

 Know-how Book

Band **2**



# Inhalt

## Vakuumtechnik und Know-how

### 1 Einführung in die Vakuumtechnik

<b>1.1 Allgemeines</b>	<b>9</b>
1.1.1 Vakuum – Definition	9
1.1.2 Vakuum im Überblick	9
<b>1.2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
1.2.1 Druck – Definition	9
1.2.2 Allgemeine Gasgleichung	11
1.2.3 Teilchenzahldichte	12
1.2.4 Thermische Teilchengeschwindigkeit	12
1.2.5 Mittlere freie Weglänge	12
1.2.6 Strömungsarten	14
1.2.7 pV-Durchfluss	15
1.2.8 Leitwert	16
<b>1.3 Einflüsse in realen Vakuumsystemen</b>	<b>18</b>
1.3.1 Verunreinigungen	18
1.3.2 Kondensieren und Verdampfen	18
1.3.3 Desorption, Diffusion, Permeation und Lecks	19
1.3.4 Ausheizen	20
1.3.5 Restgaszusammensetzung	20

### 2 Auslegung

<b>2.1 Allgemeines</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Berechnungen</b>	<b>22</b>
2.2.1 Dimensionierung eines Wälzkolbenpumpstands	22
2.2.2 Kondensatorbetrieb	25
2.2.3 Turbopumpstände	27
2.2.3.1 Auspumpen eines Behälters mit einem Turbopumpstand auf $10^{-8}$ hPa	27
2.2.3.2 Pumpen hoher Gaslasten mit Turbomolekularpumpen	29
<b>2.3 Leitwerte von Rohrleitungen</b>	<b>30</b>
2.3.1 Laminarer Leitwert	30
2.3.2 Molekularer Leitwert	30

### 3 Mechanische Komponenten im Vakuum

<b>3.1 Allgemeines</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Werkstoffe</b>	<b>32</b>
3.2.1 Metallische Werkstoffe	33
3.2.1.1 Edelstahl	33
3.2.1.2 Normalstahl	36
3.2.1.3 Aluminium	36
3.2.2 Dichtungswerkstoffe	36
3.2.2.1 Elastomerdichtungen	36
3.2.2.2 Metaldichtungen	37

# Inhalt

<b>3.3 Verbindungen</b>	<b>38</b>
3.3.1 Nicht lösbare Verbindungen	38
3.3.1.1 Schweißen	38
3.3.1.2 Löt-, Verschmelzen und Metallisieren	39
3.3.2 Lösbare Flanschverbindungen	40
3.3.2.1 O-Ring-Dichtungen und Nuten	40
3.3.2.2 ISO-KF-Flansche	41
3.3.2.3 ISO-K/ISO-F-Flansche	42
3.3.2.4 CF-Flansche	43
3.3.2.5 COF-Flansche	44
3.3.2.6 Weitere Flanschstandards	44
3.3.2.7 Schrauben	44
<b>3.4 Vakuumkammern</b>	<b>47</b>
3.4.1 Verarbeitung – Oberflächen	47
3.4.2 Verarbeitung – Reinigung	48
<b>3.5 Komponenten und Durchführungen</b>	<b>49</b>
3.5.1 Schläuche und elastische Verbindungen	49
3.5.2 Schaugläser	49
3.5.3 Stromdurchführungen	49
3.5.4 Weitere Durchführungen	50
<b>3.6 Ventile</b>	<b>50</b>
3.6.1 Ansteuerung von Ventilen	50
3.6.2 Eckventile	51
3.6.3 Inline- und Membranventile	51
3.6.4 Schieberventile	52
3.6.5 Schmetterlingsventile und Kugelhähne	52
3.6.6 Gasdosier- und Gasregelventile	52
<b>3.7 Manipulatoren und mechanische Durchführungen</b>	<b>52</b>
3.7.1 Funktionsprinzipien	53
3.7.1.1 Membranbalggedichtete Translation	53
3.7.1.2 Balggedichtete Rotation	53
3.7.1.3 Magnetisch gekoppelte Rotation und Translation	54
3.7.1.4 Elastomergedichtete Rotation und Translation	54
3.7.1.5 Rotation über Gleitdichtungen mit gepumpten Zwischenräumen	54
3.7.2 Genauigkeit, Wiederholgenauigkeit und Auflösung	54
3.7.3 Technische Ausstattung und Eigenschaften	55
3.7.3.1 Konstruktionsmerkmale eines Z-Achsen- Präzisionsmanipulators	55
3.7.3.2 Konstruktionsmerkmale eines XY-Achsen- Präzisionsmanipulators	56
<b>4 Vakuumherzeugung</b>	
<b>4.1 Pumpprinzipien und Leistungsdaten von Vakuumpumpen</b>	<b>58</b>
4.1.1 Einteilung der Vakuumpumpe	58
4.1.2 Saugvermögen und Saugleistung	59
4.1.3 Enddruck und Basisdruck	59
4.1.4 Kompressionsverhältnis	59
4.1.5 Saugvermögen von hintereinander geschalteten Pumpstufen	59
4.1.6 Gasballast	59
4.1.7 Wasserdampfverträglichkeit / Wasserdampfkapazität	60
4.1.8 Sperrgas	60

# Inhalt

<b>4.2 Drehschiebervakuumpumpen</b>	<b>60</b>
4.2.1 Aufbau / Funktionsprinzip	60
4.2.2 Anwendungshinweise	61
4.2.3 Portfolioüberblick	61
4.2.3.1 Einstufige Drehschiebervakuumpumpen	62
4.2.3.2 Zweistufige Drehschiebervakuumpumpen	63
4.2.3.3 Auswahl des Betriebsmittels	66
4.2.3.4 Zubehör	66
<b>4.3 Membranvakuumumpen</b>	<b>68</b>
4.3.1 Aufbau / Funktionsprinzip	68
4.3.2 Anwendungshinweise	68
4.3.3 Portfolioüberblick	68
4.3.4 Zubehör	68
<b>4.4 Schraubenvakuumpumpen</b>	<b>69</b>
4.4.1 Aufbau / Funktionsprinzip	69
4.4.2 Anwendungshinweise	69
4.4.3 Portfolioüberblick	70
4.4.4 Zubehör	70
<b>4.5 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen – Vakuumherzeugung</b>	<b>71</b>
4.5.1 Aufbau / Funktionsprinzip	71
4.5.2 Anwendungshinweise	71
4.5.3 Portfolioüberblick ACP	72
4.5.3.1 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen, luftgekühlt	72
4.5.3.2 Zubehör	73
<b>4.6 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen – Prozesse im Vakuum</b>	<b>73</b>
4.6.1 Aufbau / Funktionsprinzip	74
4.6.2 Anwendungshinweise	75
4.6.3 Schleusen und nicht-korrosive Gase	75
4.6.4 Prozesschemie	76
4.6.5 Harte Prozesschemie	76
4.6.6 Portfolioüberblick	77
4.6.6.1 Prozesspumpen, wassergekühlt	77
4.6.6.2 Zubehör	78
<b>4.7 Wälzkolbenvakuumpumpen</b>	<b>78</b>
4.7.1 Aufbau / Funktionsprinzip	78
4.7.2 Anwendungshinweise	80
4.7.2.1 Wahl der Vorpumpe	80
4.7.3 Portfolioüberblick	81
4.7.3.1 Standardpumpen	81
4.7.3.2 Standardpumpen mit Magnetkupplung	81
4.7.3.3 Pumpen in ATEX-Ausführung	81
4.7.3.4 Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen	82
4.7.4 Zubehör	82
4.7.5 Pumpstände	82
<b>4.8 Seitenkanalhochvakuumumpen</b>	<b>83</b>
4.8.1 Aufbau / Funktionsprinzip	83
4.8.2 Anwendungshinweise	83
4.8.3 Portfolioüberblick	83

# Inhalt

<b>4.9 Turbomolekularpumpen</b>	<b>83</b>
4.9.1 Aufbau / Funktionsprinzip	83
4.9.1.1 Funktionsprinzip Turbomolekularpumpe	84
4.9.1.2 Funktionsprinzip Holweckstufe	86
4.9.1.3 Pumpeigenschaften von Turbopumpen	87
4.9.2 Anwendungshinweise	88
4.9.3 Portfolioüberblick	89
4.9.3.1 Mechanisch gelagerte Turbopumpen	89
4.9.3.2 Aktiv magnetgelagerte Turbopumpen	90
4.9.3.3 Antriebsgeräte und Zubehör	90
<b>5 Vakuummessgeräte</b>	
<b>5.1 Grundlagen der Totaldruckmessung</b>	<b>92</b>
5.1.1 Direkte, gasartunabhängige Druckmessung	92
5.1.2 Indirekte, gasartabhängige Druckmessung	93
<b>5.2 Anwendungshinweise</b>	<b>95</b>
5.2.1 Messbereiche	95
5.2.2 Aktive Messröhren (Transmitter)	96
5.2.3 Passive Messröhren (Sensoren)	96
5.2.4 Kombinationsmessröhren	96
<b>5.3 Portfolioüberblick</b>	<b>96</b>
5.3.1 DigiLine	96
5.3.2 ActiveLine	99
5.3.3 ModulLine	100
<b>6 Massenspektrometer und Restgasanalyse</b>	
<b>6.1 Einleitung, Funktionsprinzip</b>	<b>102</b>
<b>6.2 Sektorfeld-Massenspektrometer</b>	<b>103</b>
6.2.1 Funktionsweise	103
6.2.2 Anwendungshinweise	104
<b>6.3 Quadrupol-Massenspektrometer QMS</b>	<b>104</b>
6.3.1 Quadrupol-Massenfilter	104
6.3.2 Ionenquellen	107
6.3.3 Detektor	110
6.3.4 Vakuumsysteme	112
6.3.5 Einlasssysteme	112
6.3.6 Anwendungshinweise	113
<b>6.4 Portfolio</b>	<b>114</b>
6.4.1 Vorteile der Pfeiffer Vacuum	115

# Inhalt

## 7 Lecksuche

<b>7.1 Allgemeines</b>	<b>118</b>
7.1.1 Lecks und deren Nachweis .....	118
7.1.2 Leckrate .....	118
7.1.3 Prüfgase .....	119
<b>7.2 Lecksuche mit Prüfgasen</b>	<b>119</b>
7.2.1 Aufbau eines Lecksuchers mit Massenspektrometer .....	119
7.2.2 Aufbau eines Lecksuchers mit Quarzfensterdetektor .....	120
7.2.3 Prüfverfahren .....	121
7.2.4 Kalibrierung des Lecksuchers .....	121
7.2.5 Lokale Lecksuche .....	121
7.2.6 Integrale Lecksuche .....	122
<b>7.3 Anwendungshinweise</b>	<b>122</b>
7.3.1 Lecksuche mit Helium .....	122
7.3.2 Vergleich der Prüfergebnisse mit Lecksuch-gerät und Quadrupol-Massenspektrometer .....	123
<b>7.4 Portfolio</b>	<b>124</b>
<b>7.5 Industrielle Dichtheitsprüfung</b>	<b>125</b>

## 8 Lösungen zum Kontaminationsmanagement

<b>8.1 Einführung</b>	<b>126</b>
<b>8.2 Kontamination</b>	<b>127</b>
<b>8.3 Das Wesen luftgetragener molekularer Verunreinigungen (AMC)</b>	<b>128</b>
<b>8.4 Von der molekularen Oberflächenverunreinigung SMC (Surface Molecular Contamination) zu Defekten</b>	<b>128</b>
<b>8.5 Portfolioüberblick</b>	<b>129</b>



# 1 Einführung in die Vakuumtechnik

## Vakuum Know-how

### Vakuum im Überblick

~ 10<sup>18</sup> hPa bei 3K  
 ≈ -3 · 10<sup>16</sup> g/m<sup>3</sup>  
 ≈ 100 Teilchen/m<sup>3</sup>

