockenem Einbau müssen die Oberflächengüte und die Sauberkeit von Dichtflächen und Dichtungsmaterial besondere Beachtung finden. Der Schnurdurchmesser der O-Ringe kann 2 bis 12 mm betragen. Bei vielen Verbindungen werden 5 mm Ringe verwendet, Ringe mit Schnurdurchmessern von 8, 10 oder sogar 12 mm nur bei sehr großen Dichtungen. Die O-Ringe sollen nahtlos gepresst sein. Die Teilfuge des Presswerkzeuges liegt in der Ebene des Ringdurchmessers und wird meist durch Schleifen entfernt.

Der O-Ring wird im Allgemeinen als statische Dichtung verwendet. Wenn eine dynamische Beanspruchung vorgesehen ist, sollte man Präzisions-O-Ringe verwenden, die dafür speziell gefertigt werden. Auf die Dimensionierung der Nuten für diesen Zweck soll hier nicht eingegangen werden. Neben der Verwendung in Verbindung mit Zentrierringen oder Dichtscheiben, können O-Ringe auch für axiale oder radiale Nuten verwendet werden. In den meisten Fällen werden die O-Ringe in Nuten eingelegt und zwischen Flanschen verpresst, wobei im Allgemeinen ein glatter Flansch und ein solcher mit Nut verwendet werden. Die Dimensionierung der Nuten muss sorgfältig nach folgenden Kriterien erfolgen:

- ▶ Die Verpressung, das ist das Verhältnis (Breite/Höhe)-1, darf bei Schnurdurchmessern < 3 mm maximal 30 % und bei Durchmessern von 5–10 mm 20–15 % betragen
- ▶ Der Füllfaktor sollte zwischen 79 und 91 % liegen
- ▶ Der Innendurchmesser der Nut sollte gleich oder nur geringfügig größer als der des O-Ringes sein
- ▶ Der Außendurchmesser der Nut darf größer sein als der Außendurchmesser des O-Ringes im verpressten Zustand

Werden diese Bedingungen eingehalten, können die Dichtungen problemlos mehrfach verwendet werden. Bei Überfüllung der Nut werden die O-Ringe beschädigt und es kann zum Verbiegen der Flansche kommen, da das Ringmaterial inkompressibel ist. Die folgende Tabelle zeigt Nutdimensionen wobei die Innendurchmesser der Nut und die der O-Ringe gleich sind.

Tabelle 6.1: O-Ringnuten Dimensionierungstabelle für axiale, statische Abdichtung

Schnur Ø	Toleranz +/-	Nutbreite	Toleranz +/-	Nuttiefe	Toleranz +/-	Mittlere Verpressung	Maximaler Füllgrad
1,00	0,08	1,45	0,05	0,70	0,05	30,0 %	86,3 %
1,20	0,08	1,65	0,05	0,85	0,05	29,2 %	88,4 %
1,50	0,08	2,00	0,05	1,10	0,05	26,7 %	86,3 %
1,60	0,08	2,10	0,05	1,20	0,05	25,0 %	85,3 %
1,78	0,08	2,30	0,05	1,30	0,05	27,0 %	88,5 %
2,00	0,10	2,50	0,10	1,50	0,05	25,0 %	90,3 %
2,20	0,10	2,80	0,10	1,65	0,05	25,0 %	88,0 %
2,40	0,10	3,00	0,10	1,80	0,05	25,0 %	89,1 %
2,50	0,10	3,10	0,10	1,90	0,05	24,0 %	88,4 %
2,62	0,10	3,20	0,10	2,00	0,05	23,7 %	89,2 %
3,00	0,13	3,70	0,10	2,30	0,05	23,3 %	87,3 %
3,35	0,13	4,10	0,10	2,60	0,05	22,4 %	86,4 %
3,50	0,13	4,30	0,10	2,70	0,05	22,9 %	86,4 %
3,53	0,13	4,30	0,10	2,80	0,05	20,7 %	84,7 %
4,00	0,15	5,00	0,10	3,20	0,05	20,0 %	81,4 %
4,50	0,15	5,50	0,10	3,60	0,05	20,0 %	83,0 %
5,00	0,15	6,00	0,10	4,00	0,05	20,0 %	84,3 %
5,34	0,15	6,50	0,10	4,30	0,05	19,5 %	82,3 %
6,00	0,15	7,20	0,10	4,90	0,10	18,3 %	83,0 %
7,00	0,14	8,50	0,10	5,80	0,10	17,1 %	80,4 %
8,00	0,14	9,50	0,10	6,70	0,10	16,3 %	81,0 %
10,00	0,14	12,00	0,10	8,50	0,15	15,0 %	79,0 %

Zur Erleichterung der Montage wird der Durchmesser der Ringnut meist etwas größer gewählt als der des O-Ringes. So bleibt der O-Ring auch während der Montage in der Nut. Man kann einen Ring in der Länge unbedenklich um 5 %, jedoch maximal um 10 % dehnen. Wenn der O-Ring auf einem Zentrierring verwendet wird, z. B. bei den ISO-K- und ISO-KF-Flanschverbindungen, muss der Zentrierring so gestaltet sein, dass er den O-Ring richtig positioniert, stützt und das Zusammenpressen des O-Ringes begrenzt. Es gibt Zentrierringe mit Innenstützring, mit Außenstützring (für Überdruckenwendungen) sowie mit Innen- und Außenring.

Zum Abdichten von Schrauben, z. B. von Öleinfüll- oder Ölablassschrauben, wird der O-Ring in Ecklage (Abbildung 6.1) eingebaut. Das Gewinde hat am oberen Ende eine Fase von 45°, in die der O-Ring eingelegt wird. Auch hier soll der Füllfaktor wie beim axialen Einbau 79–91 % betragen. Der O-Ring wird dann durch die Fläche der Schraube zusammengepresst. Bei dieser Einbauweise sollte der Ring gefettet werden, damit er beim Festziehen der Schraube nicht zerstört wird.

- 1) Nuttiefe ~ siehe Tabelle 6.1
- 2) Nutbreite → siehe Tabelle 6.1

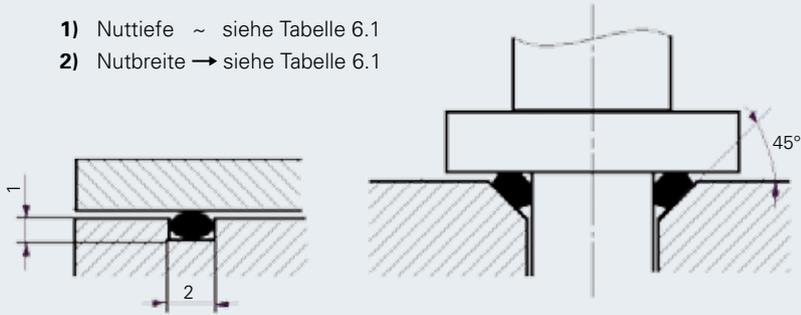


Abb. 6.1: O-Ring in Nut und in Ecklage



Zentrierring mit Elastomerdichtring (ISO-KF)



Zentrierring mit Elastomerdichtring und Außenring (ISO-K)

Abb. 6.2: Zentrierringe

Trapezdichtungen

Elastomerdichtungen mit trapezförmigem oder ähnlichem Querschnitt werden z. B. bei Ventilsitzen oder auch bei Deckeln und Türen von großen Vakuumkammern verwendet. Hier werden sie stramm eingepasst, damit sie beim Abheben des Ventiltellers bzw. beim Öffnen der Kammertür nicht herausgezogen werden. Da bei größeren Kammerabmessungen enorme Flächenbelastungen auftreten können, wird die Deformation der Dichtungen durch die Anbringung von Distanzstücken bei großen Kammertüren in den gewünschten Grenzen gehalten.

Flachdichtungen sind in der Vakuumtechnik möglichst zu vermeiden, weil der Druck, der erforderlich ist, damit das Dichtungsmaterial alle Unebenheiten der Oberfläche ausfüllt, nur schwer zu erreichen ist.

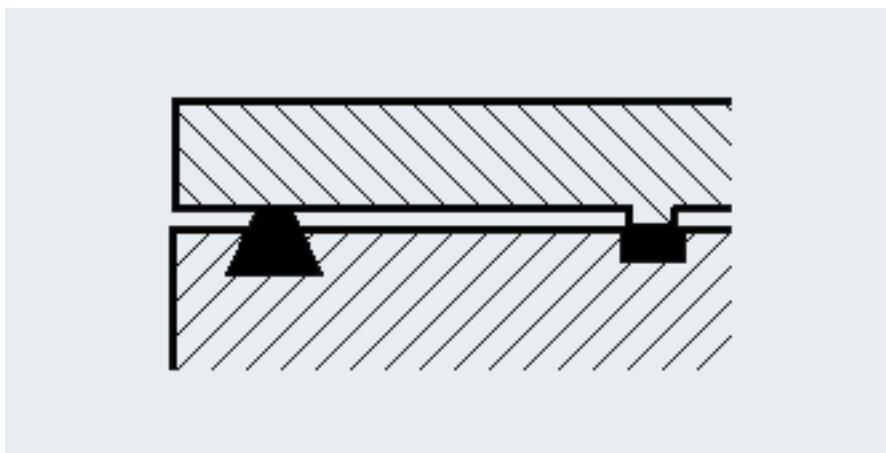


Abb. 6.3: Trapezdichtung mit Distanzstück

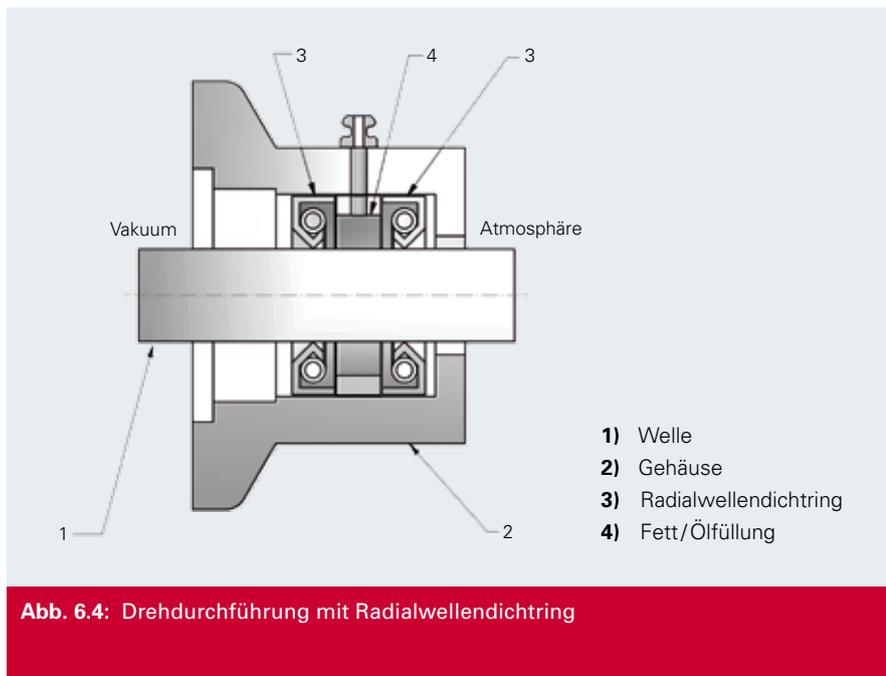
Wellendichtringe / Hutmanschetten

Für die Abdichtung von umlaufenden Wellen werden Radialwellendichtringe oder Hutmanschetten verwendet (Abbildung 6.4). Hierbei ist zu beachten, dass grundsätzlich Wellendichtringe mit vollständig von Gummiwerkstoff überzogenem Metallring Verwendung finden. Zwar sind die Abdichtungen im statischen Zustand recht dicht, es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Leckrate der Abdichtung während der Bewegung der Welle deutlich höher ist. Hutmanschetten sind nur für langsam laufende, z. B. für von Hand drehbare Durchführungen geeignet.

Metалldichtungen

In Anwendungen mit höheren Temperaturen (z. B. Ausheizen von Vakuumkammern) oder bei hoher Strahlenbelastung und überall dort, wo es auf sehr niedrige Permeationsraten ankommt, müssen anstelle der Elastomerdichtungen Metalledichtungen eingesetzt werden. Materialien, die für Metalledichtungen häufig zum Einsatz kommen sind Kupfer, Aluminium und Indium, vereinzelt auch Silber und Gold, wobei Gold, Silber und Indium meist als Drahtdichtungen ausgeführt sind, während es Aluminium neben der Drahtform auch als Profildichtung gibt. Bei allen Metalledichtungen ist darauf zu achten, dass die spezifischen Anpresskräfte (bis zu 6.000 N/cm Dichtungslänge) eingehalten werden.

Für UHV-Anlagen finden Schneidkantendichtungen aus Kupfer Verwendung. Sie werden zwischen Conflat®-Flansche eingelegt. Bei Temperaturen $> 200\text{ °C}$ geht man zu versilberten Kupferdichtungen über. Hier dient die Silberschicht als Diffusionssperre gegen den Luftsauerstoff, um damit die Oxidation des Kupfers zu verhindern. Metalldichtungen können nur einmal verwendet werden. Als Metalldichtung kommt auch Indium zum Einsatz. Es wird als Draht zwischen glatte Flansche gelegt und empfiehlt sich durch seine leichte Verschweiß- und Verformbarkeit, ist aber wegen seines niedrigen Schmelzpunktes nicht hoch ausheizbar. Für die Verwendung von Metall als Dichtungswerkstoff können neben der Temperaturbeständigkeit auch andere Gründe, z. B. die Strahlenbeständigkeit, maßgebend sein.



Fette, Öle

Als echte Dichtungswerkstoffe finden Fette nur noch in der Glastechnik oder als Notbehelf für leicht schadhafte Abdichtungen Verwendung. Öl dient neben dem Einsatz als Dichtmittel in ölgedichteten Vakuumpumpen und Drehdurchführungen praktisch nur noch als Hilfsmittel bei der Abdichtung von lösbaren Verbindungen im Grob- und Feinvakuumbereich.

Tabelle 6.2: Vergleich von Dichtungsmaterialien

Werkstoff	Anpresskraft /Länge	Maximale Temperatur
CR (Neopren)	1 N/mm	100 °C
FPM	1 N/mm	150 °C
Indium	7 N/mm	100 °C
Aluminium	30 – 200 N/mm	200 °C
Kupfer	150 – 600 N/mm	450 °C
Gold	100 – 500 N/mm	800 °C

6.3 Lösbare Verbindungen

Die Einzelkomponenten einer Vakuumanlage, z. B. Pumpen, Ventile, Messgeräte, Vakuumkammern usw., werden direkt oder durch Schläuche bzw. Rohre miteinander verbunden. Die Anschlüsse dieser Teile untereinander müssen vakuumdicht und lösbar sein. Bei der Konstruktion einer Vakuumanlage sollten jedoch möglichst wenig lösbare Verbindungen vorgesehen werden, da sie im Vergleich zu nicht lösbaren Verbindungen eine deutlich häufigere Quelle für potenzielle Undichtigkeiten darstellen.