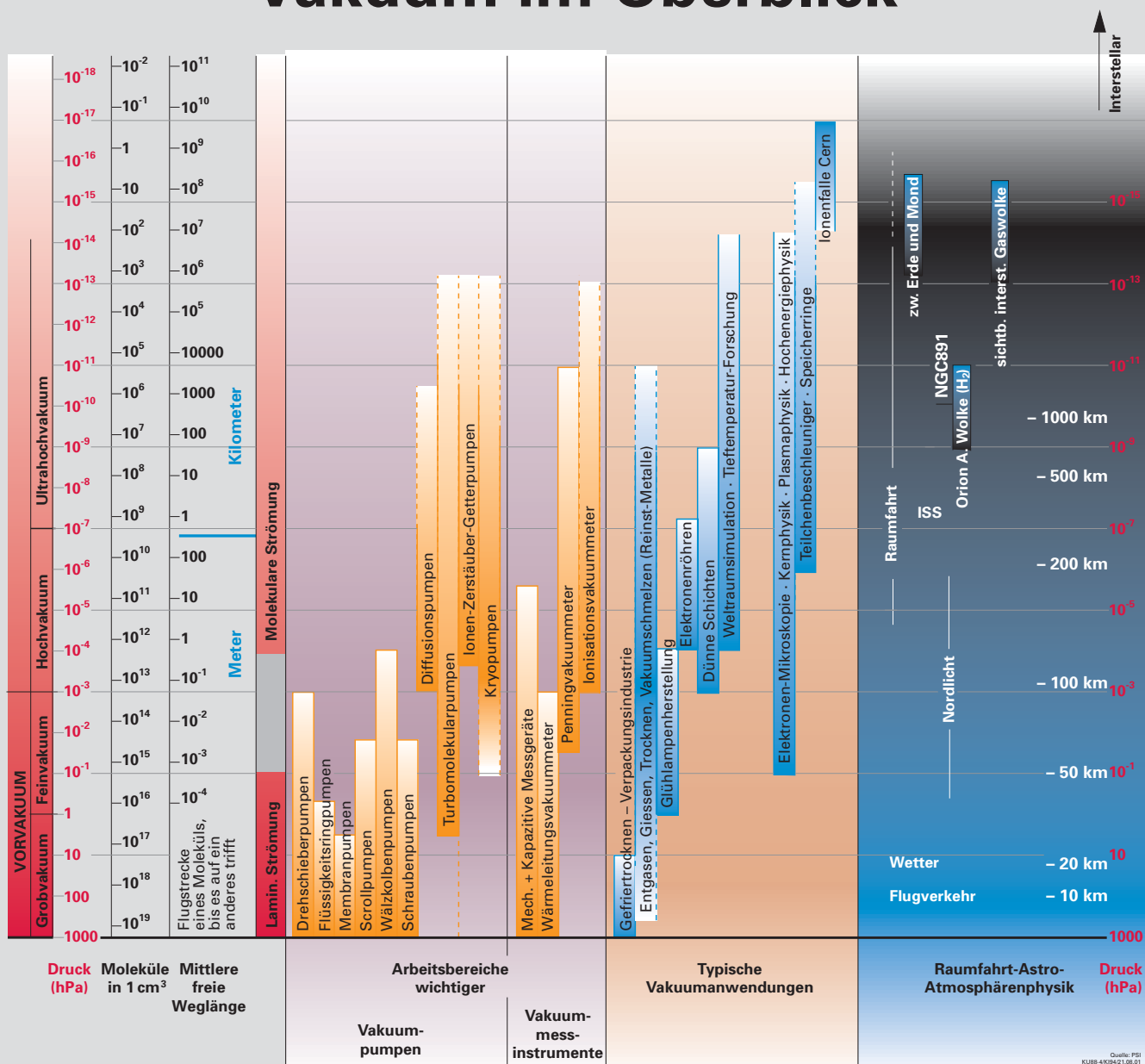


Abbildung 1.1: Vakuum im Überblick [1]



## 1.1 Allgemeines

### 1.1.1 Vakuum – Definition

Als Vakuum bezeichnet man umgangssprachlich den Zustand in einem Raum bei Drücken unterhalb des Atmosphärendrucks. Der Druck kann dabei von Gasen oder Dämpfen erzeugt werden, die im Raum gleichmäßig verteilt sind.

Normgerecht wird Vakuum definiert als „der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d. h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck.“ [2]

### 1.1.2 Vakuum im Überblick

Der Wert von 300 mbar in der Norm wird verständlich durch Betrachtung der barometrischen Höhenformel. Der Druck in der Atmosphäre sinkt mit steigender Höhe durch das abnehmende Gewicht der über einer Fläche stehenden Luftsäule.

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

Formel 1-1: Barometrische Höhenformel

- $p_h$  Atmosphärendruck bei der Höhe  $h$
- $p_0$  Atmosphärendruck auf Meereshöhe = 1.013,25 mbar oder 101.325 Pa
- $g$  Erdbeschleunigung = 9,81 m s<sup>-2</sup>
- $\rho_0$  Dichte der Luft auf Meereshöhe bei 0°C = 1,293 kg m<sup>-3</sup>

Nimmt man vereinfachend an, dass Dichte der Luft, Erdbeschleunigung und Atmosphärendruck auf Meereshöhe konstant sind, erhält man durch Zusammenfassung.

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

Formel 1-2: Barometrische Höhenformel, numerisch

Setzt man  $p_h = p_0/2$  und löst die Gleichung nach  $h$  auf, erhält man die Halbwertshöhe  $h_{1/2} = 5.548 \text{ m}$ . Dies bedeutet, dass sich der Atmosphärendruck alle 5.548 m halbiert.

Setzt man in die Formel die Höhe des Mount Everest ein, erhält man einen Druck von 335 mbar oder in der formellen SI-Einheit 33.500 Pa bzw. 335 hPa. Damit erklären sich die in der Norm genannten 300 mbar als niedrigster auf der Erdoberfläche vorkommender Atmosphärendruck.

In der Folge werden wir Drücke in diesem Buch in der SI-Einheit Pa angeben und um die Vorsilbe „hekto“ ergänzen, um die normgerechte SI-Einheit mit in Mitteleuropa gewohnten Zahlenwerten in mbar zu korrelieren.

Auf der Reiseflughöhe eines Verkehrsflugzeugs von rund 10.000 m ist der Druck bereits auf 290 hPa gesunken. Wetterballons erreichen eine Höhe von bis zu 30 km, wo ein Druck von 24 hPa herrscht. Polarumlaufende Wetter-satelliten fliegen auf einer polaren, sonnensynchronen Bahn in ca. 800 km Höhe. Hier ist der Druck bereits auf etwa 10<sup>-6</sup> hPa abgefallen. Je weiter man sich von einem Planeten, einer Sonne oder einem Sonnensystem entfernt, umso niedriger wird der Druck. Im interstellaren Raum des Weltalls herrschen die niedrigsten bekannten Drücke.

In einer Reihe von technischen Anwendungen wird der Druck nicht absolut angegeben, sondern relativ zum atmosphärischen Druck. Der Druckbereich unterhalb des atmosphärischen Drucks wird mit in einer negativen Zahl oder einer Prozentzahl bezeichnet. Beispiele sind Manometer, Druckminderer an Gasflaschen oder Anwendungen von Vakuumhebezeugen oder -transportsystemen.

Zur Erzeugung von Vakuum auf der Erde werden unterschiedliche Typen von Vakuumpumpen eingesetzt. Einen Überblick über die Arbeitsbereiche wichtiger Vakuumpumpen und -messgeräte gibt Abbildung 1.1: Vakuum im Überblick [1].

## 1.2 Grundlagen

### 1.2.1 Druck – Definition

Der Druck ist definiert als der Betrag einer senkrecht und gleichmäßig auf eine Flächeneinheit wirkenden Kraft.

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

Formel 1-3: Druckdefinition

- $p$  Druck [Pa]
- $F$  Kraft [N]; 1 N = 1 kg m s<sup>-2</sup>
- $A$  Fläche [m<sup>2</sup>]

In einem geschlossenen Behälter führen die Gasteilchen thermische Bewegungen aus. Bei der Wechselwirkung mit der Wand kommt es zu einer Vielzahl von Stößen auf atomarer und molekularer Ebene. Jeder einzelne Stoß übt durch Impulsübertragung eine Kraft auf die Wand des Behälters aus. Die Vielzahl der Stöße führt dazu, dass bei einem eingeschlossenen Gas ohne äußere Einflüsse an jeder Stelle immer der gleiche Druck unabhängig von Ort und Richtung der Messung herrscht.



Abbildung 1.2: Definition des Totaldrucks

In der Praxis hat man es nur in Ausnahmefällen mit einem einheitlichen Gas zu tun. Wesentlich häufiger sind Gemische aus verschiedenen Gasarten. Jede einzelne Gaskomponente übt einen spezifischen Druck aus, den man unabhängig vom Druck der anderen Komponenten messen könnte. Dieser Komponentendruck wird als Partialdruck bezeichnet. Bei idealen Gasen addieren sich die Partialdrücke der einzelnen Komponenten zum Totaldruck, ohne sich gegenseitig zu stören. Die Summe aller Partialdrücke ist gleich dem Totaldruck.

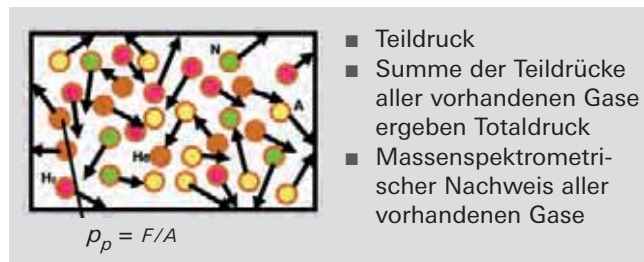


Abbildung 1.3: Definition des Partialdrucks

Ein Beispiel für ein Gasgemisch ist unsere Umgebungsluft. Ihre Partialdruckzusammensetzung ist in Tabelle 1.1 [3] gezeigt.

Gasart	Chem. Formel	Volumen-%	Partialdruck [hPa]
Stickstoff	N <sub>2</sub>	78,09	780,9
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20,95	209,5
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	< 2,3	< 23,3
Argon	Ar	9,3 · 10 <sup>-1</sup>	9,3
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	3,0 · 10 <sup>-2</sup>	3,0 · 10 <sup>-1</sup>
Neon	Ne	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	1,8 · 10 <sup>-2</sup>
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	< 1 · 10 <sup>-3</sup>	< 1 · 10 <sup>-2</sup>
Helium	He	5,0 · 10 <sup>-4</sup>	5,0 · 10 <sup>-3</sup>
Methan	CH <sub>4</sub>	2,0 · 10 <sup>-4</sup>	2,0 · 10 <sup>-3</sup>
Krypton	Kr	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	1,1 · 10 <sup>-3</sup>
Kohlenmonoxid	CO	< 1,6 · 10 <sup>-5</sup>	< 1,6 · 10 <sup>-4</sup>
Xenon	Xe	9,0 · 10 <sup>-6</sup>	9,0 · 10 <sup>-5</sup>
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	5,0 · 10 <sup>-6</sup>	5,0 · 10 <sup>-5</sup>
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	2,6 · 10 <sup>-6</sup>	2,6 · 10 <sup>-5</sup>
Ozon	O <sub>3</sub>	2,0 · 10 <sup>-6</sup>	2,0 · 10 <sup>-5</sup>
Wasserstoffperoxid	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4,0 · 10 <sup>-8</sup>	4,0 · 10 <sup>-7</sup>
Iod	I <sub>2</sub>	3,5 · 10 <sup>-9</sup>	3,5 · 10 <sup>-8</sup>
Radon	Rn	7,0 · 10 <sup>-18</sup>	7,0 · 10 <sup>-17</sup>

**Tabelle 1.1:** Zusammensetzung der atmosphärischen Luft. Die angegebenen Partialdrücke sind auf 1.000 hPa bezogen. Hinweise: Der angegebene Wert für Wasserdampf ist der Sättigungszustand bei 293 K (20°C). Die Werte für Kohlendioxid und Kohlenmonoxid schwanken in Abhängigkeit von Ort und Zeit. Die Angabe für Kohlenmonoxid ist der Spitzenwert einer Großstadt. Andere Quellen sprechen von einer natürlichen Wasserstoffkonzentration von 5 · 10<sup>-5</sup> % und einem Partialdruck von 5 · 10<sup>-4</sup> hPa.