Als Verbindungsstücke kommen Rohre und Rohrbauteile aus Aluminium, Stahl und Edelstahl zum Einsatz. Für flexible Verbindungen sind Metallschläuche aus Edelstahl den Schläuchen aus dickwandigem Gummi oder aus thermoplastischem Kunststoff vorzuziehen. Ab dem unteren Feinvakuumbereich sind sie unabdingbar. Zur Verringerung der Vielzahl der existierenden Abmessungen und Formen hat man sich auf eine international gültige Nennweitenreihe festgelegt. Die ursprünglich vom Herstellerverband PNEUROP ins Leben gerufene und später von der ISO übernommene Nennweitenreihe lautet:

- ▶ 10 - 16 - 25 - 40 - 63 - 100 - 160 - 250 - 400 - 630 - 1000 und wird durch die Nebenreihe
- ▶ 20 - 32 - 50 - 80 - 125 - 200 - 320 - 500 - 800 ergänzt.

Kleinflansche

Die Kleinflanschverbindung (ISO-KF nach ISO 2861/1/DIN 28403), die aus zwei ebenen Flanschen mit konischen Rückseiten, einem Zentrierring, einem Dichtring und einem Spannring (Klammer) besteht, gibt es in den Nennweiten DN 10, 16, 25, 40 und 50 ISO-KF, wobei DN 50 ISO-KF aus der Nebenreihe stammt und immer seltener verwendet wird.

Eine Adaption an Bauteile mit einer der alten Nennweiten 20 und 32 ist mit einem Reduzierzentrierring oder einem Außenzentrierring DN 25/20 ISO-KF bzw. DN 40/32 ISO-KF möglich. Kleinflansche können auch mit Pratzen an Planflächen angedrückt werden (Abbildung 6.5).

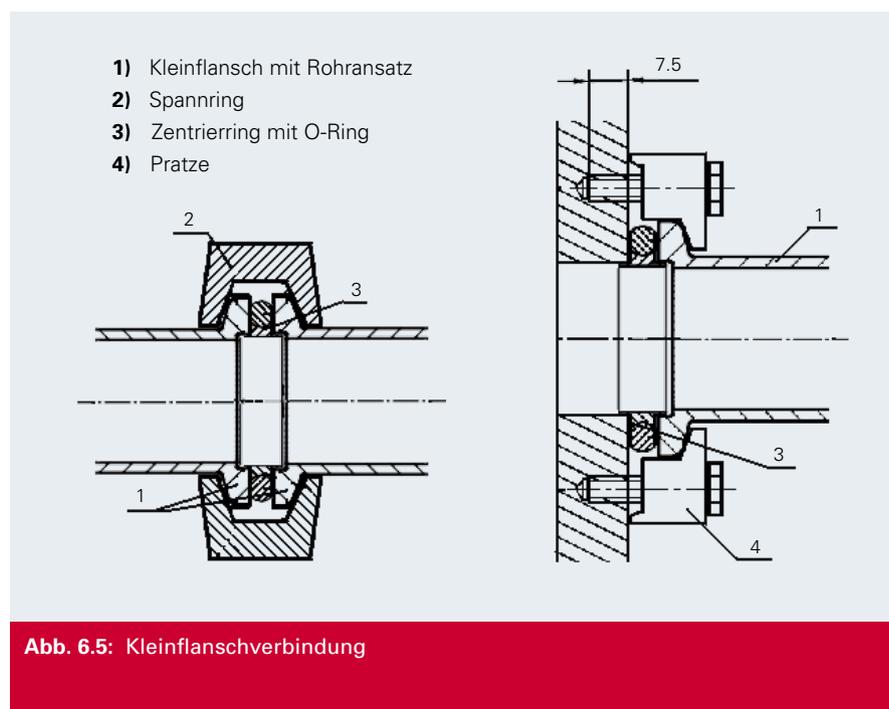


Abb. 6.5: Kleinflanschverbindung

Fest- und Klammerflansche

Die Norm ISO 1609.4/DIN 28404 legt Festflansche für die Nennweiten DN 10–1000 ISO-F und Klammerflansche für die Nennweiten DN 10–630 ISO-K fest, wobei für die Nennweiten DN 10–50 meistens die Kleinflanschbauteile bevorzugt werden. Wie bei den Kleinflanschen werden die Fest- und Klammerflansche mit Zentrierringen anhand einer Dichtung zwischen den planen Dichtflächen der Flansche abgedichtet. Die Befestigung der Flansche erfolgt mittels spezieller Klammern (Klammerflansche) oder mit Schrauben bzw. Bolzen (Festflanschen). Durch die Verwendung eines Überwurfflansches, der mittels Sprengring in einer Nut am Klammerflansch gehalten wird, oder auch mittels Pratzen ist es möglich, Klammerflansche auch mit Festflanschen zu verbinden. Bei der Montage von Turbomolekularpumpen mit Klammerflanschen sind aus Sicherheitsgründen die speziellen Angaben des Herstellers in den Betriebsanleitungen zu beachten.

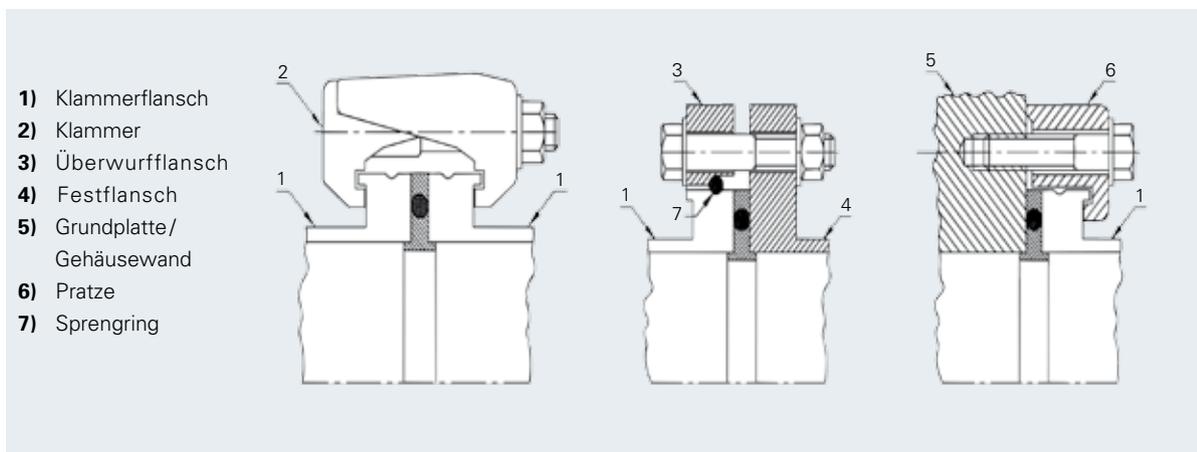


Abb. 6.6: Klammer- und Festflanschverbindungen

DIN-Flansche

Da die Fest- und Klammerflanschverbindungen nicht für Überdruckeranwendungen ausgelegt sind, es aber Verfahrenstechniken gibt, bei denen die Verbindungen sowohl mit Vakuum als auch mit Überdruck beaufschlagt werden, wird nach wie vor der DIN-Flansch eingesetzt. DIN 2501 (ND 6) und DIN 2502 (ND 10) legen das Flanschbild dieser Flansche fest. Für eine Verbindung müssen jeweils ein Flansch mit O-Ringnut und ein Flansch mit glatter Dichtfläche gepaart werden. Ein weiterer Nachteil dieser Flansche gegenüber den ISO-Flanschen ist der weitaus höhere Bedarf an Material und Platz.

UHV-Flansche

Für UHV-Anwendungen werden Flansche mit Schneidkanten und Kupferdichtungen, auch Conflat®-Flansche oder CF-Flansche genannt, eingesetzt. Zwischen zwei Flanschen wird ein Kupferring gelegt. Die konzentrisch umlaufenden Schneidkanten der Flansche dringen in das Kupfer ein und bilden eine metallische Abdichtung, die sich durch eine extrem niedrige Leck- und Permeationsrate sowie eine hohe Temperaturbeständigkeit auszeichnet. Die Flansche sind nach ISO TS 3669 genormt. Eine ausreichende Anzahl von Schrauben sorgt für den notwendigen hohen Anpressdruck. Einmal verwendete Kupferdichtungen können nicht wieder eingesetzt werden.

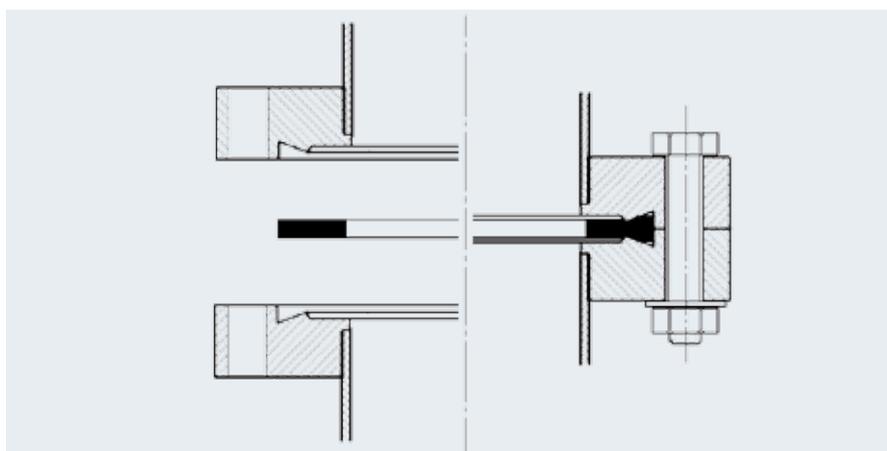


Abb. 6.7: Conflat®-Flanschverbindung

Glasverbindungen

Vakuumsysteme in der Glastechnik nutzen die, nur in kleinen Nennweiten eingesetzte Glasverbindung, oder auch Schliffverbindung. Die aus dem konischen Kernschliff und dem entsprechenden Mantelschliff bestehenden Verbindungen werden durch den äußeren Luftdruck zusammengehalten und durch Vakuumpfett abgedichtet.

Portfolio

Pfeiffer Vacuum bietet alle gängigen Normflansche und sonstige Verbindungsstücke an.

6.4 Nicht lösbare Verbindungen

Nicht lösbare Verbindungen in der Vakuumtechnik werden durch Schweißen, Hartlöten, Verschmelzen oder durch Metallisieren oder Sintern mit nachträglichem Hartlöten erzielt. Neuerdings werden für Anwendungen außerhalb der UHV-Technik auch Teile mit vakuumbeständigen Klebern zusammengefügt. Die ausgewählte Verbindungstechnik muss für die Hauptanforderungen bezüglich der mechanischen Festigkeit, der Temperatur, der Temperaturwechselbelastung sowie der notwendigen Gasdichtheit entsprechend ausgelegt sein. In der Vakuumtechnik kommen mehr oder weniger oft Materialpaarungen wie Metall/Metall, Glas/Glas, Glas/Metall, Metall/Keramik und Glas/Keramik vor. Am häufigsten werden Metalle durch Schweißen und Hartlöten miteinander verbunden. In Glasapparaturen werden die einzelnen Glasbauteile durch Verschmelzen zusammengebracht. Weniger häufig sind nicht lösbare Verbindungen von Metall und Glas durch Verschmelzung bzw. Metallisierung und Verschmelzung oder die Verbindung von Metall und Keramik, die durch Metallisierung bzw. Sinterung hergestellt wird.

Schweißverbindungen

Für Vakuumapparaturen werden meist Teile aus Stahl und Edelstahl für Behälter und Verbindungen zusammengeschweißt. Darüber hinaus ist es auch möglich, Aluminiumteile miteinander zu verschweißen.

Damit die hergestellten Schweißnähte vakuumdicht sind, muss einwandfreies Ausgangsmaterial ohne Risse und Lunker verwendet werden, dessen Oberflächen entfettet und glatt sind. Außerdem ist eine besondere, mitunter von normalen Schweißverbindungen außerhalb der Vakuumtechnik abweichende geometrische Gestaltung erforderlich. Überall dort, wo es konstruktiv möglich ist, sind Innenschweißnähte vorzusehen, um vakuumseitige Spalte und Risse, sogenannte latente Lecks, zu vermeiden.

Ist dies nicht möglich, muss die Schweißnaht bis zur Vakuumseite hin durchgeschweißt werden. Eine atmosphärenseitige Zusatznaht erhöht dort, wo es erforderlich ist, die mechanische Stabilität. Dabei ist es wichtig, diese Zusatznaht nicht durchgehend auszuführen, damit im Bedarfsfall eine Lecksuche vorgenommen werden kann und es zu keinen Lufteinschlüssen kommt. Neben dem WIG-Schweißverfahren spielt in der Vakuumtechnik die Mikroplasma-schweißung vor allem zum Verschweißen sehr dünnwandiger Bauteile sowie in steigendem Maße die im Vakuum durchzuführende Elektronenstrahlschweißung eine Rolle.

Hartlötverbindungen

Neben dem Schweißen setzt man auch das Hartlötverfahren zum Verbinden von Metallen ein. In der Vakuumtechnik kommen fast ausschließlich Hartlötverbindungen mit Löttemperaturen $> 600\text{ °C}$ zum Einsatz. Um beim Löten auf stark korrosive Flussmittel, meist mit hohem Dampfdruck, verzichten zu können und um oxidfreie Verbindungen mit hoher Festigkeit zu erhalten, wird der Lötprozess im Vakuum oder in einer sauberen Inertgasatmosphäre ausgeführt. Weichlötverbindungen sind für Vakuumanwendungen nicht geeignet. Sie sind in der Regel nicht ausheizbar, haben eine geringere mechanische Festigkeit und enthalten häufig neben Zinn auch andere Legierungsbestandteile mit hohem Dampfdruck.

Verschmelzungen

Das Verfahren des Verschmelzens bietet sich vor allem für das Verbinden von Bauteilen aus Glas (in Glasapparaturen) und für Glas-Metall-Verbindungen an. Glas-Metall-Verschmelzungen haben besonders bei der Herstellung von vakuumdichten Stromdurchführungen, bei ausheizbaren Schaugläsern und bei der Herstellung von Vakuummessröhren eine große Bedeutung. Will man Glas-Metall-Übergänge verschmelzen, müssen die Materialien so ausgewählt werden, dass deren Wärmeausdehnungskoeffizienten über einen weiten Temperaturbereich möglichst gut übereinstimmen. Dafür wurden zahlreiche Speziallegierungen entwickelt, die unter Handelsnamen wie Fernico, Kovar, Vacon, Nilo u. a. bekannt sind. Schwierig auszuführen sind Verschmelzungen mit Quarzglas, da dieses eine sehr niedrige Wärmeausdehnung besitzt, die von keinem Metall und von keiner Metalllegierung auch nur annähernd erreicht wird.

Verbindungen mit Metallisierung

Für hoch ausheizbare und hoch isolierende Stromdurchführungen setzt man Keramik-Metall-Verbindungen ein. Diese dienen auch zur Herstellung von Hochleistungssenderöhren und zum Aufbau aus Keramik bestehender Vakuumkammern für Teilchenbeschleuniger der physikalischen Großforschung. Bei dieser Verbindungstechnik wird die Keramik, z. B. Aluminiumoxid ($92\text{ % bis }98\text{ % Al}_2\text{O}_3$), an den mit dem Metall zu verbindenden Stellen vormetallisiert. Dabei muss ganz besonders darauf geachtet werden, dass die dünne Metallschicht (Molybdän oder Titan) mit der darunterliegenden Keramik eine intensive, lunker- und porenfreie Verbindung eingeht. Darauf baut dann eine Nickelschicht auf, sodass man z. B. eine Metallkappe durch Hartlöten anbringen kann, in die anschließend der Stromleiter der Stromdurchführung ebenfalls eingelötet wird.

6.5 Ventile

An die Absperrorgane (Ventile) in Vakuumanlagen werden, je nach Anwendung, neben den allgemeinen technischen Anforderungen an Absperrorgane auch speziell für die Vakuumtechnik typische Anforderungen gestellt, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen.

Bei der Auslegung und Auswahl der Vakuumventile sind der minimal geforderte Enddruck und der hohe Strömungswiderstand von Bauteilen im molekularen Strömungsbereich zu beachten. Außerdem sind niedrigste Leckraten für Ventilgehäuse und Ventilsitz gefordert.

Vakuumseitige Schmiermittel für die bewegten Teile der Ventile müssen für den geforderten Druck- und Temperaturbereich geeignet sein oder im Hochvakuum bzw. Ultrahochvakuum wenn möglich ganz vermieden werden. Besonders im molekularen Strömungsbereich sind möglichst kleine Totvolumen und große Leitwerte wichtig.

Die Durchführung der mechanischen Betätigungselemente muss so beschaffen sein, dass sie die Anforderungen an Dichtheit, sowie Druck- und Temperaturbereich erfüllt.

Mit Elastomeren gedichtete Durchführungen (z. B. Wellendichtringe) sind, je nach Qualität, für geringere Vakuumanforderungen im Druckbereich $> 10^{-4}$ mbar einsetzbar. Für Druckbereiche $< 10^{-4}$ mbar werden Membran- oder Federbälge eingesetzt. Außerdem können mit einem Metallbalg gedichtete Ventile bei geeigneter Konstruktion ausgeheizt werden. Ventile mit Gehäuse-, Teller- und Flanschdichtungen aus Elastomeren werden bis zu Drücken von 10^{-8} mbar eingesetzt.

Ganzmetallventile, bei denen alle Dichtungen aus Metall ausgeführt sind, eignen sich für UHV-Anwendungen und höhere Ausheiztemperaturen, benötigen aber in der Regel höhere Schließkräfte beim Abdichten. Es werden weiche Metalle (Gold auf Edelstahloberfläche, Kupfer oder spezielle Legierungen) als Dichtungsmaterial verwendet. Neben den höheren Schließkräften muss auch mit kürzeren Standzeiten der Dichtungen gerechnet werden.

Für die unterschiedlichen Anwendungen in der Vakuumtechnik gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Ventiltypen, die entsprechend ihrer Bauart oder ihrer Funktionalität benannt sind. Auch die Art und Weise, wie Ventile betätigt werden, ist vielfältig. Ventile können manuell, elektromagnetisch, pneumatisch bzw. elektropneumatisch oder auch elektromotorisch betätigt werden. Je nach Bedarf und Ausführungsvariante gibt es für die meisten Ventile optische und/oder elektrische Stellungsanzeiger (Endschalter).

Eckventile

Das Eckventil besteht aus einem Ventilgehäuse in Eckform. Zum Verschließen wird der Ventilteller auf den Ventilsitz gedrückt. Der Ventilteller wird mit einer Elastomerdichtung in Trapez- oder O-Ringform abgedichtet.

Die Abbildung 6.8 zeigt den Aufbau eines mit einem Metallbalg gedichteten Eckventils. Da die mechanischen Betätigungsorgane außerhalb des Vakuumraumes liegen, können sie auch problemlos geschmiert werden. Ventile dieser Art gibt es mit Handbetätigung, oder mit elektromagnetischem bzw. pneumatischem Antrieb.

Bei sehr kleinen Ventilen benutzt man auch Gummistopfen oder Plättchen, die auf schneidenförmigen Ventilsitzen abdichten (Magnetventile).

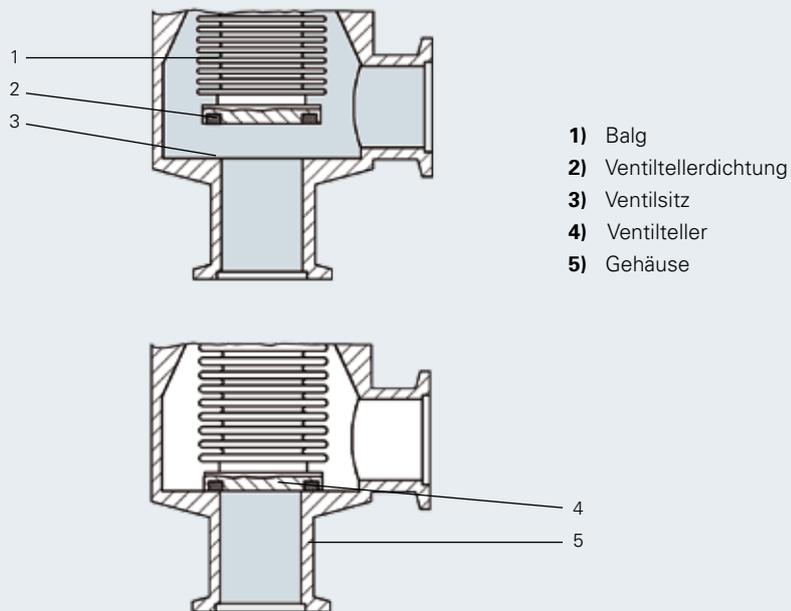


Abb. 6.8: Hochvakuumeckventil

Inline-Ventile

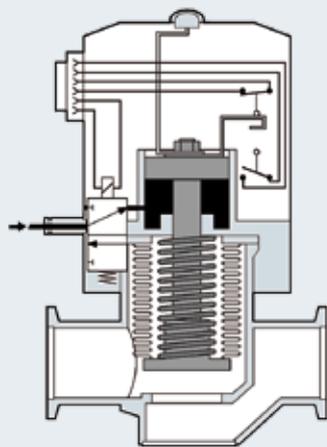


Abb. 6.9: Hochvakuum-Inline-Ventil mit elektropneumatischer Betätigung

Inline-Ventile sind prinzipiell gleich aufgebaut wie die zuvor beschriebenen Eckventile, unterscheiden sich von diesen aber dadurch, dass die Anschlussflansche auf einer Achse liegen. Durch den Aufbau sind die Strömungswiderstände der Inline-Ventile meist höher als die vergleichbarer Eckventile.

Schieberventile

Schieberventile werden bei großen Nennweiten (> DN 100) eingesetzt. Sie zeichnen sich durch geringen Strömungswiderstand und kleine Bauhöhe aus. Zum Öffnen und Schließen wird der meist doppelt ausgeführte Ventilteller hin- und herbewegt. In der Verschlussstellung werden beide Teile durch Kugeln auseinander und gegen die Dichtflächen gedrückt. Je nach Bewegungsrichtung der Ventilschieber unterscheidet man Zug-, Pendel- oder Drehschieberventile. Wegen der besonderen Konstruktion können die meisten Schieber zwar am Ventilteller gegen einen Differenzdruck von 1 bar abdichten, aber nur bei kleinem Differenzdruck am Ventilteller geöffnet werden.

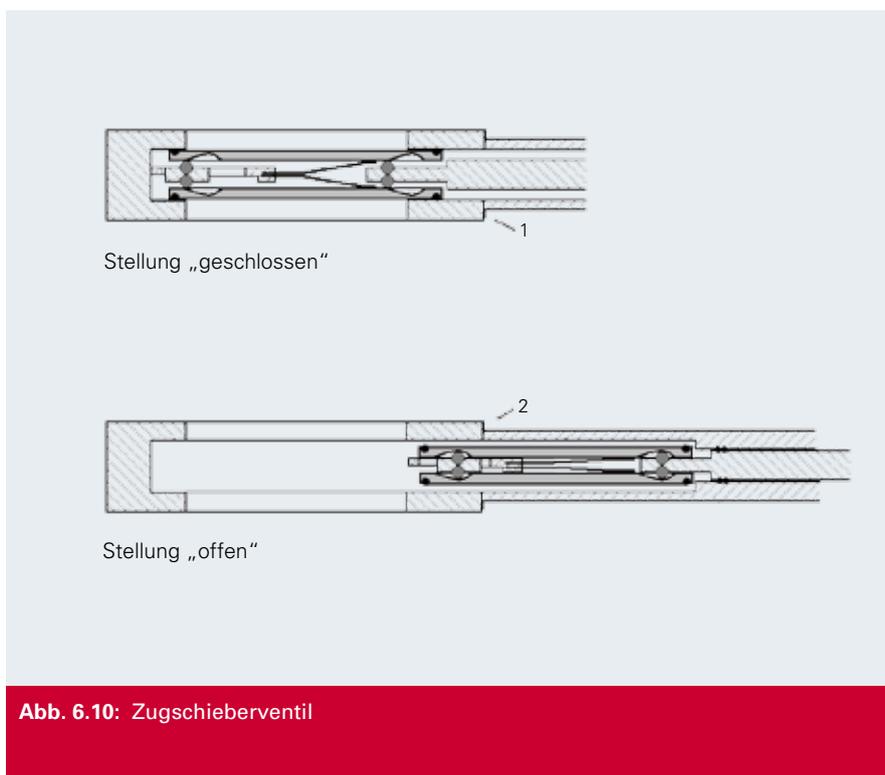


Abb. 6.10: Zugschieberventil

Platten- und Butterflyventile

Bei Ventilen dieser Bauart wird der abdichtende Ventilteller zum Öffnen mittels Gestänge geschwenkt (Plattenventil) oder durch einfache Drehbewegung gekippt (Butterflyventil). Dabei bleibt der Ventilteller in der Ventilöffnung. Besonders Plattenventile werden zum Absperrn großer Nennweiten verwendet.



Abb. 6.11: Elektropneumatisch betätigter Balgzugschieber

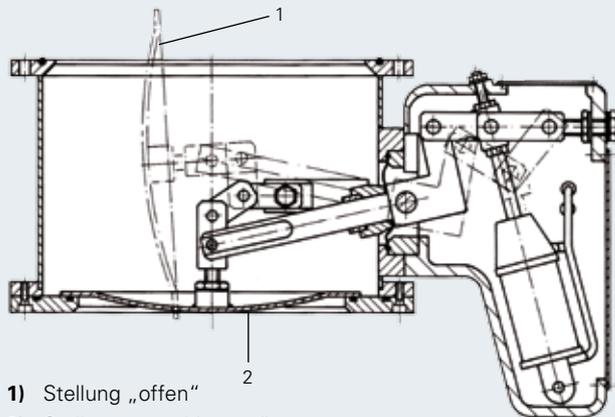


Abb. 6.12: Pneumatisch betätigtes Plattenventil

Quelle: Pupp / Hartmann, Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen, Hanser Verlag

Hähne

Hähne sind Absperrorgane, bei denen das abdichtende und absperrende Element durchbohrt ist und den Durchfluss durch Drehung sperrt bzw. freigibt. Für die Verwendung im Fein- und Grobvakuumbereich hat sich der Kugelhahn recht gut bewährt. In einem Gehäuse ist eine durchbohrte Kugel drehbar gelagert und beidseitig mit ebenfalls durchbohrten Kugelkalotten (meist aus Teflon) abgedichtet. Wenn die Bohrung in Durchflussrichtung steht, ist der gesamte Querschnitt freigegeben. Die Betätigung erfolgt über eine Drehdurchführung entweder von Hand oder bei großen Nennweiten auch mit pneumatischen Schwenkantrieben. Zu beachten ist, dass der Kugelhahn im geschlossenen Zustand ein eingeschlossenes Volumen enthält.

Spezielle Ventile

Neben den zuvor beschriebenen Ventiltypen gibt es noch eine Vielzahl spezieller Ventile unterschiedlicher Bauform für verschiedene Verwendungszwecke:

- ▶ Flutventile zum langsamen und dosierten Fluten einer Vakuumanlage
- ▶ Gasdosierventile, zum Teil mit Steuergerät, zur manuellen oder automatischen Druck- oder Durchflussregelung
- ▶ Nadelventile zum Einlass kleinster Gasmengen, die sich sehr genau und reproduzierbar einstellen lassen
- ▶ Schnellschlussventile, z. B. zum schnellen Verschließen einer Vakuumanlage im Störfall
- ▶ Überdruckventile und Differenzdruckventile, die bei bestimmten Druckverhältnissen selbstständig öffnen und schließen
- ▶ Ausheizbare UHV-Dosierventile, die mit einer Platte aus Keramik gegen einen Sitz aus Metall abdichten (Abbildung 6.13)



Abb. 6.13: UHV-Dosierventil und elektromagnetisches Eckventil

Portfolio

Pfeiffer Vacuum bietet alle gängigen Ventiltypen an. Hier sei auf die entsprechenden Abschnitte im Katalog verwiesen.

6.6 Durchführungen

Vielfach müssen mechanische Bewegungen, elektrischer Strom und Licht bzw. optische Signale und Flüssigkeiten über vakuumdichte Durchführungen in das Vakuum übertragen werden. Meist sind diese Durchführungen in vakuumdichte Flansche eingebaut, sofern sie nicht in die Aggregate selbst, wie z. B. in Pumpen oder Ventile, integriert sind.