Druckbereich	Druck in hPa	Druck in Pa	Teilchen pro cm <sup>3</sup>	Mittlere freie Weglänge in m
Atmosphärendruck	1.013,25	101.325	2,7 · 10 <sup>19</sup>	6,8 · 10 <sup>-8</sup>
Großvakuum (GV)	300...1	30.000...100	10 <sup>19</sup> ...10 <sup>16</sup>	10 <sup>-8</sup> ...10 <sup>-4</sup>
Feinvakuum (FV)	1...10 <sup>-3</sup>	100...10 <sup>-1</sup>	10 <sup>16</sup> ...10 <sup>13</sup>	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-1</sup>
Hochvakuum (HV)	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-1</sup> ...10 <sup>-5</sup>	10 <sup>13</sup> ...10 <sup>9</sup>	10 <sup>-1</sup> ...10 <sup>3</sup>
Ultrahochvakuum (UHV)	10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-10</sup>	10 <sup>9</sup> ...10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> ...10 <sup>8</sup>
Extrem hohes Vakuum (XHV)	<10 <sup>-12</sup>	<10 <sup>-10</sup>	<10 <sup>4</sup>	>10 <sup>8</sup>

Tabelle 1.2: Druckbereiche in der Vakuumtechnik

	Pa	bar	hPa	μbar	Torr	micron	atm	at	mm WS	psi	psf
Pa	1	1 · 10 <sup>-5</sup>	1 · 10 <sup>-2</sup>	10	7,5 · 10 <sup>-3</sup>	7,5	9,87 · 10 <sup>-6</sup>	1,02 · 10 <sup>-5</sup>	0,102	1,45 · 10 <sup>-4</sup>	2,09 · 10 <sup>-2</sup>
bar	1 · 10 <sup>5</sup>	1	1 · 10 <sup>-3</sup>	1 · 10 <sup>6</sup>	750	7,5 · 10 <sup>5</sup>	0,987	1,02	1,02 · 10 <sup>4</sup>	14,5	2,09 · 10 <sup>3</sup>
hPa	100	1 · 10 <sup>-3</sup>	1	1.000	0,75	750	9,87 · 10 <sup>-4</sup>	1,02 · 10 <sup>-3</sup>	10,2	1,45 · 10 <sup>-2</sup>	2,09
μbar	0,1	1 · 10 <sup>-6</sup>	1 · 10 <sup>-3</sup>	1	7,5 · 10 <sup>-4</sup>	0,75	9,87 · 10 <sup>-7</sup>	1,02 · 10 <sup>-6</sup>	1,02 · 10 <sup>-2</sup>	1,45 · 10 <sup>-5</sup>	2,09 · 10 <sup>-3</sup>
Torr	1,33 · 10 <sup>2</sup>	1,33 · 10 <sup>-3</sup>	1,33	1.330	1	1.000	1,32 · 10 <sup>-3</sup>	1,36 · 10 <sup>-3</sup>	13,6	1,93 · 10 <sup>-2</sup>	2,78
micron	0,133	1,33 · 10 <sup>-6</sup>	1,33 · 10 <sup>-3</sup>	1,33	1 · 10 <sup>-3</sup>	1	1,32 · 10 <sup>-6</sup>	1,36 · 10 <sup>-6</sup>	1,36 · 10 <sup>-2</sup>	1,93 · 10 <sup>-5</sup>	2,78 · 10 <sup>-3</sup>
atm	1,01 · 10 <sup>5</sup>	1,013	1.013	1,01 · 10 <sup>6</sup>	760	7,6 · 10 <sup>5</sup>	1	1,03	1,03 · 10 <sup>4</sup>	14,7	2,12 · 10 <sup>3</sup>
at	9,81 · 10 <sup>4</sup>	0,981	981	9,81 · 10 <sup>5</sup>	735,6	7,36 · 10 <sup>5</sup>	0,968	1	1 · 10 <sup>-4</sup>	14,2	2,04 · 10 <sup>3</sup>
mm WS	9,81	9,81 · 10 <sup>-5</sup>	9,81 · 10 <sup>-2</sup>	98,1	7,36 · 10 <sup>-2</sup>	73,6	9,68 · 10 <sup>-5</sup>	1 · 10 <sup>-4</sup>	1	1,42 · 10 <sup>-3</sup>	0,204
psi	6,89 · 10 <sup>3</sup>	6,89 · 10 <sup>-2</sup>	68,9	6,89 · 10 <sup>4</sup>	51,71	5,17 · 10 <sup>4</sup>	6,8 · 10 <sup>-2</sup>	7,02 · 10 <sup>-2</sup>	702	1	144
psf	47,8	4,78 · 10 <sup>-4</sup>	0,478	478	0,359	359	4,72 · 10 <sup>-4</sup>	4,87 · 10 <sup>-4</sup>	4,87	6,94 · 10 <sup>-3</sup>	1

Tabelle 1.3: Umrechnungstabelle für Druckeinheiten

Im Weltraum können je nach Nähe zu Galaxien Drücke unterhalb von  $10^{-18}$  hPa herrschen. Auf der Erde wurde über technische erzeugte Drücke von weniger als  $10^{-16}$  hPa berichtet. Der Bereich von Atmosphärendruck bis  $10^{-16}$  hPa überstreicht 19 Zehnerpotenzen. Spezifisch auf den jeweiligen Druckbereich angepasste Arten der Vakuumerzeugung und -messung führen zu der in Tabelle 1.2 gezeigten Unterteilung der einzelnen Druckbereiche.

Die Maßeinheit des Drucks ist das Pascal. Die Einheit wurde nach dem französischen Mathematiker, Physiker, Literaten und Philosophen Blaise Pascal (1623–1662) benannt. Die SI-Einheit Pascal setzt sich nach Formel 1-3 zusammen aus  $\text{Pa} = \text{N m}^{-2}$ . In der Praxis sind auch die Einheiten mbar, Torr und die in der Tabelle 1.3 aufgeführten Einheiten gebräuchlich.



Weitere Druckeinheiten und ihre Umrechnung finden Sie in unserer eVacuum-App.

### 1.2.2 Allgemeine Gasgleichung

Jeder Stoff besteht aus Atomen oder Molekülen. Die Menge eines Stoffs wird definitionsgemäß in Mol angegeben. Ein Mol eines Stoffs enthält  $6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen (Avogadro-Konstante. Dies ist keine Zahl, sondern eine physikalische Größe mit der Einheit  $\text{mol}^{-1}$ ). 1 Mol ist dabei definiert als die Stoffmenge eines Systems, das aus genau so vielen Teilchen besteht, wie Atome in exakt 12 g Kohlenstoff des Nuklids  $^{12}\text{C}$  enthalten sind.

Bei Normalbedingungen, also einem Druck von 101.325 Pa und einer Temperatur von 273,15 K (entspricht  $0^\circ\text{C}$ ), füllt ein Mol eines idealen Gases ein Volumen von 22,414 Litern aus.

Bereits 1664 untersuchte Robert Boyle den Einfluss des Drucks auf eine bestimmte Menge an Luft. Die später von Mariotte experimentell bestätigten Ergebnisse sind im Boyle-Mariotte'schen Gesetz zusammengefasst:

$$p \cdot V = \text{const.}$$

**Formel 1-4:** Boyle-Mariotte'sches Gesetz [4]

In Worten ausgedrückt bedeutet das Boyle-Mariotte'sche Gesetz, dass das Volumen einer bestimmten Gasmenge bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional dem Druck ist – das Produkt aus Druck und Volumen ist konstant.

Mehr als hundert Jahre später wurde auch die Temperaturabhängigkeit des Volumens einer Gasmenge erkannt: das Volumen einer bestimmten Gasmenge ist bei konstantem Druck der absoluten Temperatur direkt proportional oder

$$V = \text{const.} \cdot T$$

**Formel 1-5:** Gay-Lussac'sches Gesetz

Führt man bei einer gegebenen Gasmenge nun nacheinander eine Druck- und eine Temperaturänderung durch, erhält man

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

Dies gilt immer noch für eine bestimmte Menge an Gas. Das Gasvolumen ist bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck proportional der Stoffmenge  $v$ . Daher können wir schreiben:

$$\frac{p \cdot V}{T} = v \cdot \text{const.}$$

Die Stoffmenge wird durch Wägung bestimmt. Wir können die Stoffmenge eines Gases durch das Verhältnis der Masse durch die molare Masse ausdrücken. Die Konstante *const.* bezieht sich damit auf 1 Mol des betreffenden Gases, sie wird als Gaskonstante  $R$  bezeichnet. Damit lässt sich der Zustand eines idealen Gases in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Volumen wie folgt beschreiben:

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

**Formel 1-6:** Allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase [5]

$p$	Druck	[Pa]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$m$	Masse	[kg]
$M$	Molare Masse	[kg kmol <sup>-1</sup> ]
$R$	Allgemeine Gaskonstante	[kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$T$	Absolute Temperatur	[K]

Die Stoffmenge  $v$  kann auch als Anzahl der Teilchen im Verhältnis zur Avogadro-Konstante angegeben werden.

$$p \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T \quad \text{mit } k = \frac{R}{N_A}$$

**Formel 1-7:** Zustandsgleichung für ideale Gase I

$N$	Teilchenanzahl
$N_A$	Avogadro-Konstante = $6,022 \cdot 10^{23}$ [mol <sup>-1</sup> ]
$k$	Boltzmannkonstante = $1,381 \cdot 10^{-23}$ [J K <sup>-1</sup> ]

Dividiert man jetzt beide Seiten der Gleichung durch das Volumen, erhält man

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

**Formel 1-8:** Zustandsgleichung für ideale Gase II

$n$	Teilchenzahldichte	[m <sup>-3</sup> ]
-----	--------------------	--------------------

### 1.2.3 Teilchenzahldichte

Aus Formel 1-7 und Formel 1-8 wird ersichtlich, dass der Druck proportional zur Teilchenzahldichte ist. Wegen der großen Zahl der Teilchen pro Volumeneinheit bei Normalbedingungen folgt, dass auch beispielsweise bei einem Druck von  $10^{-12}$  hPa noch 26.500 Moleküle pro  $\text{cm}^3$  vorhanden sind. Deshalb kann man selbst im Ultrahochvakuum noch nicht von einem leeren Raum sprechen.

Im Weltraum wird es bei extrem niedrigen Drücken immer weniger griffig, vom Druck in der Einheit Pascal zu sprechen, z. B. kleiner als  $10^{-18}$  hPa. Diese Druckbereiche werden besser durch die Teilchenzahldichte beschrieben, z. B.  $< 10^4$  Teilchen pro Kubikmeter im interplanetaren Raum.

### 1.2.4 Thermische Teilchengeschwindigkeit

In einem Behälter eingeschlossene Gasmoleküle stoßen völlig regellos miteinander. Dabei kommt es zur Übertragung von Energie und Impuls. Diese Übertragung führt zum Auftreten einer Verteilung von Geschwindigkeit bzw. kinetischer Energie. Die Geschwindigkeitsverteilung entspricht einer Glockenkurve (Maxwell-Boltzmann-Häufigkeitsverteilungsfunktion) mit einem Maximum bei der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit,

$$c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{M}} \quad \text{oder} \quad c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m}}$$

**Formel 1-9:** Wahrscheinlichste Geschwindigkeit [6]

Die mittlere thermische Geschwindigkeit ist

$$c_w = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad \text{oder} \quad \bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}}$$

**Formel 1-10:** Mittlere Geschwindigkeit [7]

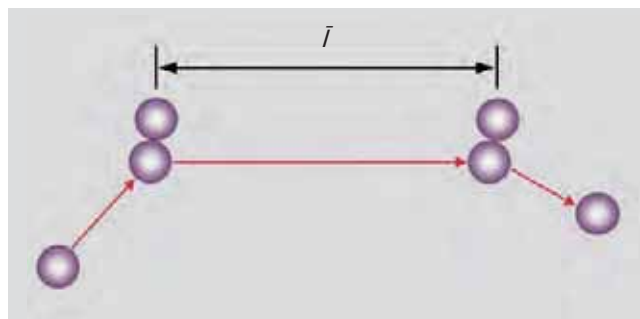
Die folgende Tabelle zeigt die mittlere thermische Geschwindigkeit für ausgewählte Gase bei einer Temperatur von 20°C.