Drehdurchführungen

Die einfachste Form der Abdichtung ist der O-Ring, der aber für hohe Geschwindigkeiten und Dauerbetrieb wegen des hohen und unkontrollierbaren Anpressdruckes nicht verwendet werden kann.

Am häufigsten werden Radialwellendichtringe oder Hutmanschetten eingesetzt (Abbildung 6.4), die jedoch geschmiert werden müssen. Durch das Schmiermittel können Kohlenwasserstoffe in Form von Dämpfen oder Crack-Produkten in die Vakuumanlage eindringen.

Eine Magnetkupplung besteht aus einer glockenförmigen Permanentmagnetanordnung außen, die den drehbar im Vakuum gelagerten, ebenfalls mit Magneten bestückten, Rotor mitnimmt. Beide Teile sind durch ein Spaltrohr getrennt, das eine hermetische Abdichtung bildet. Für langsame Drehbewegungen kann man im Vakuum trocken laufende Kugellager mit Keramikugeln verwenden. Schnell laufende Wellen im Vakuum kann man magnetisch lagern.

Sogenannte Katzen- oder Wackelschwanzdurchführungen erlauben auch eine hermetische Trennung zwischen Vakuum und Atmosphäre.

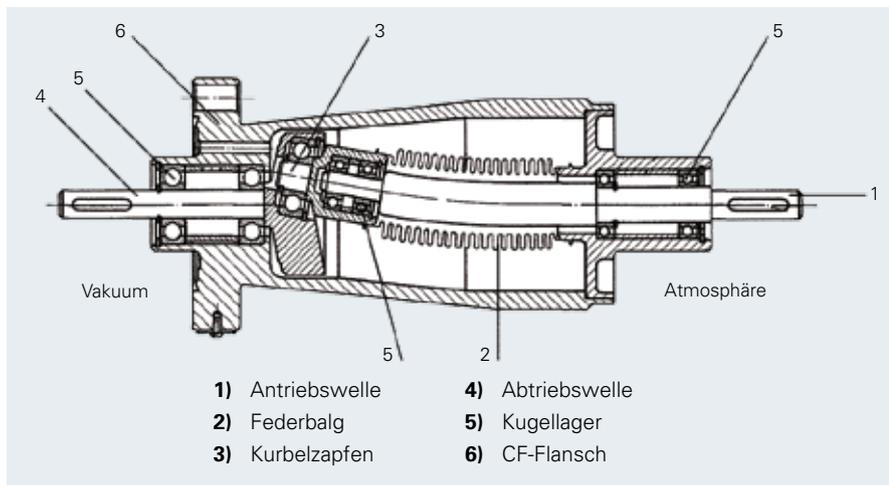


Abb. 6.14: UHV-Katzenschwanzdurchführung

In der Abbildung 6.14 ist der Aufbau einer solchen Durchführung dargestellt. Die abgewinkelte Antriebswelle (1), deren Ende in einem Kurbelzapfen (3) gelagert ist, dreht die Abtriebswelle (4) im Vakuum. Über eine nicht drehende Federbalgabdichtung (2), die eine Taumelbewegung ausführt, erfolgt die hermetische Abdichtung. Für die Lagerung der Abtriebswelle im Vakuum werden UHV-taugliche Kugellager mit Trockenschmierung verwendet.

Stromdurchführungen

Die Konstruktion einer Stromdurchführung ist entscheidend davon bestimmt, für welche Stromart und Spannung sie verwendet werden soll und welche Anforderungen hinsichtlich Vakuumdichtigkeit und Temperaturbeständigkeit gestellt werden. Die Herstellungsverfahren für Durchführungen werden in Abschnitt 6.4 behandelt. Durchführungen mit organischen Isolierwerkstoffen sind nur für niedere Spannungen brauchbar. Für mittlere Strombelastung, z. B. auch für Messströme, werden häufig einfache Gießharzdurchführungen verwendet. Epoxydharz ist als Isolator und als Vakuumdichtung für nicht allzu hohe Temperaturen gut geeignet. Mehrpolige Glaspressdurchführungen werden in Kleinflansche eingebaut, an die beidseitig Drähte angelötet werden können. Es gibt auch Ausführungen mit Röhrchen durch die man Drähte hindurchstecken und festlöten kann.



Abb. 6.15: UHV-Mehrfach-Metall-Keramik-Stromdurchführung

Dies ist z. B. beim Gebrauch von Thermoelementen wichtig, da Lötstellen die Messspannung verfälschen können. Bei großen Stromstärken werden die Durchführungen mit Wasser gekühlt. Durchführungen mit Glas-Metall-Verschmelzungen sind hinsichtlich ihres Isolationswiderstandes und ihrer Vakuumdichtigkeit hervorragend als Hochspannungs- und Schwachstromdurchführung für elektronische Geräte geeignet. Durchführungen mit Keramikisolation haben eine höhere mechanische Stabilität und eine höhere Temperaturbeständigkeit als Glas. Außerdem kann Keramik (z. B. Aluminiumoxid) in einer für Hochspannung geeigneten Isolatorform hergestellt werden. Aus diesen Gründen sind Keramikdurchführungen für hohe Spannungen und hohe Leistungen den Glasdurchführungen überlegen. Für höchste Anforderungen elektrischer, thermischer und vakuumtechnischer Art kommen nur feste Metall-Keramik-Verbindungen in Betracht.

Bei Stromdurchführungen ist die Höhe der Spannung zu beachten, da es bei geringen Abständen zwischen Leitern mit großem Spannungsunterschied zu Gasentladungen und Spannungsüberschlägen im Vakuum kommen kann. Im gefährdeten Druckbereich zwischen 10^{-3} und 10 mbar sind entsprechende Weglängen zwischen Leitern mit hoher Spannung vorzusehen. Ein Verguss mit Gießharz kann ebenfalls Abhilfe schaffen.

Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase

Bei diesen Durchführungen treten Probleme auf, wenn Medien mit sehr hohen oder sehr tiefen Temperaturen (flüssige Luft) in Vakuumbehälter zu leiten sind. Man benutzt Durchführungen bei denen die Wärmeleitung zwischen Flansch und Rohr durch ein genügend langes und dünnwandiges Edelstahlrohr so weit verringert wird, dass der Flansch auf Raumtemperatur bleibt und für die Abdichtung des Flansches normale Elastomerdichtungen verwendet werden können.

Schaugläser

Schaugläser werden hauptsächlich dazu verwendet, das Innere der Vakuumkammer auch während des Prozesses zu beobachten. Daher werden in der Regel normale Fensterglasscheiben entsprechender Dicke verwendet und mit Elastomerdichtungen in einem Schauglasflansch eingebaut (ISO-K- und ISO-KF-Schaugläser). Für UHV-Anwendungen und für hohe Temperaturen werden die Gläser metallisiert und in den Schauglasflansch eingelötet (CF-Schaugläser).

7

Auslegung**7.1 Allgemeines**

In diesem Abschnitt sollen einfache Dimensionierungsfragen behandelt werden:

- ▶ Wie groß muss ich eine Pumpe wählen, um in einer vorgegebenen Zeit in einem Vakuumbehälter einen bestimmten Druck zu erreichen?
- ▶ Wie groß muss die Vorpumpe für eine Hochvakuumpumpe sein?
- ▶ Was muss ich beim Pumpen hoher Gaslasten beachten?
- ▶ Welchen Einfluss haben Rohrleitungen auf das Saugvermögen einer Vakuumpumpe?

All diese Fragen können im folgenden Kapitel natürlich nicht erschöpfend behandelt werden. Es werden nur einfache Beispiele dargestellt und voraussichtliche Ergebnisse abgeschätzt. Im konkreten Anwendungsfall müssen die technischen Daten der verwendeten Pumpen und Bauteile berücksichtigt werden. Ebenso kann Spezialliteratur zur Dimensionierung nützlich sein.

Einheiten

Jede technisch-physikalische Größe besteht aus ihrem Zahlenwert und einer Einheit. In der Welt hat man sich auf das SI-System geeinigt und für die Grundgrößen Länge (m), Masse (kg), Zeit (s), Temperatur (T), Substanzmenge (mol), Stromstärke (A) und Lichtstärke (cd) Standards festgelegt, die in den einzelnen Ländern für Eichzwecke vorgehalten werden. Alle anderen Größen sind von diesen Grundgrößen abgeleitet. Die in dieser Abhandlung verwendeten Formeln enthalten bis auf wenige Ausnahmen nur die physikalisch-technischen Größen und keinerlei Umrechnungsfaktoren von z. B. Pa in mbar. Das bedeutet, dass nach Einsetzen der Größen in SI-Einheiten auch die Ergebnisse in SI-Einheiten herauskommen. SI-Einheiten sind z. B. $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 0,01 \text{ mbar}$ für den Druck und $1 \text{ m}^3/\text{s} = 3.600 \text{ m}^3/\text{h}$. In den folgenden Abschnitten werden weitgehend die gebräuchlichen nicht SI-Einheiten verwendet, aber wo es wegen der erforderlichen Umrechnung geboten erscheint, wird mit SI-Einheiten gearbeitet.

Die grundsätzliche Verwendung von SI-Einheiten würde viele Fehler und Umrechnungsaufwand vermeiden. Leider setzt sich dieser Vorteil in der Welt nur sehr langsam durch.

7.2 Berechnungen**7.2.1 Dimensionierung eines Wälzkolbenpumpstandes**

Zur Dimensionierung eines Wälzkolbenpumpstandes müssen wir zunächst einige Vorbetrachtungen anstellen.

Kompressionsverhältnis

Das Kompressionsverhältnis K_0 einer Wälzkolbenpumpe liegt typischerweise zwischen 5 und 70. Zu seiner Ermittlung betrachten wir die geförderte Gasmenge und die Rückströmung über den Leitwert L_R sowie die Rückförderung von Gas aus dem Auslassraum mit dem Saugvermögen S_R :

Formel 7-1
Gaslast WKP

$$p_a \cdot S = p_a \cdot S_0 - L_R (p_v - p_a) - S_R \cdot p_v$$

mit p_a = Ansaugdruck und p_v = Vorvakuumdruck.

Setzen wir S gleich 0, erhalten wir das Kompressionsverhältnis:

Formel 7-2
 K_0 WKP

$$\frac{p_v}{p_a} = K_0 = \frac{S_0 + L_R}{L_R + S_R}$$

Im laminaren Strömungsbereich gilt: $S_0 \gg L_R \gg S_R$ und damit

Formel 7-3
 K_0 laminar

$$K_{0l} = \frac{S_0}{L_R}$$

und im molekularen Strömungsbereich wegen

Formel 7-4
 K_0 molekular

$$S_0 \gg S_r \gg L_R : K_{0m} = \frac{S_0}{S_R}$$

Bei Laminarströmung (hoher Druck) begrenzt die Rückströmung durch die Spalte zwischen Kolben und Gehäuse das Kompressionsverhältnis. Da der Leitwert dem mittleren Druck proportional ist, sinkt das Kompressionsverhältnis mit steigendem Druck.

Im molekularen Strömungsbereich überwiegt die Rückförderung $S_R \cdot p_v$ von Gas von der Auslassseite und begrenzt das Kompressionsverhältnis zu niedrigem Druck hin. Bedingt durch diesen Effekt ist die Anwendung von Wälzkolbenpumpen auf Drücke $p_a > 10^{-4}$ mbar begrenzt.

Saugvermögen

Wälzkolbenpumpen sind mit Überströmventilen ausgerüstet, die maximale Druckdifferenzen Δp_d an den Pumpen zwischen 30 und 60 mbar zulassen. Kombiniert man eine Wälzkolbenpumpe mit einer Vorvakuumpumpe, muss man die Druckbereiche mit geöffnetem (S_1) und geschlossenem Überströmventil (S_2) unterscheiden.

Da der Gasdurchsatz in beiden Pumpen gleich ist, gilt:

Formel 7-5
 S_1 für $\Delta p_d \ll p_v$

$$S_1 = \frac{S_v \cdot p_v}{p_v - \Delta p_d}$$

Solange $\Delta p_d \ll p_v$ ist, ist das Saugvermögen des Pumpstandes nur wenig größer als das der Vorpumpe. Nähert sich der Vorvakuumdruck der Druckdifferenz Δp_d , so schließt das Überströmventil und es gilt $S = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_v}}$ (Formel 2-5).

Betrachten wir noch den Sonderfall, dass eine Wälzkolbenpumpe gegen konstanten Druck arbeitet (z. B. Kondensatorbetrieb). Im Bereich hoher Drücke gilt Formel 7-3. Einsetzen des Wertes L_R in Formel 7-1 und Vernachlässigung von S_R gegen L_R liefert:

Formel 7-6
 S gegen hohen Druck

$$S = S_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_0} \left(\frac{p_v}{p_a} - 1 \right) \right)$$

Bei niedrigen Drücken setzt man $S_{\bar{a}}$ aus Formel 7-4 ein und erhält

Formel 7-7
S gegen niedrigen Druck

$$S = S_0 \left(1 - \frac{p_v}{K_0 \cdot p_a} \right)$$

Aus Formel 2-5 erkennt man, dass S gegen S_0 geht, falls $K_0 \gg \frac{S_0}{S_v}$.

Setzen wir z. B. $K_0 = 40$ und $\frac{S_0}{S_v} = 10$, so erhalten wir $S = 0,816 S_0$.

Für die Abstufung in einem Pumpstand sollte deshalb gelten: $\frac{S_0}{S_v} \leq 10$.

Da die Überströmventile auf Druckdifferenzen um 50 mbar eingestellt sind, ist bei Drücken über 50 mbar fast nur das Saugvermögen der Vorpumpe wirksam. Sollen große Behälter in einer bestimmten Zeit auf z. B. 100 mbar evakuiert werden, muss eine entsprechend große Vorpumpe ausgewählt werden.

Als Beispiel betrachten wir einen Pumpstand, der einen Behälter von $V = 2 \text{ m}^3$ in 10 Minuten auf $5 \cdot 10^{-3}$ mbar evakuieren soll. Dazu wählen wir eine Vorpumpe, die den Behälter in $t_1 = 5$ Minuten auf 50 mbar evakuiert. Bei konstantem Saugvermögen gilt:

Formel 7-8
Auspumpzeit

$$t_1 = \frac{V}{S} \ln \frac{p_0}{p_1}$$

Mit Formel 7-8 ergibt sich das Saugvermögen $S_v = \frac{2.000 \text{ l}}{300 \text{ s}} \ln \frac{1.000}{50} = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}}$.

Wir wählen als Vorpumpe eine Hepta 100 mit dem Saugvermögen $S_v = 100 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe schätzen wir nach der gleichen Formel auf $61 \text{ l/s} = 220 \text{ m}^3/\text{h}$ ab und nehmen eine Okta 500 mit $S_0 = 490 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Druckdifferenz des Überströmventils von $\Delta p_d = 53 \text{ mbar}$ für den Feinvakuumbereich.

In der folgenden Tabelle 7.1 wählen wir die Vorvakuumdrücke laut Spalte p_v , entnehmen die zugehörigen Saugvermögenswerte S_v für die Hepta 100 aus Abbildung 2.10 und berechnen den Durchsatz: $Q = S_v \cdot p_v$.

Das Kompressionsverhältnis $K_{\Delta} = \frac{p_v + \Delta p_d}{p_v}$ ist berechnet für geöffnetes Überströmventil bis zum Vorvakuumdruck von 56 mbar. K_0 ist für Vorvakuumdrücke $\leq 153 \text{ mbar}$ aus Abbildung 2.14 entnommen. Das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe berechnen wir auf zwei Arten:

S_1 erhält man aus Formel 7-5: $S_1 = S_v \cdot K_{\Delta}$ für offenes, oder S_2 nach Formel 2-5

$$S_2 = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_v}}$$
 für geschlossenes Überströmventil.

Nähert sich der Vorvakuumdruck der Druckdifferenz Δp_d , so wird $S_1 > S_2$. Richtig ist immer der kleinere von beiden Saugvermögenswerten, den wir mit S bezeichnen wollen.

Den Ansaugdruck erhält man nach der Formel: $p_a = \frac{Q}{S}$. Abbildung 7.1 zeigt die Saugvermögenskurve dieses Pumpstandes.

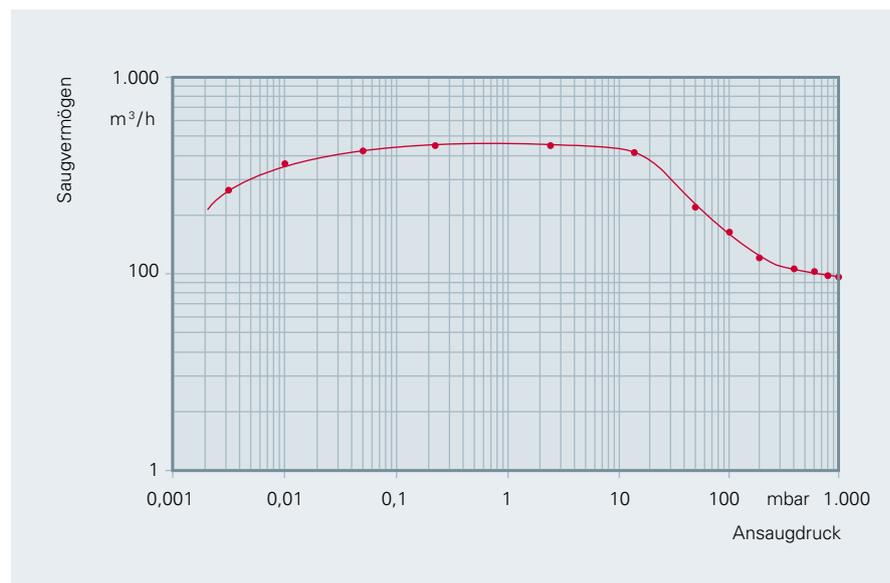
Tabelle 7.1: Saugvermögen eines Wälzkolbenpumpstandes

p_a /mbar	p_v /mbar	S_v /(m ³ /h)	Q /(mbar·m ³ /h)	K_Δ	K_0	S_1 /(m ³ /h)	S_2 /(m ³ /h)	t/h	t/s
1.000,0000	1.053,00	90,00	94.770,00	1,05		94,77		0,00490	17,66
800,0000	853,00	92,00	78.476,00	1,07		98,10		0,00612	22,04
600,0000	653,00	96,00	62.688,00	1,09		104,48		0,00827	29,79
400,0000	453,00	100,00	45.300,00	1,13		113,25		0,01359	48,93
200,0000	253,00	104,00	26.312,00	1,27		131,56		0,00652	23,45
100,0000	153,00	105,00	16.065,00	1,53	7,00	160,65	321,56	0,00394	14,18
50,0000	103,00	105,00	10.815,00	2,06	13,00	216,30	382,20	0,00608	21,87
14,9841	56,00	110,00	6.160,00	18,70	18,00	2.053,33	411,10	0,00822	29,58
2,5595	10,00	115,00	1.150,00		36,00		449,30	0,01064	38,30
0,2300	1,00	105,00	105,00		50,00		456,52	0,00670	24,13
0,0514	0,30	75,00	22,50		46,00		437,39	0,00813	29,27
0,0099	0,10	37,00	3,70		40,00		375,17	0,00673	24,23
0,0033	0,06	15,00	0,90		39,00		270,42	0,00597	21,51
0,0018	0,05	5,00	0,25		37,00		135,29		

Auspumpzeit: 344,94 s

Auspumpzeiten

Man berechnet die Auspumpzeit des Behälters in einzelnen Schritten. In Bereichen mit starker Änderung des Saugvermögens muss man die Vorvakuumdruckintervalle dicht legen. Zur Ermittlung der Auspumpzeit in einem Intervall benutzt man Formel 7-8 und setzt für S den Mittelwert der beiden Saugvermögen für das berechnete Druckintervall ein. Die gesamte Auspumpzeit ist die Summe aller Zeiten in der letzten Spalte der Tabelle 7.1.


Abb. 7.1: Saugvermögen eines Pumpstandes mit Hepta 100 und Okta 500

Weitere Einflüsse auf die Auspumpzeit haben die Leckrate der Vakuumanlage, die Leitwerte der Rohrleitungen sowie im Rezipienten vorhandene verdampfende Flüssigkeiten, entgaste poröse Materialien und verschmutzte Wände. Einige dieser Faktoren werden in den Abschnitten 7.2.3.1 und 7.3 behandelt. Falls einige der oben genannten Einflüsse unbekannt sind, muss man entsprechende Reserven im Pumpstand vorsehen.

7.2.2 Kondensatorbetrieb

Bei vielen Vakuumprozessen (Trocknung, Destillation) werden große Dampfmengen freigesetzt, die abgepumpt werden müssen. Außerdem dringen in große Behälter erhebliche Mengen an Leckluft ein und die Stoffe, die verdampfen oder getrocknet werden geben zusätzlich Luft ab, die in Poren gespeichert oder in Flüssigkeiten gelöst ist.

Bei Trocknungsprozessen kann der Dampf grundsätzlich von einer Vakuumpumpe mit ausreichender Wasserdampfkapazität gegen Atmosphärendruck gefördert werden und dort kondensieren. Dieses Verfahren hat aber folgende Nachteile:

- ▶ Die Pumpe muss sehr groß sein
- ▶ Es wird eine große Menge Gasballastluft mitgefördert, die zusammen mit dem Dampf eine Menge Ölnebel aus der Pumpe austrägt
- ▶ Das entstehende Kondensat aus Wasserdampf und Ölnebel muss kostspielig entsorgt werden

Destillationsprozesse arbeiten mit Kondensatoren und man möchte von dem kondensierenden Destillat möglichst wenig durch die angeschlossene Vakuumpumpe verlieren.

Als Beispiel betrachten wir eine Vakuumkammer mit Trockengut, dem durch Heizen so viel Energie zugeführt wird, dass pro Stunde 10 kg Wasser verdampfen. Außerdem werden noch 0,5 kg Luft pro Stunde abgegeben. Der Druck in der Kammer soll kleiner als 10 mbar sein. Man verwendet zur Trocknung einen Pumpstand nach Abbildung 7.2 und kann so durch Verwendung eines Kondensators auf wirtschaftliche Art und Weise den Dampf kondensieren.

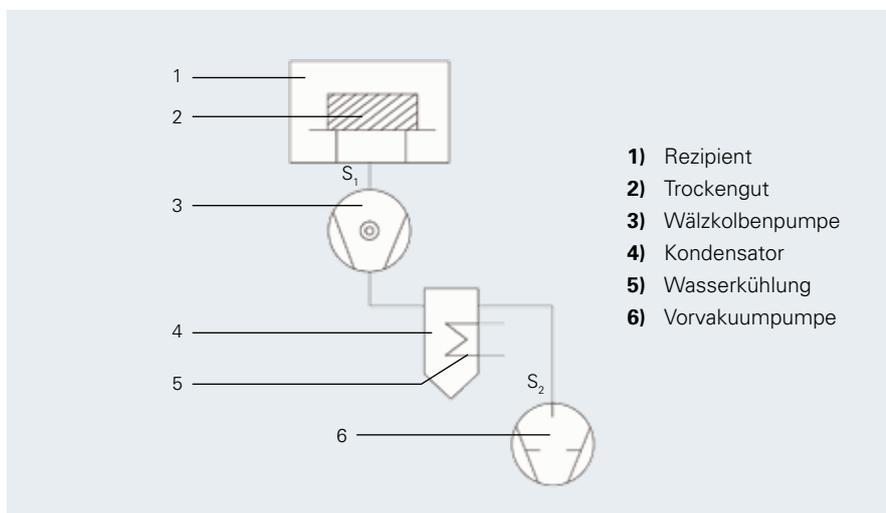


Abb. 7.2: Trocknungsanlage (schematisch)

In der Vakuumkammer (1) wird das Trockengut (2) beheizt. Die Wälzkolbenpumpe (3) pumpt das Dampf-Luftgemisch in den Kondensator (4), in dem ein großer Teil des Dampfes kondensiert. Der Kondensator wird mit Wasser gekühlt. Das kondensierende Wasser von 25 °C steht im Gleichgewicht mit dem Wasserdampfdruck von 30 mbar. Eine weitere Vakuumpumpe (5) fördert den Luftanteil und eine geringe Menge Wasserdampf und stößt das Gemisch gegen Atmosphärendruck aus. Zunächst berechnen wir den Gasdurchsatz

$$Q = P_{1a} \cdot S_1 \text{ mit Formel 1-11: } Q = S_1 \cdot p_{1a} = \frac{R \cdot T}{t} \cdot \left(\frac{m_{\text{wat}}}{M_{\text{wat}}} + \frac{m_{\text{air}}}{M_{\text{air}}} \right)$$

und erhalten mit den Werten:

$$T = 300 \text{ K Sauggastemperatur,}$$

$$R = 8.314 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K),}$$

$$t = 3.600 \text{ s Zeit,}$$

$$p_a = 10 \text{ mbar} = 1.000 \text{ Pa Ansaugdruck,}$$

$$m_{\text{wat}} = 10 \text{ kg Wasserdampfmenge,}$$

$$M_{\text{wat}} = 18 \text{ kg/kmol Molmasse Wasser,}$$

$$m_{\text{air}} = 0,5 \text{ kg Luftmenge,}$$

$$M_{\text{air}} = 28,8 \text{ kg/kmol Molmasse Luft}$$

den Gasdurchsatz: $Q = 397 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ und nach Division durch den Ansaugdruck von $p_a = 1.000 \text{ Pa}$ das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe $S_1 = 0,397 \text{ m}^3/\text{s} = 1.428 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Gasdurchsatz Q setzt sich zusammen aus $385 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ Wasserdampf und $12 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ Luft.

Beim Evakuieren des Kondensators soll der Luftpartialdruck maximal 30 % betragen. also maximal 12,85 mbar. Daraus folgt: $S_2 = \frac{Q_{\text{Luft}}}{0,3 \cdot p_{\text{Luft}}} \cdot S_2 = 0,031 \text{ m}^3/\text{s} = 112 \text{ m}^3/\text{h}$.

Wir wählen deshalb eine Schraubenpumpe Hepta 100 als Vorvakuumpumpe, die wegen ihres gegenüber dem berechneten Wert etwas geringeren Saugvermögens einen geringfügig höheren Luftpartialdruck erreicht, und als Wälzkolbenpumpe eine Okta 2000 mit den Werten:

$$S_0 = 2.065 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta p_a = 35 \text{ mbar Differenzdruck am Überströmventil}$$

$$K_0 = 28 \text{ bei } p_v = 43 \text{ mbar.}$$

Wir schätzen den Ansaugdruck $p_a = 1.000 \text{ Pa}$ und berechnen S_1 nach Formel 7-6

$$S_1 = S_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_0} \left(\frac{p_v}{p_a} - 1 \right) \right) 1.822 \text{ m}^3/\text{h} = 0,506 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Mit $p_a = \frac{Q}{S_1}$, $p_a = 785 \text{ Pa}$ erhält man den Ansaugdruck in der Trockenkammer, der nochmals eingesetzt in Formel 7-6 das genauere Saugvermögen $S_1 = 1.736 \text{ m}^3/\text{h}$ liefert bei einem Ansaugdruck von $p_a = 823 \text{ Pa}$.

Wir berechnen den Kondensator für eine kondensierende Dampfmenge von 10 kg/h. Für die Kondensationsfläche gilt

Formel 7-9
Berechnung
Kondensationsfläche

$$A_k = \frac{Q_{\text{wat}} \cdot m_{\text{wat}}}{t \cdot \Delta T_m \cdot k}$$

mit den Werten:

$$Q_{\text{wat}} = 2,257 \text{ 106 Ws/kg Spezifische Verdampfungsenthalpie}$$

$$m_{\text{wat}} = 10 \text{ kg Wasserdampfmenge}$$

$$\Delta T_m = 60 \text{ K Temperaturdifferenz Dampf/Kondensationsfläche}$$

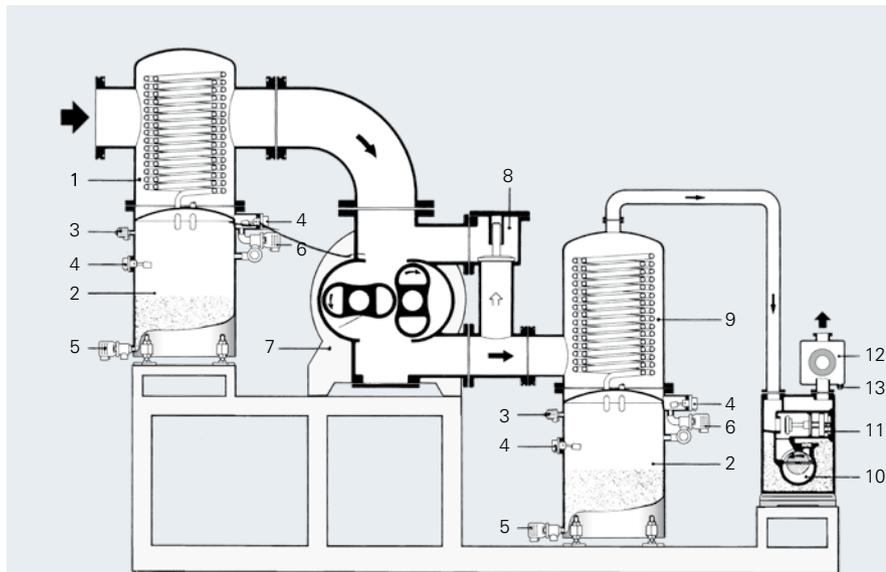
$$t = 3.600 \text{ s}$$

$$k = 400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \text{ Wärmeübergangszahl}$$

und erhalten als Kondensationsfläche $A_k = 0,261 \text{ m}^2$.