Gas	Chemisches Symbol	Molare Masse [g mol <sup>-1</sup> ]	Mittlere Geschwindigkeit [m s <sup>-1</sup> ]	Machzahl
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	2	1.754	5,3
Helium	He	4	1.245	3,7
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	18	585	1,8
Stickstoff	N <sub>2</sub>	28	470	1,4
Luft		29	464	1,4
Argon	Ar	40	394	1,2
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	44	375	1,1

**Tabelle 1.4:** Molare Massen und mittlere thermische Geschwindigkeiten verschiedener Gase [8]

### 1.2.5 Mittlere freie Weglänge

Öffnet man einen Parfümflakon in einer Zimmerecke, so dauert es sehr lange, bis man die gasförmigen Geruchsstoffe in der gegenüberliegenden Zimmerecke wahrnehmen kann. Diese Erfahrung widerspricht scheinbar den im vorigen Kapitel eingeführten mittleren Geschwindigkeiten der Gase. Der Grund dafür liegt in einer Vielzahl von Zusammenstößen, die ein Gasteilchen auf seinem Weg erleidet. Die durchschnittliche geradlinige Wegstrecke, die ein Gasteilchen ohne Zusammenstoß mit anderen Gasteilchen zurücklegen kann, wird mittlere freie Weglänge genannt.



**Abbildung 1.4:** Mittlere freie Weglänge zwischen zwei Stößen

Für Zusammenstöße gleicher Teilchen gilt für die mittlere freie Weglänge:

$$\bar{\lambda} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot d_m^2}$$

**Formel 1-11:** Mittlere freie Weglänge [9]

$\bar{\lambda}$  mittlere freie Weglänge [m]  
 $d_m$  Moleküldurchmesser [m]  
 $m$  Masse [kg]

Aus Formel 1-11 erkennt man, dass die mittlere freie Weglänge linear von der Temperatur und umgekehrt proportional von Druck und Moleküldurchmesser abhängt. An dieser Stelle vernachlässigen wir in der Literatur diskutierte weitere Varianten dieser Gleichung, in denen z. B. auf Stöße unterschiedlicher Gasteilchen, Stöße von Gasteilchen mit Ionen oder Elektronen sowie Temperatureffekte eingegangen wird.

Um die Temperaturabhängigkeit der mittleren freien Weglänge zu zeigen, wird Formel 1-11 oft auch mit der Temperatur als einziger Variablen auf der rechten Seite der Gleichung geschrieben:

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

**Formel 1-12:** Mittlere freie Weglänge II

Tabelle 1.5 zeigt die  $\bar{l} \cdot p$ -Werte für einige ausgewählte Gase bei 0°C, deren Moleküldurchmesser variiert:

Gas	Chemisches Symbol	$\bar{l} \cdot p$ [m hPa]	$\bar{l} \cdot p$ [m Pa]
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	$11,5 \cdot 10^{-5}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$
Stickstoff	N <sub>2</sub>	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Helium	He	$17,5 \cdot 10^{-5}$	$17,5 \cdot 10^{-3}$
Neon	Ne	$12,7 \cdot 10^{-5}$	$12,7 \cdot 10^{-3}$
Argon	Ar	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Luft		$6,7 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
Krypton	Kr	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Xenon	Xe	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Quecksilber	Hg	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$
Kohlenmonoxid	CO	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Chlorwasserstoff	HCl	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Chlor	Cl <sub>2</sub>	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 1.5:** Mittlere freie Weglänge ausgewählter Gase bei 273,15K [10]

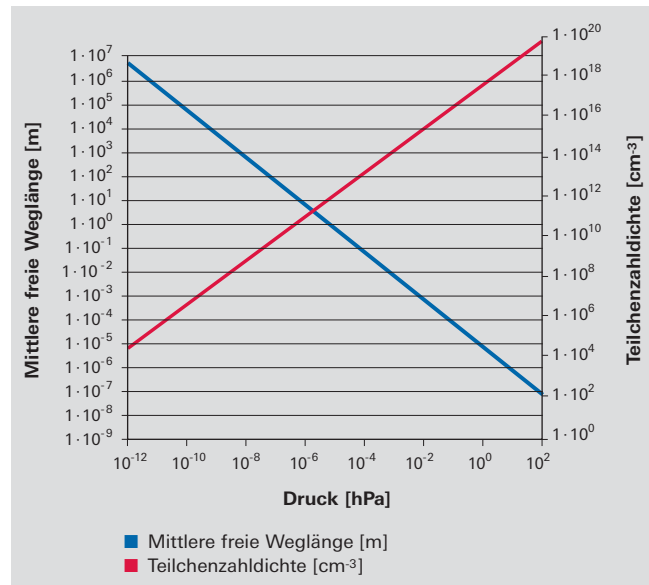
Mit den Werten aus Tabelle 1.5 schätzen wir nun die mittlere freie Weglänge eines Stickstoffmoleküls bei verschiedenen Drücken ab:

Druck [Pa]	Druck [hPa]	mittlere freie Weglänge [m]
$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^{-8}$
$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^2$	$5,9 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^1$	$5,9 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^0$	$5,9 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^{-1}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-1}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^0$
$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^1$
$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^2$
$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^4$
$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^5$
$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^6$
$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5,9 \cdot 10^7$

**Tabelle 1.6:** Mittlere freie Weglänge eines Stickstoffmoleküls bei 273,15 K (0°C)

Bei Atmosphärendruck fliegt ein Stickstoffmolekül zwischen zwei Zusammenstößen also nur rund 59 nm weit, während es im Ultrahochvakuum bei Drücken unterhalb von  $10^{-8}$  hPa bereits mehrere Kilometer weit fliegt.

Der Zusammenhang zwischen Teilchenzahldichte und mittlerer freier Weglänge ist in Abbildung 1.5 grafisch gezeigt.



**Abbildung 1.5:** Teilchenzahldichte (rot, rechte y-Achse) und mittlere freie Weglänge (blau, linke y-Achse) für Stickstoff bei einer Temperatur von 273,15 K

### 1.2.6 Strömungsarten

Das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge und dem Durchmesser des Strömungskanals kann zur Beschreibung von Strömungsarten dienen. Dieses Verhältnis wird als Knudsenzahl bezeichnet:

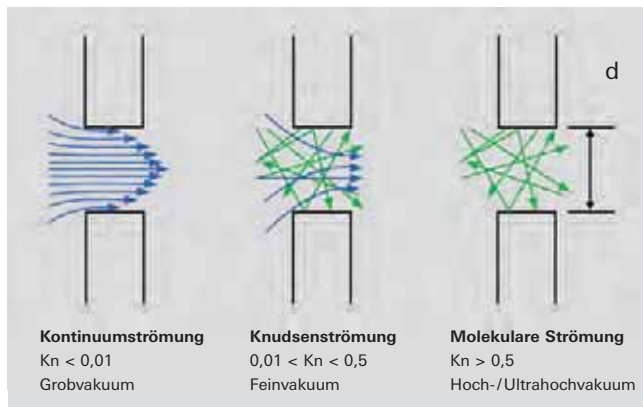
$$K_n = \frac{\bar{l}}{d}$$

**Formel 1-13:** Knudsenzahl

$\bar{l}$	Mittlere freie Weglänge	[m]
$d$	Weite des Strömungskanals	[m]
$K_n$	Knudsenzahl	dimensionslos

Der Wert der Knudsenzahl kennzeichnet die Art der Gasströmung und ordnet sie einem bestimmten Druckbereich zu. Tabelle 1.7 zeigt eine Übersicht über die unterschiedlichen Strömungsarten in der Vakuumtechnik und ihre wichtigsten Charakterisierungsparameter.

Profile der unterschiedlichen Strömungsarten sind in Abbildung 1.6 gezeigt.



**Abbildung 1.6:** Profile der unterschiedlichen Strömungsarten

### Viskose Strömung im Grobvakuum

In einer viskosen Strömung, auch als Kontinuumströmung bekannt, kommt es zu häufigen Zusammenstößen der Gasteilchen untereinander, jedoch seltener mit den Gefäßwänden. Die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen ist hier deutlich kleiner als die Abmessungen des Strömungskanals.

Bei der viskosen Strömung unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Bei der laminaren oder Schichtströmung bleiben die Gasteilchen immer in gleichen parallel zueinander transportierten Schichten. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit, so lösen sich diese Schichten auf und die Fluidteilchen laufen völlig ungeordnet durcheinander. Man spricht dann von turbulenter Strömung. Die Grenze zwischen diesen beiden Teilbereichen der viskosen Strömung kann durch den Wert der Reynolds-Zahl beschrieben werden:

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

**Formel 1-14:** Knudsenzahl

$Re$	Reynoldszahl	dimensionslos
$\rho$	Dichte des Fluids	[kg m <sup>-3</sup> ]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit	[m s <sup>-1</sup> ]
$l$	Charakteristische Länge	[m]
$\eta$	Dynamische Viskosität	[Pa s]

Bis zu Werten von  $Re < 2.300$  ist die Strömung laminar und für  $Re > 4.000$  turbulent. Im Bereich zwischen  $2.300 < Re < 4.000$  ist die Strömung vorherrschend turbulent. Es ist aber auch laminare Strömung möglich, beide Strömungsarten sind in diesem Bereich instabil.

Turbulente Strömung kommt im Vakuum nur beim Abpumpen von Atmosphärendruck oder schnellem Belüften vor. Man dimensioniert die Leitungen von Vakuumanlagen so, dass turbulente Strömung bei relativ hohen Drücken nur kurzzeitig auftritt, da die dabei auftretenden hohen Strömungswiderstände höhere Saugvermögen der eingesetzten Pumpen verlangen.

### Knudsenströmung im Feinvakuum

Liegt die Knudsenzahl zwischen 0,01 und 0,5, spricht man von Knudsenströmung. Da viele Prozessdrücke im Feinvakuumbereich liegen, ist diese Strömungsart in technischen Vakuumanwendungen entsprechend häufig vertreten.

	Viskose Strömung	Knudsen-Strömung	Molekular-Strömung
	Grobvakuum	Feinvakuum	Hoch-/Ultrahochvakuum
Druckbereich [hPa]	$10^3 \dots 1$	$1 \dots 10^{-3}$	$< 10^{-3}$ bzw. $< 10^{-7}$
Druckbereich [Pa]	$10^5 \dots 10^2$	$10^2 \dots 10^{-1}$	$< 10^{-1}$ bzw. $< 10^{-5}$
Knudsenzahl	$Kn < 0,01$	$0,01 < Kn < 0,5$	$Kn > 0,5$
Reynoldszahl	$Re < 2.300$ : laminar $Re > 4.000$ : turbulent		
$p \cdot d$ [hPa cm]	$p \cdot d > 0,6$	$0,6 > p \cdot d > 0,01$	$p \cdot d < 0,01$

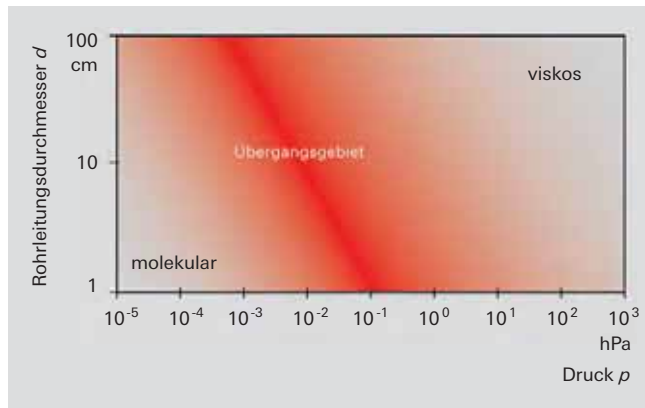
**Tabelle 1.7:** Übersicht Strömungsarten



## Molekulare Strömung im Hochvakuum und im Ultrahochvakuum

Bei Knudsenzahlen größer als 0,5 findet eine Wechselwirkung der Teilchen untereinander praktisch nicht mehr statt. Es herrscht Molekularströmung. Die mittlere freie Weglänge ist deutlich größer als die Weite des Strömungskanals. In der Molekularströmung liegt das Produkt aus Druck und Bauteildurchmesser bei  $\leq 1,3 \cdot 10^{-2}$  hPa cm.