Der Dampf wird durch die nahezu adiabatische Kompression um mehr als 100 K erwärmt, jedoch auf dem Weg zum Kondensator wieder abgekühlt. Also ist die Annahme von $\Delta T_m = 60 \text{ K}$ recht konservativ. Die Wärmedurchgangszahl k [17] nimmt mit steigendem Inertgasanteil stark ab, was zu einer größeren Kondensationsfläche führt. Umgekehrt kann bei geringerem Inertgasanteil, also größerer Vorpumpe mit kleinerer Kondensationsfläche gearbeitet werden. Man sollte besonders auf kleine Leckraten achten, da diese auch den Inertgasanteil erhöhen.

Weitere technische Einzelheiten entnehmen Sie bitte der Literatur [18].



- | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1) Kondensator | 5) Ablassventil | 10) Drehschieberpumpe |
| 2) Kondensat-Sammelgefäß | 6) Absperrventil | 11) Hochvakuum-Sicherheitsventil |
| 3) Belüftungsventil | 7) Wälzkolbenpumpe | 12) Önebelabscheider |
| 4) Schwimmerschalter | 8) Überströmventil | 13) Ablassschraube |
| | 9) Zwischenkondensator | |

Abb. 7.3: Wälzkolbenpumpstand zur Dampfkondensation

Betrachten wir der Vollständigkeit halber nochmals den gesamten Ablauf des Trocknungsprozesses: Zunächst stellt sich in der Trockenkammer ein Gleichgewichtsdruck ein, der sich aus der verdampfenden Wassermenge, verursacht durch die Beheizung des Trockengutes, und dem Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe ergibt.

Der Wasserdampf wird von der Wälzkolbenpumpe in den Kondensator gefördert, wo er kondensiert. Da dort Laminarströmung herrscht, pumpt der Dampfstrom das aus dem Trockengut frei werdende Inertgas in den Kondensator.

Würde man die Vorpumpe abstellen, so käme in kurzer Zeit der gesamte Kondensationsprozess zum Erliegen, da der Dampf die Kondensationsfläche nur noch durch Diffusion erreichen könnte. Nach fortgeschrittener Trocknung sinkt die Dampfmenge und im Kondensator wird weniger kondensiert, jedoch wird der Dampfanteil, den die Vorpumpe absaugt eher größer, falls der Inertgasanteil abnimmt. Sinkt der Dampfdruck im Kondensator unter die Kondensationsgrenze, so setzt Rückverdampfung des Kondensates ein. Dies kann verhindert werden, wenn das Kondensat über ein Ventil in einen Kondensatsammelbehälter abfließt und das Ventil bei Unterschreiten des Kondensationsdruckes geschlossen wird.

Bei großen Destillationsanlagen sollte das Saugvermögen der Vorpumpe über die Kondensationsrate geregelt werden. Dies kann z. B. geschehen mithilfe einer Dosierpumpe, die die geforderte Kondensatmenge gleichmäßig aus dem Sammelgefäß austrägt. Sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Sammelgefäß unter ein bestimmtes Niveau, so wird das Saugventil der Vorkumpumpe geöffnet und das Inertgas, das sich im Kondensator angesammelt hat, wird abgepumpt. Nun erhöht sich die Kondensationsrate wieder, der Flüssigkeitsspiegel steigt und das Saugventil der Vorpumpe wird wieder geschlossen. Auf diese Art wird nur bei zu geringer Kondensationsrate gepumpt und es geht wenig Kondensat verloren.

Zusammenfassung:

Beim Abpumpen von Dämpfen (Trocknung, Destillation) kann die wesentliche Pumpleistung von einem Kondensator aufgebracht werden. Je nach Druck und Temperaturverhältnissen kann man einen oder zwei Kondensatoren verwenden (Abbildung 7.3). Der Kondensator zwischen Wälzkolbenpumpe und Vorpumpe ist wirksamer, da der Dampf mit höherer Temperatur und höherem Druck in den Kondensator einströmt und eine kleine Vorpumpe nur einen Teil des Dampfes absaugt. Bei der Destillation kann durch Regelung des Saugvermögens der Vorpumpe der Verlust an Kondensat minimiert werden.

7.2.3 Turbopumpstände

7.2.3.1 Auspumpen eines Behälters mit einem Turbopumpstand auf 10^{-8} mbar

Ein Behälter aus blankem Edelstahl soll in 12 Stunden auf einen Druck von $p_b = 10^{-8}$ mbar evakuiert werden. Wie aus Kapitel 1.3 hervorgeht, sind neben der reinen Auspumpzeit für die Luft weitere Effekte zu berücksichtigen. Die Desorption von Wasserdampf und adsorbierten Gasen sowie das Ausgasen von Dichtungen verlängern die Auspumpzeit. Die Auspumpzeiten bis zum Erreichen des gewünschten Druckes von 10^{-8} mbar setzen sich zusammen aus:

- ▶ t_1 = Auspumpzeit der Vorpumpe bis 0,1 mbar
- ▶ t_2 = Auspumpzeit der Turbopumpe bis 10^{-4} mbar
- ▶ t_3 = Pumpzeit zur Desorption der Edelstahloberfläche
- ▶ t_4 = Pumpzeit zur Ausgasung der FPM-Dichtungen

Der gewünschte Basisdruck p_b setzt sich zusammen aus dem Gleichgewichtsdruck, verursacht durch einströmendes Gas durch Lecks und Permeation Q_l , sowie durch die Gasabgabe von der Metalloberfläche Q_{desM} und den Dichtungen Q_{desK} :

$$p_b = \frac{Q_l}{S} + \frac{Q_{desM}(t_2)}{S} + \frac{Q_{desK}(t_4)}{S}$$

Der Behälter hat folgende Daten:

$$\begin{aligned} V &= 0,2 \text{ m}^3 \text{ Volumen} \\ A &= 1,88 \text{ m}^2 \text{ Oberfläche} \\ q_{desM} &= 2,7 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2) \text{ Desorptionsrate Edelstahl} \\ q_{desK} &= 1,2 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2) \text{ Desorptionsrate FPM} \\ A_d &= 0,0204 \text{ m}^2 \text{ Dichtungsfläche FPM} \\ Q_l &< 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l/sec} \text{ Leckrate} \end{aligned}$$

Die Vorpumpe soll in $t_1 = 180 \text{ s}$ den Behälter auf $0,1 \text{ mbar}$ evakuieren und diesen Druck auch bei geöffnetem Gasballastventil erreichen. Das Saugvermögen erhält man nach der Formel 7-8:

$$S_v = S_v = \frac{V}{t_1} \ln \frac{p_0}{p_1} \quad 10,2 \text{ l/s} = 36,8 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Wir wählen eine Penta 35 mit einem Saugvermögen von $S_v = 35 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Turbomolekularpumpe sollte etwa das 10- – 100-fache Saugvermögen der Vorpumpe haben, um die adsorbierten Dämpfe und Gase von der Metalloberfläche abzupumpen. Wir wählen eine HiPace 700 mit einem Saugvermögen $S = 685 \text{ l/s}$. Mit Formel 7-8 erhalten wir

$$t_2 = \frac{V}{S} \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,01 \text{ s}$$

Desorption von der Behälteroberfläche

An den Innenflächen des Rezipienten werden Gasmoleküle (vorwiegend Wasser) adsorbiert, die unter Vakuum allmählich wieder verdampfen. Die Desorptionsraten von Metalloberflächen nehmen mit $1/t$ ab. Die Zeitkonstante t_0 beträgt etwa 1 h .

Mit $Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t_3}$ (Formel 1-24) berechnen wir die Zeit zum Erreichen des Arbeitsdruckes

$$p_{B3} = 10^{-8} \text{ mbar}: t_3 = \frac{q_{desM} \cdot A \cdot t_0}{S \cdot p_{B3}}; t_3 = 2,67 \cdot 10^6 \text{ s} = 741 \text{ h}.$$

Diese Zeit ist zu lang! Sie muss durch Ausheizen verkürzt werden. Erhöht man die Behältertemperatur von 293 auf 370 K , eine Temperatur, die FPM-Dichtungen gut vertragen, so steigt die Desorptionsgeschwindigkeit theoretisch um mehr als den Faktor 1.000 an [6] und die Ausheizzeit wird praktisch auf einige Stunden verkürzt.

Hohe Desorptionsraten können auch durch Ausglühen des Behälters unter Vakuum oder durch bestimmte Oberflächenbehandlungen (polieren, beizen) um etwa Faktor 100 gesenkt werden. Das Ausheizen ist jedoch die wirksamste Methode.

Da viele Einflüsse der Vorbehandlung eine Rolle spielen, ist eine genaue Vorhersage des Druckverlaufs über die Zeit nicht möglich. Bei Ausheiztemperaturen um 150 °C genügt es jedoch, die Heizung nach Erreichen eines Druckes, der um Faktor 100 über dem gewünschten Basisdruck liegt, auszuschalten. Dann wird der gewünschte Druck p_{B3} nach Erkalten des Rezipienten erreicht werden.

Desorption der Dichtungen

Bei Betrieb unter 10^{-6} mbar sind die Ausgasraten von Kunststoffen von Bedeutung. Die Oberflächen der Dichtungen sind zwar verhältnismäßig klein, jedoch nimmt die Desorption nur mit

$$\frac{t_0}{\sqrt{t_4}} \text{ Formel 1-25 ab.}$$

Der Grund dafür ist, dass die austretenden Gase nicht nur an der Oberfläche gebunden sind, sondern auch aus dem Inneren der Dichtung heraus diffundieren müssen. Bei längeren Pumpzeiten kann deshalb die Desorption von Kunststoffen die der Metalloberflächen dominieren. Die Ausgasrate von Kunststoffoberflächen wird berechnet nach

$$Q_{desK} = q_{desK} \cdot A_d \sqrt{\frac{t_0}{t}} \quad (\text{Formel 1-25}).$$

Wir setzen $Q_{desK} = S \cdot p_{desK}$ und erhalten für $p_{bd} = 10^{-8}$ mbar: $t_4 = 459 \cdot 10^6 \text{ s} = 1.277 \text{ h}$. Hierbei ist $t_0 = 3.600 \text{ s}$ gesetzt und der zugehörige Wert q_{desK} aus dem Diagramm [19] für FPM abgelesen. Man sieht, dass der Beitrag der Desorption der Dichtung im kalten Zustand zur Abspumpzeit in ähnlicher Größenordnung liegt, wie der der Metalloberfläche.

Da die Diffusion der im Inneren der Dichtung gelösten Gase das Zeitverhalten des Desorptionsgasstromes bestimmt, hat die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D einen entscheidenden Einfluss auf die Pumpzeit:

Formel 7-10
Diffusionskoeffizient (T)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_{diff}}{R \cdot T}\right)$$

Mit steigender Temperatur steigt auch der Diffusionskoeffizient an, allerdings nicht so stark wie die Desorptionsrate der Metalloberfläche. Wir sehen also, dass Elastomerdichtungen durch ihre Desorptionsraten durchaus begrenzend auf den Basisdruck wirken können und deshalb zur UHV-Erzeugung ungeeignet sind.

Leckrate und Permeationsrate

Der Gasfluss, der durch Undichtigkeiten ins Vakuumsystem einströmt, ist konstant und führt zu einem Druck: $p_l = \frac{Q}{S}$. Eine Anlage gilt als hinreichend dicht, wenn dieser Druck kleiner als 10 % des Arbeitsdruckes ist. Leckraten von 10^{-8} mbar · l/s sind in der Regel leicht erreichbar und auch für diese Anlage gefordert. Daraus ergibt sich ein Druckanteil aus der Leckrate von $p_l = 1,46 \cdot 10^{-11}$ mbar. Dieser Wert ist nicht störend und kann vernachlässigt werden.

Permeationsraten durch Metallwände beeinflussen den in diesem Beispiel geforderten Enddruck nicht, jedoch kann die Diffusion durch Elastomerdichtungen auch im gewählten Beispiel begrenzend auf den Basisdruck wirken.

Zusammenfassung

Drücke bis zu 10^{-7} mbar lassen sich in sauberen Behältern in etwa einem Tag ohne zusätzliche Maßnahmen erreichen.

Sollen Drücke bis 10^{-4} mbar erreicht werden, so addieren sich die Abspumpzeiten von Vorpumpe und Turbopumpe. Im oben angeführten Fall sind dies ca. 200 s. Bei Drücken $< 10^{-6}$ mbar ist ein hohes Saugvermögen der Turbomolekularpumpe erforderlich, um besonders das an den Metallwänden adsorbierte Wasser abzupumpen.

Dies gelingt nur durch zusätzliches Ausheizen (90 – 400 °C) des Vakuumbehälters, wenn in wenigen Stunden der geforderte Basisdruck p_b von 10^{-8} mbar erreicht werden soll. Nach Erreichen des 100-fachen Wertes des angestrebten Druckes stellt man die Heizung ab. Dann wird nach Erkalten des Rezipienten der Basisdruck erreicht.

Bei Drücken unter 10^{-8} mbar sollte man nur Metaldichtungen verwenden, um die hohen Desorptionsraten der FPM-Dichtungen zu umgehen.

Leck- und Permeationsraten können bei Drücken bis 10^{-10} mbar in Metallbehältern ohne größeren Aufwand genügend klein gehalten werden.

7.2.3.2 Pumpen hoher Gaslasten mit Turbomolekularpumpen

Bei hohen Gaslasten werden Turbopumpen starken Beanspruchungen ausgesetzt. Die Gasreibung heizt die Rotoren auf. Die maximalen Gaslasten werden durch die zulässige Rortemperatur von 120 °C begrenzt.

Da die Reibleistung dem Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit proportional ist, reduziert man bei Pumpen für Betrieb mit hohen Gaslasten die Drehzahl. Man erreicht so höhere Gaslasten auf Kosten des Saugvermögens und besonders des Kompressionsverhältnisses, was für solche Pumpen kein großer Nachteil ist, da sie nicht zur Hochvakuumherzeugung eingesetzt werden. Besonders kritisch ist das Pumpen von schweren Edelgasen. Durch ihr hohes Atomgewicht erzeugen sie beim Auftreffen auf den Rotor große Wärmemengen, können aber auf Grund ihrer geringen spezifischen Wärmekapazität nur wenig Wärme auf den Stator bzw. auf das Gehäuse übertragen, was zu hohen Rotortemperaturen führt. Deshalb sind die maximalen Gaslasten für diese Gase relativ niedrig.

Beim Betrieb mit Prozessgasen erfüllt die Turbopumpe zwei wichtige Funktionen:

- ▶ schnelles Evakuieren der Prozesskammer auf niedrigen Druck (saubere Anfangsbedingungen)
- ▶ Konstanthaltung des gewünschten Druckes während des Vakuumprozesses (Beschichtung, Ätzung etc.)

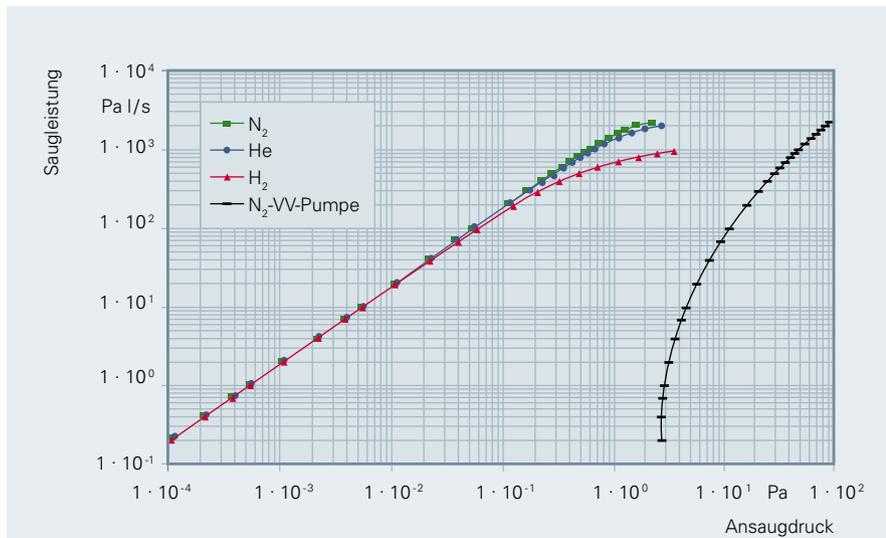


Abb. 7.4: Saugleistung von TPH 2000 PC und Duo 120 C

Üblicherweise sind der Gasdurchsatz Q und der Arbeitsdruck p_a während eines Prozesses vorgegeben und damit auch das Saugvermögen $S = \frac{Q}{p_a}$ an der Prozesskammer.

Die Turbopumpe wird nach dem erforderlichen Gasdurchsatz ausgewählt. Im Katalog sind die maximal zulässigen Gasdurchsätze für verschiedene Gase der jeweiligen Pumpe angegeben. Man bedient sich dabei der Saugleistungskurven von Turbo- und Vorpumpen Abbildung 7.4. Die Saugleistung muss für beide Pumpen gleich sein, da der gleiche Gasstrom nacheinander beide Pumpen passiert: $S_v = \frac{Q}{p_v}$.

Für die Vorpumpe gilt folgende Faustregel: Wird der maximale Gasdurchsatz der Turbopumpe erreicht, so ist das Saugvermögen der Vorpumpe so groß zu wählen, dass nur die Hälfte der Vorvakuumverträglichkeit ausgenutzt wird.

Das Saugvermögen an der Prozesskammer wird entweder über die Drehzahl oder ein Regelventil vor der Turbopumpe auf den erforderlichen Wert gedrosselt. Die Regelung über die Drehzahl kann oft nicht angewendet werden, da die Einstellung des gewünschten Druckes über die Drehzahl zu lange dauert.

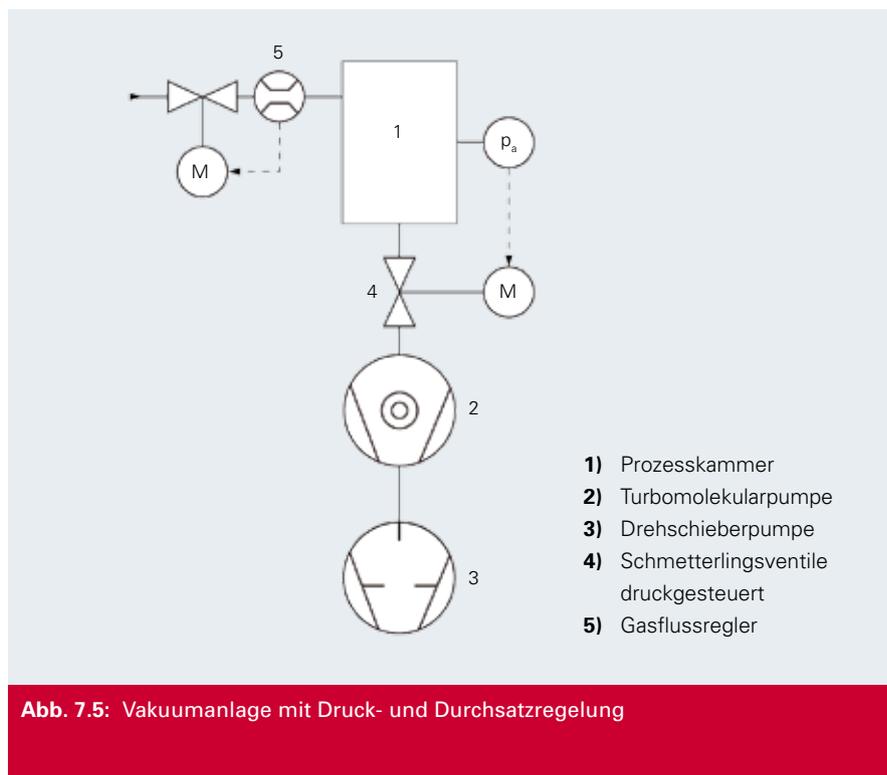


Abb. 7.5: Vakuumanlage mit Druck- und Durchsatzregelung

Beispiel:

Wir betrachten eine Anlage nach Abbildung 7.5.

$Q = 20 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ Gasdurchsatz

$p_s = 0,05 \text{ mbar}$ Prozessdruck

Daraus ergibt sich ein Saugvermögen von $S = 400 \text{ l/s}$. Wir wählen als Turbopumpe (2) eine HiPace 2300 und als Vorpumpe eine Uno 120 (3). Mit dieser Vorpumpe erreichen wir bei einem Gasdurchsatz von $20 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ einen Vorvakuumdruck von $0,8 \text{ mbar}$, also etwas weniger als die Hälfte der Vorvakuumverträglichkeit von $1,8 \text{ mbar}$.

Das Prozessgas wird über einen Gasflussregler (5) in die Kammer (1) eingelassen. Das vom Druck p_g gesteuerte Schmetterlingsventil (4) drosselt das Saugvermögen der Turbopumpe (2). Nach Ende des Prozessschrittes stellt man die Gaszufuhr ab, öffnet das Regelventil vollständig um die Kammer wieder sauber zu evakuieren. Dabei wird ein neues Werkstück in die Prozesskammer eingeschleust. Weitere Hinweise für das Pumpen hoher Gaslasten sowie korrosiver und abrasiver Stoffe finden Sie in Kapitel 2.7.3.

7.3 Leitwerte von Rohrleitungen

Bei der Berechnung der Auspumpzeiten von Behältern haben wir sowohl bei dem Wälzkolbenpumpstand als auch bei dem Turbopumpstand die Rohrleitungswiderstände unberücksichtigt gelassen. Eine Rohrleitung zwischen einem Behälter und einer Pumpe reduziert das Saugvermögen.

7.3.1 Laminarer Leitwert

Betrachten wir den Pumpstand für die Trocknungsanlage in Abschnitt 7.2.2 Abbildung 7.2 und berechnen den Druckabfall zwischen Kondensator und Vorpumpe. In diesem Fall ist durch den Druck von 4.285 Pa und das Saugvermögen der Vorpumpe von $S_v = 107 \text{ m}^3/\text{h} = 2,9722 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ein Gasdurchsatz von $Q = 4.285 \cdot 2,9722 \cdot 10^{-2} = 127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ vorgegeben. Die Rohrleitung DN 63 hat einen Innendurchmesser von 0,07 m und eine Länge von 2 m. Zwei Rohrbogen 90° werden mit einer äquivalenten Länge von je 0,2 m berücksichtigt.

Aus $p_2 = 4.285 \text{ mbar}$ und $\bar{l} \cdot p_2 = 6,65 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$ sowie dem Rohrdurchmesser $d = 0,07 \text{ m}$ bestimmen wir den Strömungsbereich über die Knudsenzahl $Kn = \frac{\bar{l}}{d}$ (Formel 1-9) und erhalten $Kn = 2,22 \cdot 10^{-5}$. Da $Kn < 0,01$ ist, ergibt sich viskose Strömung. Diese kann laminar oder turbulent sein, wobei wir laminare bevorzugen, da die Leitwerte wesentlich höher sind als bei turbulenter Strömung und somit wesentlich geringere Saugvermögensverluste auftreten. Für Laminarströmung muss die Reynoldszahl $Re < 2.300$ sein.

Zur Berechnung der Reynoldszahl bestimmen wir zunächst die Strömungsgeschwindigkeit v im Rohr:

$$v = \frac{4 \cdot S_v}{d^2 \cdot \pi} = 8,66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und die Dichte ρ der Luft bei 42,85 mbar aus der Luftdichte $\rho_0 = 1,293 \text{ kg}/\text{m}^3$ bei Atmosphärendruck.

$$\rho = \frac{1,293 \cdot 42,85}{1013} = 0,0547 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ und erhalten nach Formel 1-10:}$$

$$Re = \frac{\rho}{\eta} \cdot v \cdot d = 1.822, \text{ also Laminarströmung.}$$

Zur Berechnung des Druckes p_1 benutzen wir Formel 1-21:

$$L_{Rl} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

und multiplizieren mit $\Delta p = p_1 - p_2$ und erhalten so den Gasdurchsatz:

$$Q = L_{Rl} \cdot \Delta p = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1^2 - p_2^2).$$

Da $p_2 = 4.285 \text{ Pa}$ ist, und $Q = 127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ kann man direkt daraus p_1 ermitteln:

$$Q_{\text{diff}} = q_{\text{diff}} \cdot A_d \sqrt{p_2^2 + \frac{Q \cdot 256 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4}} = 4.287,2 \text{ Pa}$$

Wir haben lediglich einen Druckverlust von $\Delta p = 2,2 \text{ Pa}$, einen sehr kleinen Wert. Den Leitwert der Rohrleitung erhalten wir aus der Formel 1-14:

$$L_{Ri} = \frac{Q}{\Delta p} = 57,73 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Das effektive Saugvermögen

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_v \cdot L_{Ri}}{S_v + L_{Ri}} = 0,029707 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

ist nur geringfügig kleiner als das ohne die Rohrleitung: $S_v = 0,029722 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.3.2 Molekularer Leitwert

Betrachten wir nun noch den Leitwert der gleichen Rohrleitung im molekularen Strömungsbereich. Das Rohr von 0,07 m Durchmesser hat eine Länge von 2 m. Die beiden 90° Rohrbögen [20] berücksichtigen wir mit Ihrer gestreckten Länge von je 0,235 m, also insgesamt $l = 2,47 \text{ m}$. Der Rohrleitungswiderstand ist nach Formel 1-22:

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l} = 0,017123 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Hierbei ist $\bar{c} = 471 \text{ m/s}$ für Luft bei $T = 293 \text{ K}$. Der Blendenleitwert des Rohreintritts ist bereits berücksichtigt.

Das effektive Saugvermögen erhält man nach der Formel:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_v \cdot L_{Rm}}{S_v + L_{Rm}} = 1,0864 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ mit } S_v = 2,9722 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Im molekularen Strömungsbereich würde das Saugvermögen der Vorpumpe auf fast ein Drittel gemindert! Man muss in diesem Bereich unbedingt auf kurze Wege und große Leitungsquerschnitte zwischen Pumpe und Rezipient achten. Dies gilt besonders für Turbopumpen, die am besten direkt an den Rezipienten angeflanscht werden.