Eine grafische Zusammenfassung der Strömungsbereiche in Abhängigkeit vom Produkt aus Druck und Bauteildurchmesser ist in Abbildung 1.7 gezeigt.



**Abbildung 1.7:** Strömungsbereiche im Vakuum in Abhängigkeit von  $p \cdot d$

Aus dieser Abbildung wird klar, dass die auch in Tabelle 1.7 wiedergegebenen Einteilungen der Vakuumbereiche rein nach dem Druck eine unzulässige Vereinfachung darstellen. Nachdem diese Einteilung im Sprachgebrauch aber noch weit verbreitet ist, wird sie an dieser Stelle zitiert.

## 1.2.7 pV-Durchfluss

Dividiert man die allgemeine Gasgleichung (Formel 1-6) durch die Zeit  $t$ , so erhält man den Gasstrom

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

**Formel 1-15:** pV-Durchfluss

$$q_{pV} \text{ pV-Durchfluss} \quad [\text{Pa m}^3 \text{ s}^{-1}]$$

Man sieht aus der rechten Seite der Gleichung, dass bei gleicher Temperatur  $T$  ein konstanter Massenstrom gefördert wird. Dieser Gasstrom wird auch pV-Durchfluss oder Gasdurchsatz genannt. Bezogen auf eine Vakuumpumpe wird der geförderte Strom als Saugleistung bezeichnet.

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

**Formel 1-16:** Saugleistung einer Vakuumpumpe

Dividiert man die Saugleistung durch den Eingangsdruck, so erhält man einen Volumenstrom, das Saugvermögen einer Vakuumpumpe:

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

**Formel 1-17:** Saugvermögen einer Vakuumpumpe

In Tabelle 1.8 ist eine Umrechnungstafel für verschiedene Einheiten der Saugleistung angegeben.



Weitere Einheiten und ihre Umrechnung finden Sie in unserer eVacuum-App.

	Pa m <sup>3</sup> /s = W	mbar l/s	Torr l/s	atm cm <sup>3</sup> /s	lusec	sccm	slm	Mol/s
Pa m <sup>3</sup> /s	1	10	7,5	9,87	7,5 · 10 <sup>3</sup>	592	0,592	4,41 · 10 <sup>-4</sup>
mbar l/s	0,1	1	0,75	0,987	750	59,2	5,92 · 10 <sup>-2</sup>	4,41 · 10 <sup>-5</sup>
Torr l/s	0,133	1,33	1	1,32	1.000	78,9	7,89 · 10 <sup>-2</sup>	5,85 · 10 <sup>-5</sup>
atm cm <sup>3</sup> /s	0,101	1,01	0,76	1	760	59,8	5,98 · 10 <sup>-2</sup>	4,45 · 10 <sup>-5</sup>
lusec	1,33 · 10 <sup>-4</sup>	1,33 · 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	1,32 · 10 <sup>-3</sup>	1	7,89 · 10 <sup>-2</sup>	7,89 · 10 <sup>-5</sup>	5,86 · 10 <sup>-8</sup>
sccm	1,69 · 10 <sup>-3</sup>	1,69 · 10 <sup>-2</sup>	1,27 · 10 <sup>-2</sup>	1,67 · 10 <sup>-2</sup>	12,7	1	10 <sup>-3</sup>	7,45 · 10 <sup>-7</sup>
slm	1,69	16,9	12,7	16,7	1,27 · 10 <sup>4</sup>	1.000	1	7,45 · 10 <sup>-4</sup>
Mol/s	2,27 · 10 <sup>3</sup>	2,27 · 10 <sup>4</sup>	1,7 · 10 <sup>4</sup>	2,24 · 10 <sup>4</sup>	1,7 · 10 <sup>7</sup>	1,34 · 10 <sup>6</sup>	1,34 · 10 <sup>3</sup>	1

**Tabelle 1.8:** Umrechnungstabelle Saugleistung

### 1.2.8 Leitwert

Vakuumkammern sind im Allgemeinen über Rohrleitungen mit einer Vakuumpumpe verbunden. Infolge von äußerer Reibung zwischen Gasteilchen und Wandfläche und innerer Reibung der Gasteilchen untereinander (Viskosität) kommt es zu Strömungswiderständen, die sich in Druckunterschieden und Saugvermögensverlusten äußern. In der Vakuumentchnik benutzt man üblicherweise an Stelle des Strömungswiderstands  $W$  dessen Kehrwert, den Leitwert  $L$  oder  $C$  (Conductance). Der Leitwert hat die Dimension eines Saugvermögens und wird meist in  $[l\ s^{-1}]$  oder  $[m^3\ h^{-1}]$  angegeben.

Strömt Gas durch eine Leitung, so stellt sich eine Druckdifferenz  $\Delta p$  an den Leitungsenden ein. Es gilt:

$$C = \frac{I}{W} = \frac{q_{pV}}{\Delta p}$$

**Formel 1-18:** Definition Leitwert

Diese Gesetzmäßigkeit ist formal analog zum Ohm'schen Gesetz der Elektrotechnik:

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

**Formel 1-19:** Ohm'sches Gesetz

Beim formalen Vergleich von Formel 1-18 mit Formel 1-19 entspricht  $q_{pV}$  dem Strom  $I$ ,  $C$  dem Kehrwert des Widerstandes  $1/R$  und  $\Delta p$  der Spannung  $U$ . Bei der Parallelschaltung von Bauteilen addieren sich die Einzelleitwerte:

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

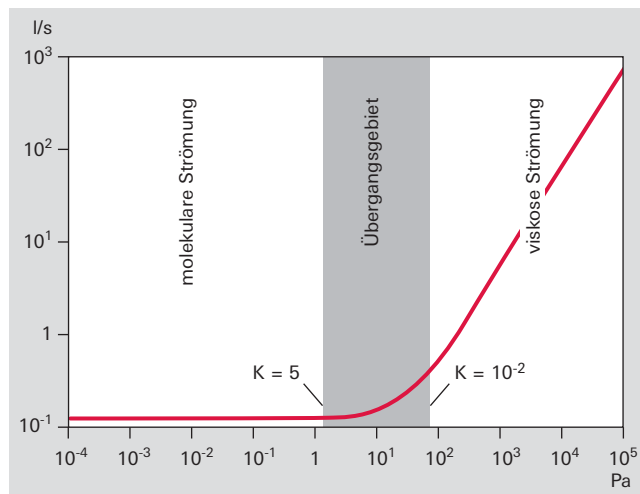
**Formel 1-20** Parallelschaltung Leitwerte

und bei Reihenschaltung addieren sich die Widerstände, also die Kehrwerte der Leitwerte:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

**Formel 1-21:** Reihenschaltung Leitwerte

Die Leitwerte von Rohren und Rohrbögen sind in den verschiedenen Strömungsbereichen unterschiedlich. Sie sind bei der viskosen Strömung 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.



**Abbildung 1.8:** Leitwert eines runden glatten Rohrs in Abhängigkeit vom mittleren Druck in der Rohrleitung

Eine einfache Näherung für den Knudsenbereich erhält man durch Addition der laminaren und molekularen Leitwerte. Für exakte Berechnungen des Leitwertes im Bereich noch laminarer und schon molekularer Strömung sowie Leitwertberechnungen unter Berücksichtigung von Inhomogenitäten am Einlauf eines Rohres wird auf die weiterführende Literatur verwiesen.

Im Rahmen dieses Buchs beschränken wir uns auf die Betrachtung der Leitwerte von Blenden und runden, langen Rohren für den laminaren und molekularen Strömungsbereich.

Blenden sind häufige Strömungswiderstände in Vakuumanlagen. Beispiele sind Querschnittsverengungen in Ventilen, Belüftungseinrichtungen oder Blenden in Messdomen für die Saugvermögensmessung. Bei Rohröffnungen an Behälterwänden muss zusätzlich zum Rohrwiderstand auch der Blendenwiderstand der Eintrittsöffnung berücksichtigt werden.

#### Verblockte Strömung

Betrachten wir die Belüftung eines Vakuumbehälters. Beim Öffnen des Flutventils strömt Luft aus der Umgebung mit dem Druck  $p$  unter hoher Geschwindigkeit in den Behälter ein. Die Strömungsgeschwindigkeit erreicht maximal Schallgeschwindigkeit. Hat das Gas Schallgeschwindigkeit erreicht, ist auch der maximale Gasdurchsatz erreicht, mit dem der Behälter belüftet werden kann. Die durchströmende Menge  $q_{pV}$  ist unabhängig vom Behälterinnendruck  $p_i$ . Es gilt für Luft:

$$q_{pV} = 15,7 \cdot d^2 \cdot p_a$$

**Formel 1-22:** Verblockung einer Blende [11]

$d$  Durchmesser der Blende [cm]  
 $p_a$  Aussendruck am Behälter [hPa]



**Gasdynamische Strömung**

Steigt nun der Druck im Behälter über einen kritischen Innendruck an, so reduziert sich der Gasstrom und kann mit gasdynamischen Gesetzen nach Bernoulli und Poiseuille berechnet werden. Der durchtretende Gasstrom  $q_{pV}$  und der Leitwert sind abhängig von

- Engstem Querschnitt der Blende
- Außendruck am Behälter
- Innendruck im Behälter
- Allgemeiner Gaskonstante
- Absoluter Temperatur
- Molarer Masse
- Adiabaten-Exponent (= Verhältnis der spezifischen bzw. molaren Wärmekapazitäten bei konstantem Druck  $c_p$  bzw. konstantem Volumen  $c_v$ ) [12]

**Molekularströmung** [13]

Verbindet eine Blende zwei Behälter, in denen molekulare Strömungsbedingungen vorliegen (ist also die mittlere freie Weglänge wesentlich größer als der Durchmesser des Behälters), so gilt für die pro Zeiteinheit durchströmende Gasmenge  $q_{pV}$

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

**Formel 1-23:** Blendendurchfluss

- $A$  Querschnitt der Blende [cm<sup>2</sup>]  
 $\bar{c}$  Mittlere thermische Geschwindigkeit [m s<sup>-1</sup>]

Entsprechend zu Formel 1-23 gilt für den Blendenleitwert

$$C_{Bl, mol} = A \cdot \frac{\bar{c}}{4} = A \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}}$$

**Formel 1-24:** Blendenleitwert

Für Luft mit einer Temperatur von 293 K ergibt sich

$$C_{Bl, mol} = 11,6 \cdot A$$

**Formel 1-25:** Blendenleitwert für Luft

- $A$  Querschnitt der Blende [cm<sup>2</sup>]  
 $C$  Leitwert [l s<sup>-1</sup>]

Mit Hilfe dieser Formel kann man das maximal mögliche Saugvermögen einer Vakuumpumpe mit Ansaugöffnung  $A$  bestimmen. Das maximale Saugvermögen einer Pumpe unter molekularen Strömungsbedingungen ist also durch die Ansaugöffnung bestimmt.