Vacuum Technology**▼ Abbildungsverzeichnis**

Abbildung	1.1 Vakuum im Überblick	9
Abbildung	1.2 Definition des Totaldruckes	10
Abbildung	1.3 Definition des Partialdruckes	10
Abbildung	1.4 Mittlere freie Weglänge	13
Abbildung	1.5 Strömungsarten im Vakuum	14
Abbildung	1.6 Strömungsbereiche im Vakuum	16
Abbildung	1.7 Diagramm zur Ermittlung der Leitwerte von Rohren	18
Abbildung	1.8 Ausflussfunktion bei gasdynamischer Strömung	20
Abbildung	1.9 Dampfdruckkurven verschiedener Stoffe	22
Abbildung	1.10 Sättigungsdampfdruck von Wasser	23
Abbildung	2.1 Übersicht Vakuumpumpen	26
Abbildung	2.2 Funktionsprinzip der Drehschieberpumpe	29
Abbildung	2.3 Pfeiffer Vacuum Drehschieberpumpen	31
Abbildung	2.4 Zubehör für Drehschieberpumpen	37
Abbildung	2.5 Funktionsprinzip einer Membranpumpe	38
Abbildung	2.6 Typenbezeichnung von Membranpumpen	39
Abbildung	2.7 Funktionsprinzip der Hubkolbenpumpe	40
Abbildung	2.8 Funktionsprinzip der Schraubpumpe	42
Abbildung	2.9 Rotoren der HeptaDry™	43
Abbildung	2.10 Arbeitsbereich der HeptaDry™	44
Abbildung	2.11 HeptaDry™ mit Anschlüssen und Zubehör	45
Abbildung	2.12 Funktionsprinzip einer Wälzkolbenpumpe	46
Abbildung	2.13 Funktionsprinzip der gasgekühlten Wälzkolbenpumpe	48
Abbildung	2.14 Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen	49
Abbildung	2.15 Saugvermögen von Pumpständen mit Okta 2000 und verschiedenen Vorpumpen	50
Abbildung	2.16 Funktionsprinzip der Seitenkanalvakuumpumpe	56
Abbildung	2.17 Funktionsprinzip der Turbomolekularpumpe	58
Abbildung	2.18 Spezifisches Saugvermögen von Turbopumpen	60
Abbildung	2.19 Saugvermögen als Funktion des Molekulargewichtes	60
Abbildung	2.20 Saugvermögen als Funktion des Ansaugdruckes	61
Abbildung	2.21 Funktionsprinzip der Holweckstufe	61

	Seite
Vacuum Technology	
▼ Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 2.22 Kompressionsverhältnisse von reinen Turbo- und Turbodragspumpen	62
Abbildung 2.23 Typisches Restgasspektrum einer Turbomolekularpumpe	63
Abbildung 2.24 Standardturbopumpen HiPace™	66
Abbildung 2.25 Magnetgelagerte Turbopumpen HiPace™ MC	67
Abbildung 2.26 Zubehör für Turbopumpen	70
Abbildung 3.1 Aufbau eines Membran-Vakuummeters	73
Abbildung 3.2 Aufbau eines kapazitiven Membran-Vakuummeters	73
Abbildung 3.3 Funktionsweise des Pirani-Vakuummeters	74
Abbildung 3.4 Kennlinien des Pirani-Vakuummeters	75
Abbildung 3.5 Aufbau eines invertierenden Magnetrons	76
Abbildung 3.6 Funktionsweise des invertierenden Magnetrons	77
Abbildung 3.7 Aufbau einer Bayard-Alpert-Messröhre	78
Abbildung 3.8 Druckmessbereiche und Messprinzipien	79
Abbildung 3.9 Anwendungskonzepte DigiLine™	82
Abbildung 3.10 Anwendungskonzepte ActiveLine	84
Abbildung 3.11 Steuergerät TPG 300 für ModulLine Messröhren	85
Abbildung 4.1 Total- und Partialdruckmessung	86
Abbildung 4.2 Komponenten eines Massenspektrometers	87
Abbildung 4.3 Funktion des Sektorfeldmassenspektrometers	88
Abbildung 4.4 Prinzip des Quadrupolmassenspektrometers	89
Abbildung 4.5 Stabilitätsdiagramm eines Quadrupolfilters	90
Abbildung 4.6 Ionendichte als Funktion der Elektronenenergie	93
Abbildung 4.7 Bruchstückionenverteilung von CO ₂	95
Abbildung 4.8 Schnitt durch eine Axialionenquelle	96
Abbildung 4.9 Gitterionenquelle	96
Abbildung 4.10 Diskriminierung von EID-Ionen	97
Abbildung 4.11 Cross-Beam-Ionenquelle	98
Abbildung 4.12 Gasdichte Axialionenquelle	98
Abbildung 4.13 SPM-Ionenquelle	99
Abbildung 4.14 PrismaPlus™-Ionenquelle	100
Abbildung 4.15 Funktionsweise des Faraday-Cups	101
Abbildung 4.16 Sekundärelektronenvervielfacher SEM	102

	Seite
Vacuum Technology	
▼ Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 4.17 Funktionsweise des kontinuierlichen C-SEM	104
Abbildung 4.18 Quadrupolmassenspektrometer mit Gaseinlasssystem, Cross-Beam-Ionenquelle und Kühlfalle	106
Abbildung 4.19 Differenziell gepumptes Quadrupolmassenspektrometer mit verschiedenen Gaseinlässen	106
Abbildung 4.20 Potenzialverlauf in einer elektrisch hochgelegten Ionenquelle	108
Abbildung 4.21 Aufbau der Detektoren in einem HiQuad™ Analysator, QMA 400 mit Faraday-Cup und SEV	110
Abbildung 5.1 Blasenlecktest bei einem Fahrradschlauch	114
Abbildung 5.2 Schema eines Helium-Gegenstromlecksuchers	115
Abbildung 5.3 Lokale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuummethode	117
Abbildung 5.4 Integrale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuummethode	118
Abbildung 5.5 Lecksucher SmartTest HLT 560	120
Abbildung 5.6 Lecksucher SmartTest, HLT 572 mit Bypass und trockener Vorpumpe XtraDry™	121
Abbildung 6.1 O-Ring in Nut und in Ecklage	124
Abbildung 6.2 Zentrierringe	124
Abbildung 6.3 Trapezdichtung mit Distanzstück	125
Abbildung 6.4 Drehdurchführung mit Radialwellendichtringen	126
Abbildung 6.5 Kleinflanschverbindungen	127
Abbildung 6.6 Klammer- und Festflanschverbindungen	128
Abbildung 6.7 Conflat®-Flanschverbindung	129
Abbildung 6.8 Hochvakuumeckventil	132
Abbildung 6.9 Hochvakuum-Inline-Ventil mit elektropneumatischer Betätigung	132
Abbildung 6.10 Zugschieberventil	133
Abbildung 6.11 Elektropneumatisch betätigter Balgzugschieber	134
Abbildung 6.12 Pneumatisch betätigtes Plattenventil	134
Abbildung 6.13 UHV-Dosierventil und elektromagnetisches Eckventil	135
Abbildung 6.14 UHV-Katzenschwanzdurchführung	136
Abbildung 6.15 UHV-Mehrfach-Metall-Keramik-Stromdurchführung	137
Abbildung 7.1 Saugvermögen eines Pumpstandes mit Hepta 100 und Okta 500	141
Abbildung 7.2 Trocknungsanlage (schematisch)	142
Abbildung 7.3 Wälzkolbenpumpstand zur Dampfkondensation	144
Abbildung 7.4 Saugleistung von TPH 2000 PC und Duo 120 C	148
Abbildung 7.5 Vakuumanlage mit Druck- und Durchsatzregelung	149

	Seite
Vacuum Technology	
▼ Tabellenverzeichnis	
Tabelle 1.1 Totaldruck und Zusammensetzung der Luft bei 20 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit	10
Tabelle 1.2 Druckbereiche/Teilchenzahldichte	11
Tabelle 1.3 Umrechnungstafel für Druckeinheiten	11
Tabelle 1.4 Molare Massen und mittlere thermische Geschwindigkeiten verschiedener Gase	13
Tabelle 1.5 Mittlere freie Weglänge verschiedener Gase bei 0 °C	14
Tabelle 1.6 Umrechnungstafel für Durchflüsseinheiten, Längen und Temperaturen	17
Tabelle 2.1 Kenndaten HenaLine™	32
Tabelle 2.2 Kenndaten UnoLine™ Plus	32
Tabelle 2.3 Kenndaten PentaLine™	33
Tabelle 2.4 Kenndaten DuoLine®	33
Tabelle 2.5 Kenndaten Duo M-Reihe	34
Tabelle 2.6 Kenndaten Duo C- und Duo MC-Reihe	34
Tabelle 2.7 Ölsorten für Vorpumpen und Wälzkolbenpumpen	35
Tabelle 2.8 Kenndaten von Membranpumpen	39
Tabelle 2.9 Kenndaten der Kolbenpumpen XtraDry™	41
Tabelle 2.10 Anschlüsse der HeptaDry™ Baureihe	45
Tabelle 2.11 Kenndaten HeptaDry™	45
Tabelle 2.12 Kenndaten OktaLine™	52
Tabelle 2.13 Kenndaten OnTool™ Booster	57
Tabelle 2.14 Vergleich von Turbo- und Turbodragpumpen	67
Tabelle 2.15 Kenndaten HiPace™	68
Tabelle 2.16 Antriebsgeräte und Netzteile	69
Tabelle 3.1 Transmitter und Messröhren	80
Tabelle 3.2 Auswahltabelle Drucksensoren	81
Tabelle 4.1 Filamentmaterialien und deren Anwendungen	95
Tabelle 4.2 Detektoren und deren Eigenschaften	103
Tabelle 4.3 Verschiedene Gaseinlasssysteme und deren Eigenschaften	105
Tabelle 5.1 Auswahltabelle Lecksucher SmartTest	119
Tabelle 6.1 O-Ringnuten Dimensionierungstabelle für axiale, statische Abdichtung	123
Tabelle 6.2 Vergleich von Dichtungsmaterialien	126
Tabelle 7.1 Saugvermögen eines Wälzkolbenpumpstandes	141

Vacuum Technology**▼ Formelverzeichnis**

Formel 1-1	Barometerformel	8
Formel 1-2	Barometerformel numerisch	8
Formel 1-3	Druckdefinition	9
Formel 1-4	Allgemeine Gasgleichung	12
Formel 1-5	Gasdruck	12
Formel 1-6	Wahrscheinlichste Geschwindigkeit	12
Formel 1-7	Mittlere Geschwindigkeit	12
Formel 1-8	Mittlere freie Weglänge	13
Formel 1-9	Knudsenzahl	15
Formel 1-10	Reynoldszahl	15
Formel 1-11	pV-Durchfluss	16
Formel 1-12	Definition Saugvermögen	16
Formel 1-13	Saugleistung	16
Formel 1-14	Definition Leitwerte	18
Formel 1-15	Parallelschaltung Leitwerte	18
Formel 1-16	Reihenschaltung Leitwerte	18
Formel 1-17	Verblockung	19
Formel 1-18	Gasdynamische Strömung	19
Formel 1-19	Blendenleitwert	19
Formel 1-20	Blendendurchfluss	19
Formel 1-21	Rohr laminar	20
Formel 1-22	Rohr molekular	20
Formel 1-23	Leitwert Rohr molekular	21
Formel 1-24	Desorption	22
Formel 1-25	Desorption aus Kunststoffen	24
Formel 1-26	Permeation	24
Formel 1-27	Leckrate	24
Formel 1-28	Enddruck (t)	24
Formel 2-1	Kompressionsverhältnis	27
Formel 2-2	Gasstrom Pumpkombination	28
Formel 2-3	Rückströmeleitwert	28
Formel 2-4	Reales Kompressionsverhältnis	28
Formel 2-5	Rekursionsformel Saugvermögen	28

	Seite
Vacuum Technology	
▼ Formelverzeichnis	
Formel 2-6 Wasserdampfverträglichkeit	28
Formel 2-7 Wasserdampfkapazität	29
Formel 2-8 Leistung Wälzkolbenpumpe	50
Formel 2-9 K_0 Turbopumpe	59
Formel 2-10 Saugvermögen Turbopumpe	59
Formel 2-11 S_{eff} Turbopumpe	59
Formel 2-12 Spezifisches Saugvermögen	59
Formel 2-13 Saugvermögen Holweckstufe	62
Formel 2-14 Kompressionsverhältnis Holweckstufe	62
Formel 2-15 Enddruck	64
Formel 4-1 Quadrupol-Ablenkspannung	88
Formel 4-2 Stabilitätsparameter a	89
Formel 4-3 Stabilitätsparameter q	89
Formel 4-4 Stabilitätsbedingung U	90
Formel 4-5 Stabilitätsbedingung V	90
Formel 4-6 Hochpassbedingung	90
Formel 4-7 Einschussblende	91
Formel 4-8 Einschusswinkel	91
Formel 4-9 Maximale Beschleunigungsspannung $U_{z\text{max}}$	91
Formel 4-10 HF-Leistung	91
Formel 4-11 Streuung	92
Formel 4-12 Ionenstrom	94
Formel 5-1 Leckratenumrechnung bei Differenzdruckmessung	117
Formel 7-1 Gaslast WKP	138
Formel 7-2 K_0 WKP	139
Formel 7-3 K_0 laminar	139
Formel 7-4 K_0 molekular	139
Formel 7-5 S1 für $\Delta p_d \ll p_v$	139
Formel 7-6 S gegen hohen Druck	139
Formel 7-7 S gegen niedrigen Druck	140
Formel 7-8 Auspumpzeit	140
Formel 7-9 Berechnung Kondensationsfläche	143
Formel 7-10 Diffusionskoeffizient (T)	147

Vacuum Technology

▼ **Literaturverzeichnis**

- [1] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, Tabelle 19.9 S. 788
- [2] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (4.1.1) S. 65 ff.
- [3] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (4.2.2) S. 76 – 79
- [4] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (9.3.3) S. 329
- [5] Pupp / Hartmann, Vakuumtechnik Carl Hanser Verlag (19) S. 108
- [6] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (5.2.2) S. 150
- [7] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (6.6.1) S. 244 ff.
- [8] Schweitzer, Bleuler, Traxler, Active Magnetic Bearings,
Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
- [9] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (9.3.2, 9.3.3) S. 327 – 331
- [10] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (9.2.1, 9.2.2) S. 321 – 325
- [11] Fremerey, Vacuum 32 (1982) S. 685 – 690
- [12] Hobson und Redhead, Can. J. Phys. 36 (1958) S. 271
- [13] Redhead, Electron Stimulated Desorption, Vacuum 12 (1962) S. 267
- [14] Dawson, Quadrupol Mass Spectrometry, Elsevier Amsterdam (1976)
- [15] Brubaker, 14th National Symposium, Am. Vac. Soc. (1967) S. 23
- [16] Fachbericht Balzers BG 800003 Das Funktionsprinzip des
Quadrupol Massenspektrometers. (1990)
- [17] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (7.1.3) S. 272
- [18] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (7.2) S. 273 ff.
- [19] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (15.3.3.4) S. 638
- [20] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik,
9. Auflage Vieweg Verlag, (4.4.6) S. 121

Danksagung

An dieser Stelle bedanken wir uns herzlich beim Hanser Verlag und Vieweg Verlag für die uns zur Verfügung gestellten Abbildungen im Vacuum Technology Book.

Pfeiffer Vacuum GmbH

Verwendung von Markennamen

Markennamen der Pfeiffer Vacuum GmbH: Markennamen der Firma Swagelok:

CombiLine™
 DigiLine™
 DuoLine®
 HeptaDry™
 HiPace™
 HiQuad®
 OktaLine™
 OnTool™ Booster
 OnTool DryPump™
 PrismaPlus™
 SplitFlow® Turbo
 UnoLine™
 UnoLine™ Plus
 XtraDry™

Cajon®
 Swagelok®
 VCR®

Markennamen der Firma Inficon:

Compact FullRange™ Gauge
 DualGauge™
 MaxiGauge™
 Quadera®
 SingleGauge™

Adresse

Pfeiffer Vacuum GmbH
 Headquarters/Germany
 Berliner Straße 43
 D-35614 Asslar

Tel. +49-(0) 6441-802-0
 Fax +49-(0) 6441-802-202

info@pfeiffer-vacuum.de
 www.pfeiffer-vacuum.net

Impressum

Vacuum Technology Know How
 Pfeiffer Vacuum GmbH, März 2009
 Schutzgebühr: Euro 15,-
 PI 0249 PD