Betrachten wir nun Leitwerte von Rohren. Bei laminarer Strömung in einem langen Rohr mit rundem Querschnitt ist der Leitwert des Rohres dem mittleren Druck proportional:

$$C_{Rohr, lam} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

**Formel 1-26:** Leitwert Rohr laminar

Für Luft bei 20°C ergibt sich

$$C_{Rohr, lam} = 1,35 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p}$$

**Formel 1-27:** Leitwert Rohr laminar für Luft

- $l$  Länge des Rohrs [cm]  
 $d$  Durchmesser des Rohrs [cm]  
 $\bar{p}$  Druck [Pa]  
 $C$  Leitwert [l s<sup>-1</sup>]

Im molekularen Strömungsbereich ist der Leitwert konstant und hängt nicht vom Druck ab. Er kann betrachtet werden als Produkt des Blendenleitwertes der Rohröffnung  $L_{Rohr, mol}$  mit der Durchtrittswahrscheinlichkeit  $P_{Rohr, mol}$  durch ein Bauelement:

$$L_{Rohr, mol} = L_{Blende, mol} \cdot P_{Rohr, mol}$$

**Formel 1-28:** Rohr molekular

Die Durchtrittswahrscheinlichkeit  $P_{Rohr, mol}$  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:

$$P_{Rohr, mol} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{l}$$

**Formel 1-29:** Durchtrittswahrscheinlichkeit für lange runde Rohre

Multiplizieren wir diesen Wert mit dem Blendenleitwert (Formel 1-24), so erhalten wir

$$C_{Rohr, mol} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l}$$

**Formel 1-30:** Leitwert Rohr molekular

Für Luft bei 20°C ergibt sich

$$C_{Rohr, mol} = 12,1 \cdot \frac{d^3}{l}$$

**Formel 1-31:** Leitwert Rohr molekular

- $l$  Länge des Rohrs [cm]  
 $d$  Durchmesser des Rohrs [cm]  
 $C$  Leitwert [l s<sup>-1</sup>]

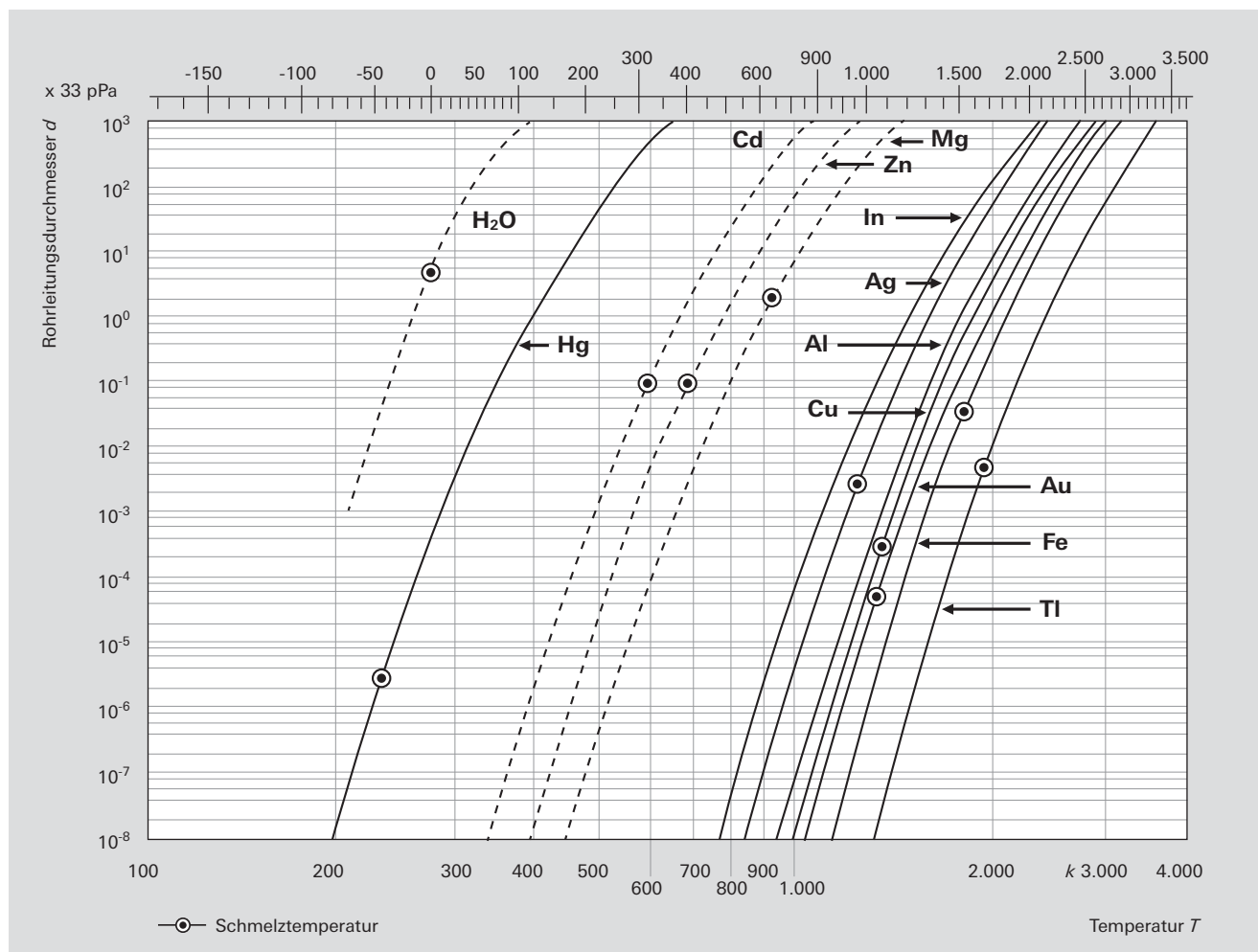


Abbildung 1.9: Dampfdruckkurven verschiedener Stoffe [14]

## 1.3 Einflüsse in realen Vakuumsystemen

### 1.3.1 Verunreinigungen

Vakuumbehälter müssen sauber sein, um beim Abpumpen schnellstmöglich den gewünschten Druck zu erreichen. Typische Verunreinigungen von Vakuumsystemen sind

- Rückstände von der Produktion der Vakuumsysteme  
Öle und Fette an Oberflächen, Schrauben und Dichtungen
- Anwendungsbedingte Verunreinigungen  
Reaktionsprodukte von Prozessen, Stäube und Partikel
- Umgebungsbedingte Verunreinigungen  
kondensierte Dämpfe, insbesondere Wasser, die sich an den Behälterwänden niederschlagen

Zur Vermeidung von Verunreinigungen ist bei der Montage von Vakuumanlagen auf bestmögliche Sauberkeit zu achten. Alle im Vakuumraum angebrachten Bauteile müssen sauber und fettfrei sein. Der Einbau von Dichtungen sollte trocken erfolgen. Ist der Einsatz von Vakuumfett nicht zu vermeiden, ist dieses allenfalls äußerst sparsam als Montagehilfe, nicht aber als Dichtmittel zu verwenden. Bei Arbeiten an Hoch- oder Ultrahochvaku-

umanlagen sind bei Montage- oder Wartungsarbeiten saubere fussel- und puderfreie 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 m<sup>3</sup> 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 (Cadmium, Zink, Magnesium) können bei hohen Temperaturen von mehreren hundert °C in merklichen Mengen verdampfen. Man vermeidet deshalb ihre Verwendung beim Anlagenbau.

### 1.3.3 Desorption, Diffusion, Permeation und Lecks

Außer Wasser können auch noch andere Stoffe wie Betriebsmittel der Vakuumpumpen 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 abgegeben werden. Die Desorptionsrate der Metall- und Glasoberflächen in einer Vakuumanlage führt zu einem Gasanfall, der mit der Zeit mit niedriger werdender Bedeckungsrate abnimmt. 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 Desorptionsstrom lässt sich damit beschreiben als

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

Formel 1-32: Desorptionsstrom

$Q_{des}$	Desorptionsstrom	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$q_{des}$	Desorptionsstromdichte (flächenspezifisch)	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit	[s]

#### Diffusion mit Desorption

Bei Betrieb unterhalb 10<sup>-6</sup> hPa 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:

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

Formel 1-33: Desorptionsstrom aus Kunststoffen

$Q_{diff}$	Diffusionsstrom	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$q_{diff}$	Diffusionsstromdichte (flächenspezifisch)	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
$A_d$	Oberfläche der Kunststoffe im Behälter	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit	[s]

Ähnliche Effekte treten bei noch tieferen Drücken auch bei Metallen auf, aus denen Wasserstoff und Kohlenstoff in Form von CO und CO<sub>2</sub> austreten und im Restgasspektrum zu sehen sind. Hierfür gilt ebenfalls Formel 1-33.

#### Permeation und Lecks

Dichtungen und sogar Metallwände können von kleinen Gasatomen und -molekülen 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 zum Druckgradienten über die Wandstärke und einer materialabhängigen Permeationskonstanten.

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

Formel 1-34: Permeation

$Q_{perm}$	Diffusionsstrom	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$p_a$	Druck ausserhalb des Behälters	[Pa]
$d$	Wanddicke	[m]
$A$	Oberfläche des Behälters	[m <sup>2</sup> ]
$k_{perm}$	Permeationskonstante	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]

Permeation wird erst bei Drücken unter 10<sup>-8</sup> hPa merkbar.

Mit  $Q_L$  bezeichnet man die Leckrate, also einen Gasstrom, der durch Undichtigkeiten in das Vakuumsystem einströmt. Die Leckrate ist definiert als Druckanstieg pro Zeit in einem gegebenen Volumen:

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

Formel 1-35: Leckrate

$Q_L$	Leckrate	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\Delta p$	Druckänderung während der Messzeit	[Pa]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta t$	Messzeit	[s]

Wird der Behälter dauernd mit dem Saugvermögen  $S$  ausgepumpt, so stellt sich ein Gleichgewichtsdruck  $p_{eq}$  ein, wenn die Saugleistung (Formel 1-16) gleich der Leckrate ist  $Q_L = S \cdot p_{eq}$ .

Eine Anlage gilt als hinreichend dicht, wenn der Gleichgewichtsdruck  $p_{eq}$  etwa 10% des Arbeitsdrucks beträgt. Soll beispielsweise ein Arbeitsdruck von 10<sup>-6</sup> hPa erreicht werden und hat die verwendete Vakuumpumpe ein Saugvermögen von 100 l s<sup>-1</sup>, sollte die Leckagerate nicht mehr als 10<sup>-6</sup> Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> betragen.

Leckageraten  $Q_L < 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 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. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Enddruck gegen den Basisdruck der Vakuumpumpe groß ist.

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

**Formel 1-36:** Enddruck als Funktion der Zeit

Für eine bestimmte Pumpzeit  $t$  kann man die einzelnen Gasströme und daraus resultierenden Drücke durch Einsetzen in Formel 1-36 und Auflösen der Gleichungen nach der Zeit berechnen. Der erreichbare Enddruck ist die Summe dieser Drücke.

### 1.3.4 Ausheizen

Zum Erreichen von Drücken im Ultrahochvakuumbereich ( $<10^{-8}$  hPa) müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Der Basisdruck der Vakuumpumpe sollte um einen Faktor 10 niedriger liegen als der geforderte Enddruck.
- Die Werkstoffe von Kammer und Bauelementen sollten auf minimale Gasabgabe optimiert sein und über eine entsprechende Oberflächengüte verfügen.
- Es sollten Metaldichtungen (z. B. CF-Flanschverbindungen oder Helicoflex-Dichtungen für ISO-Flanschstandards) verwendet werden.
- Vor dem Zusammenbau sind alle Teile gründlich zu reinigen und mit fettfreien Handschuhen zu montieren – bestmögliche Sauberkeit beim Arbeiten ist Grundvoraussetzung für Ultrahochvakuum.
- Apparatur und Hochvakuumpumpe müssen ausgeheizt werden
- Lecks müssen vermieden und vor Einschalten der Heizung beseitigt werden. Dazu sollte ein Helium-Lecksucher oder ein Quadrupol-Massenspektrometer verwendet werden.

Durch Ausheizen werden die Desorptions- und Diffusionsraten stark erhöht, was zu wesentlich kürzeren Pumpzeiten führt. Als einer der letzten Schritte des Herstellungsprozesses können Kammern für UHV-Anwendungen bei Temperaturen bis zu 900 °C gegläht werden. Spätere Ausheizprozesse erreichen unter Zelten Temperaturen von teilweise über 300 °C. Während des laufenden Betriebs begrenzen die Vorschriften der Pumpenhersteller bezüglich der maximalen Ausheiztemperaturen am Flansch der Hochvakuumpumpe die maximale Temperatur auf meist 120 °C. Werden innerhalb der Vakuumapparatur Wärmequellen betrieben (z. B. Strahlungsheizung), sind die zulässigen Strahlungsleistungen in den Pumpenflansch zu beachten.

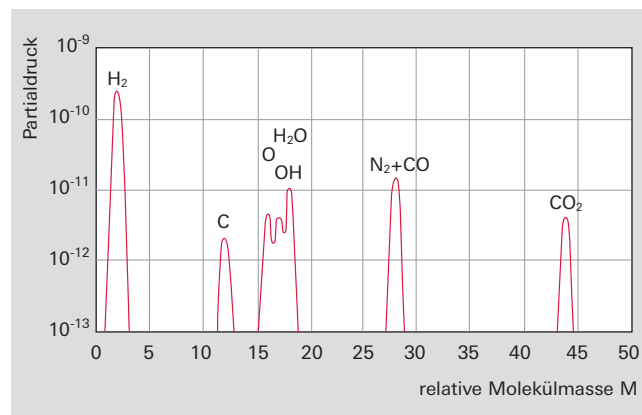
Nach der Montage wird die Apparatur in Betrieb genommen. Nach Erreichen eines Druckes kleiner als  $10^{-5}$  hPa wird die Heizung eingeschaltet. Während des Heizens sind alle Messröhren zu betreiben und in Zeiträumen von 10 Stunden zu entgasen. Um in den Druckbereich  $10^{-10}$  hPa vorzustoßen, sind bei Edelstahlbehältern mit entsprechenden Oberflächengüten 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 kleiner  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa und großen inneren Oberflächen ist die Verwendung einer gasbindenden Pumpe (Titansublimationspumpe) von Vorteil, die den aus Metallen austretenden Wasserstoff mit hohem Saugvermögen pumpt.

### 1.3.5 Restgaszusammensetzung

Für das Arbeiten im Ultrahochvakuum, vor dem Beginn von Vakuumprozessen oder zur Prozessüberwachung und -regelung kann es von Bedeutung sein, die Zusammensetzung des Restgases zu kennen. Bei nicht sauberen bzw. nicht gut ausgeheizten Vakuumkammern sind die Anteile von Wasser ( $m/e = 18$ ) und dessen Fragments OH ( $m/e = 17$ ) groß. Lecks erkennt man an den Signalintensitäten von Stickstoff ( $m/e = 28$ ) und Sauerstoff ( $m/e = 32$ ) im Verhältnis  $N_2/O_2$  von etwa 4 zu 1.

In gut ausgeheizten Kammern findet man Wasserstoff ( $m/e = 2$ ), Wasser ( $m/e = 17$  und  $18$ ), Kohlenmonoxid ( $m/e = 28$ ) und Kohlendioxid ( $m/e = 44$ ). Bei 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. Ein typisches Restgasspektrum eines sauberen, von einer Turbomolekularpumpe evakuierten Behälters zeigt



**Abbildung 1.11:** Typisches Restgasspektrum einer Turbomolekularpumpe

Weitere Details zum Arbeiten mit Massenspektrometern finden sich in Kapitel 6, Massenspektrometer und Restgasanalyse.

### 1.3.6 Fluten

Zur Vermeidung von unerwünschten Verunreinigungen sollten Vakuumbehälter mit einem trockenen Inertgas wie Stickstoff statt mit restfeuchter Umgebungsluft geflutet werden. Dadurch wird die Anlagerung (Adsorption) von Wasserdampf und anderen kondensierbaren Anteilen der Umgebungsluft (z. B. Lösungsmitteldämpfen) an den Behälterwänden verhindert. Jedes Kondensat würde durch den im Vergleich zum Abpumpen langsamen Desorptionsprozess das nachfolgende Evakuieren verlängern. Ist ein Behälter mit Inertgas belüftet worden, sollte er nur zu notwendigen Arbeiten im Behälterinne-

ren geöffnet werden. Bei langen Öffnungszeiten kommt es mittels Konvektion durch Bewegungen des Wartungspersonals oder durch Diffusion zum Eintrag von Wasserdampf aus der Umgebungsluft.

# 2 Auslegung

## 2.1 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 weiterführende Literatur [15, 16, 17, 18, 19] zur Dimensionierung nützlich sein.

### Einheiten

Jede technisch-physikalische Größe besteht aus ihrem Zahlenwert und einer Einheit. Weltweit hat man sich auf das SI-System (von französisch *Système international d'unités*) geeinigt. Als Grundgrößen wurden Länge (m), Masse (kg), Zeit (s), (thermodynamische) Temperatur (K), Substanzmenge (mol), Stromstärke (A) und Lichtstärke (cd) festgelegt. Internationale Regelungen über das SI-System trifft das Internationale Büro für Maß und Gewicht (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), für die nationale Umsetzung sind die metrologischen Staatsinstitute zuständig.

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. Das bedeutet, dass nach Einsetzen der Größen in SI-Einheiten auch die Ergebnisse in SI-Einheiten herauskommen. SI-Einheiten sind z. B.

1 Pa = 1 N m<sup>-2</sup> = 0,01 hPa für den Druck und

1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> = 3.600 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. 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-Ein-

heiten würde viele Fehler und Umrechnungsaufwand vermeiden. Leider setzt sich dieser Vorteil in der Welt nur sehr langsam durch.

## 2.2 Berechnungen

### 2.2.1 Dimensionierung eines Wälzkolbenpumpstands

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  $C_R$  sowie die Rückförderung von Gas aus dem Auslassraum mit dem Saugvermögen  $S_R$ :

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

Formel 2-1 Gaslast Wälzkolbenpumpe

- $S$  Saugvermögen
- $S_0$  Theoretisches Saugvermögen der Ansaugseite
- $S_R$  Saugvermögen der Rückförderung
- $C_R$  Leitwert
- $p_a$  Ansaugdruck
- $p_v$  Vorkuumdruck

Setzen wir  $S$  gleich 0, erhalten wir das Kompressionsverhältnis

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

Formel 2-2 Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe

$K_0$  Kompressionsverhältnis

Im laminaren Strömungsfall ist der Leitwert wesentlich größer als das Saugvermögen der Rückströmung. Damit vereinfacht sich Formel 2 zu

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

Formel 2-3 Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe laminar



Im molekularen Strömungsbereich ist das einlassseitige Saugvermögen immer noch am größten, jetzt ist aber das Saugvermögen der Rückströmung wesentlich größer als der Leitwert. Damit wird das Kompressionsverhältnis zu:

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

**Formel 2-4** Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe molekular

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  $p_a > 10^{-4}$  hPa begrenzt.

### Saugvermögen

Wälzkolbenpumpen sind mit Überstromventilen ausgerüstet, die maximale Druckdifferenzen  $\Delta p_d$  an den Pumpen zwischen 30 und 60 hPa zulassen. Kombiniert man eine Wälzkolbenpumpe mit einer Vorkumpumpe, muss man die Druckbereiche mit geöffnetem ( $S_1$ ) und geschlossenem Überstromventil ( $S_2$ ) unterscheiden.

Da der Gasdurchsatz in beiden Pumpen (Wälzkolbenpumpe und Vorkumpumpe) gleich ist, gilt:

$$S_1 = \frac{S_V \cdot p_v}{p_v \cdot \Delta p_d}$$

**Formel 2-5** Saugvermögen Wälzkolbenpumpe bei geöffnetem Überstromventil und hohem Vorkumpumdruck

$S_1$  Saugvermögen bei geöffnetem Überstromventil  
 $S_V$  Saugvermögen der Vorkumpumpe  
 $p_v$  Vorkumpumdruck  
 $L_R$  maximale Druckdifferenz zwischen Druck- und Saugseite der Roots-pumpe

Solange die Druckdifferenz deutlich kleiner als der Vorkumpumdruck ist, ist das Saugvermögen des Pumpstandes nur wenig größer als das der Vorkumpumpe. Nähert sich der Vorkumpumdruck der Druckdifferenz an, so schließt das Überstromventil und es gilt

$$S_1 = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_V}}$$

**Formel 2-6** Saugvermögen Wälzkolbenpumpe bei geöffnetem Überstromventil und hohem Vorkumpumdruck

Betrachten wir noch den Sonderfall, dass eine Wälzkolbenpumpe gegen konstanten Druck arbeitet (z. B. Kondensatorbetrieb). Im Bereich hoher Drücke gilt Formel 2-3. Einsetzen des Wertes  $C_R$  in Formel 1

und Vernachlässigung der Rückströmung  $S_R$  gegen den Leitwert  $C_R$  liefert:

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

**Formel 2-7** Saugvermögen Wälzkolbenpumpe bei hohem Ansaugdruck

Bei niedrigen Drücken setzt man  $S_R$  aus Formel 2-4 ein und erhält

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

**Formel 2-8** Saugvermögen Wälzkolbenpumpe bei niedrigem Ansaugdruck

Aus Formel 2-6 erkennt man, dass  $S$  gegen  $S_0$  geht, falls das Kompressionsverhältnis  $K_0$  wesentlich größer ist als das Verhältnis des theoretischen Saugvermögens der Wälzkolbenpumpe  $S_0$  und des Vorkumpumsaugvermögens  $S_V$ .

Setzen wir beispielsweise das Kompressionsverhältnis gleich 40 und das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe 10-mal so groß an wie das der Vorkumpumpe, so erhalten wir  $S = 0,816 \cdot S_0$

Für die Abstufung in einem Pumpstand sollte deshalb das theoretische Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe maximal zehnmal so groß wie das Saugvermögen der Vorkumpumpe gewählt werden.

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

Als Beispiel betrachten wir einen Pumpstand, der einen Behälter mit einem Volumen von 2 m<sup>3</sup> in 10 Minuten auf einen Druck von  $5 \cdot 10^{-3}$  hPa evakuieren soll. Dazu wählen wir eine Vorkumpumpe, die den Behälter in 5 Minuten auf 50 hPa evakuiert. Bei konstantem Saugvermögen gilt:

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

**Formel 2-9** Auspumpzeit

$t_1$  Abpumpzeit der Vorkumpumpe  
 $V$  Volumen des Behälters  
 $S$  Saugvermögen der Vorkumpumpe  
 $P_0$  Anfangsdruck  
 $P_1$  Enddruck

Stellen wir Formel 2-9 um, können wir das erforderliche Saugvermögen berechnen:

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

**Formel 2-10** Saugvermögensberechnung

Mit den oben angegebenen Zahlenwerten erhalten wir:

$$S = \frac{2.000 \text{ l}}{300 \text{ s}} \ln \frac{1.000}{50} = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Wir wählen als Vorpumpe eine Hepta 100 mit dem Saugvermögen  $S_v = 100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe schätzen wir nach der gleichen Formel auf  $61 \text{ l s}^{-1} = 220 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ab und nehmen eine Okta 500 mit  $S_0 = 490 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  und einer Druckdifferenz des Überströmventils von  $\Delta p_d = 53 \text{ hPa}$  für den Feinvakuumbereich.

In der folgenden Tabelle wählen wir die Vorvakuumdrücke laut Spalte  $p_{v_i}$  entnehmen die zugehörigen Saugvermögenswerte  $S_v$  für die Hepta 100 aus deren Saugvermögenskurve und berechnen den Durchsatz:  $Q = S_v \cdot p_v$

$$\text{Das Kompressionsverhältnis } K_{\Delta} = \frac{p_v + \Delta p_d}{p_v}$$

ist berechnet für geöffnetes Überstromventil bis zum Vorvakuumdruck von 56 hPa.  $K_0$  ist für Vorvakuumdrücke  $\leq 153 \text{ hPa}$  aus Abbildung 2.1 entnommen. Das Saugvermögen der Wälzkolbenpumpe berechnen wir auf zwei Arten:

$S_1$  erhält man aus Formel 2-5 für offenes, oder  $S_2$  nach Formel 2-6 für geschlossenes Überstromventil. Nähert

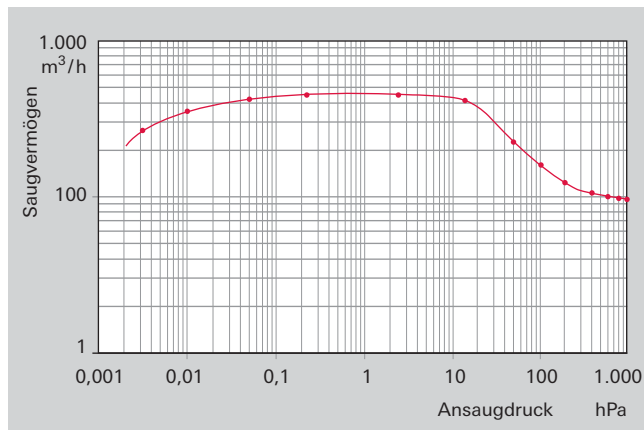


Abbildung 2.2: Saugvermögenskurve eines Wälzkolbenpumpstands mit Hepta 100 und Okta 500

sich der Vorvakuumdruck der Druckdifferenz  $\Delta p_d$ , 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 2.2 zeigt die Saugvermögenskurve dieses Pumpstandes.

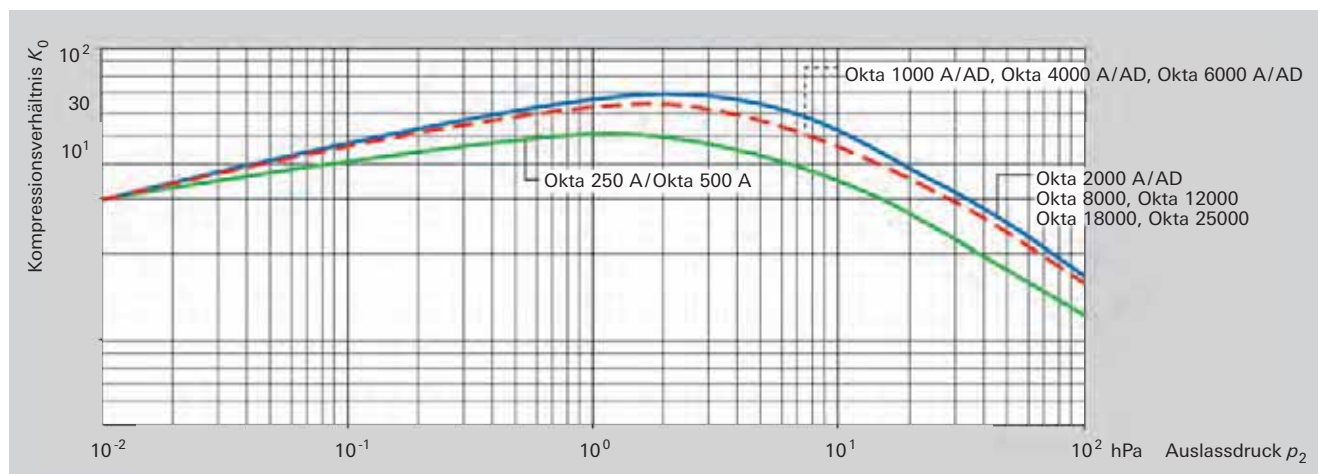


Abbildung 2.1: Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen

$P_a/\text{hPa}$	$P_v/\text{hPa}$	$S_v/(\text{m}^3/\text{h})$	$Q/(\text{hPa} \cdot \text{m}^3/\text{h})$	$K_{\Delta}$	$K_0$	$S_1/(\text{m}^3/\text{h})$	$S_2/(\text{m}^3/\text{h})$	$t/\text{h}$	$t/\text{s}$
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

Tabelle 2.1: Saugvermögen eines Wälzkolbenpumpstands und Auspumpzeit



## 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 2-9 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 von Tabelle 2.1.

Weitere Einflüsse auf die Auspumpzeit haben die Leckrate der Vakuumanlage, die Leitwerte der Rohrleitungen sowie im Rezipienten vorhandene verdampfende Flüssigkeiten, entgasende poröse Materialien und verschmutzte Wände. Einige dieser Faktoren werden in den Abschnitten 2.2.3.1 und 2.3 behandelt. Falls einige der oben genannten Einflüsse unbekannt sind, muss man entsprechende Reserven im Pumpstand vorsehen.

### 2.2.2 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.

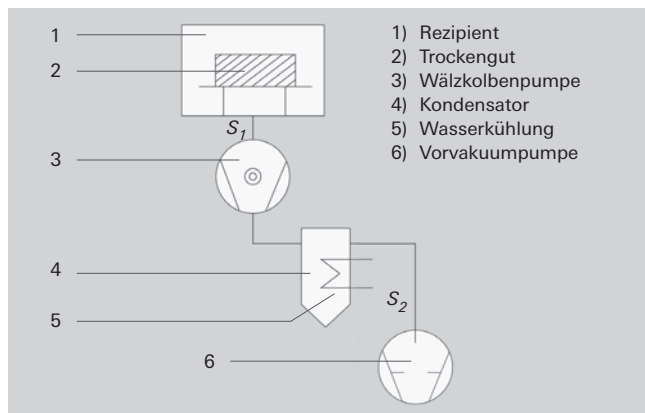


Abbildung 2.3: Trocknungsanlage (schematisch)

Außerdem werden noch 0,5 kg Luft pro Stunde abgegeben. Der Druck in der Kammer soll kleiner als 10 hPa sein. Man verwendet zur Trocknung einen Pumpstand nach Abbildung 2.3 und kann so durch Verwendung eines Kondensators auf wirtschaftliche Art und Weise den Dampf kondensieren.

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 hPa. Eine weitere Vakuumpumpe (5) fördert den Luftanteil und eine geringe Menge Wasserdampf und stößt das Gemisch gegen Atmosphärendruck aus. Zunächst berechnen wir den Gasstrom, der aus der Kammer austritt:  $Q = p_{Rez} \cdot S_1$

Mit dem idealen Gasgesetz nach Formel 1.15 erhalten wir

$$Q = p_{Rez} \cdot S_1 = \frac{R \cdot T}{t} \cdot \left( \frac{m_{Wasser}}{M_{Wasser}} + \frac{m_{Luft}}{M_{Luft}} \right)$$

Formel 2-11 Gasdurchsatz für das Abpumpen von Dämpfen

$T$	Sauggastemperatur	[K]
$R$	Allgemeine Gaskonstante	[kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$t$	Zeit	[s]
$p_{Rez}$	Druck im Rezipienten	[Pa]
$m_{Wasser}$	Masse des Wasserdampfs	[kg]
$M_{Wasser}$	Molare Masse des Wassers	[kg mol <sup>-1</sup> ]
$M_{Luft}$	Masse der Luft	[kg]
$M_{Luft}$	Molare Masse der Luft	[kg mol <sup>-1</sup> ]

Mit den folgenden Werten

$T$	Sauggastemperatur	300 K
$R$	Allgemeine Gaskonstante	8,314 kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$t$	Zeit	3600 s
$p_{Rez}$	Druck im Rezipienten	1000 Pa
$m_{Wasser}$	Masse des Wasserdampfs	10 kg
$M_{Wasser}$	Molare Masse des Wassers	0,018 kg mol <sup>-1</sup>
$M_{Luft}$	Masse der Luft	0,5 kg
$M_{Luft}$	Molare Masse der Luft	0,0288 kg mol <sup>-1</sup>

erhalten wir einen Gasdurchsatz für Luft von 12 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> und für Wasserdampf von 385 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, zusammen also 397 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Nach Division durch den Ansaugdruck von  $p_{Rez}$  von 1000 Pa erhalten wir ein Saugvermögen  $S_1$  von 0,397 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> oder 1429 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Beim Evakuieren des Kondensators soll der Luftpartialdruck maximal 30% betragen. Also maximal 12,85 hPa. Daraus folgt:

$$S_2 = \frac{Q_{Luft}}{0,3 \cdot p_{Luft}}$$

Mit dem Gasdurchsatz für Luft von 12 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> und dem Druck von 1285 Pa ergibt sich ein Saugvermögen  $S_2$  von 0,031 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> oder 112 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

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

$$\begin{aligned} S_0 & 2065 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \\ \Delta p_d & 35 \text{ hPa Differenzdruck am Überstromventil} \\ K_0 & 28 \text{ bei } p_v = 43 \text{ hPa} \end{aligned}$$

Wir schätzen den Ansaugdruck  $p_a = 1000 \text{ Pa}$  und berechnen  $S_1$  nach Formel 2-7.

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

Wir erhalten ein Saugvermögen  $S_1$  von  $0,506 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  oder  $1.822 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

$$\text{Mit } p_a = \frac{Q}{S_1}$$

und einem Wert für  $p_a$  von  $785 \text{ Pa}$  erhält man den Ansaugdruck in der Trockenkammer, der nochmals eingesetzt in Formel 2-7 das genauere Saugvermögen  $S_1 = 1.736 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  liefert bei einem Ansaugdruck von  $p_a = 823 \text{ Pa}$ .

Wir berechnen den Kondensator für eine kondensierende Dampfmenge von  $10 \text{ kg h}^{-1}$ . Für die Kondensationsfläche gilt

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

**Formel 2-12** Berechnung Kondensationsfläche

$A_k$	Kondensationsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$Q_{\text{Wasser}}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie	[Ws kg <sup>-1</sup> ]
$m_{\text{Wasser}}$	Masse des Wasserdampfs	[kg]
$\Delta T_m$	Temperaturdifferenz Dampf /	
	Kondensationsfläche	[K]
$k$	Wärmeübergangszahl	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]

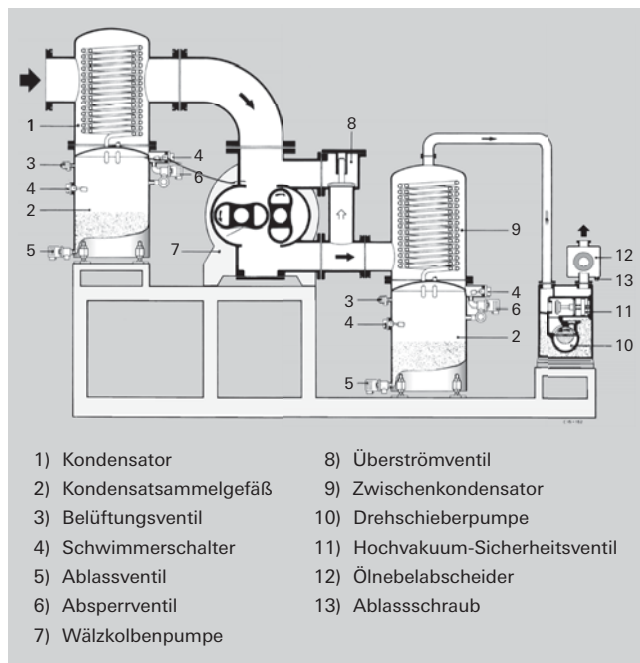
Mit den folgenden Werten

$Q_{\text{Wasser}}$	$2,257 \cdot 10^6 \text{ Ws kg}^{-1}$
$m_{\text{Wasser}}$	10 kg
$t$	3600 s
$\Delta T_m$	60 K
$k$	$400 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

erhalten wir als Kondensationsfläche  $A_k$  einen Wert von  $0,261 \text{ m}^2$ .

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  $k$  [20] 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.

Für weitere technische Einzelheiten sei auf die weiterführende Literatur verwiesen [21].



**Abbildung 2.4:** Wälzkolbenpumpenstand 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, transportiert 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. mit Hilfe einer Dosierpumpe geschehen, welche die geförderte Kondensatmenge gleichmäßig aus dem Sammelgefäß austrägt. Sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Sammelgefäß unter ein bestimmtes Niveau, so wird das Saugventil der Vorpumpenpumpe 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 2.4). 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.

Die oben angestellten theoretischen Grundlagen werden für die Auslegung von Wälzkolbenpumpständen vielfach angewendet. Abbildung 2.5 zeigt eine Vakuumlösung zur Reduktion der Restfeuchte des eingesetzten Papiermaterials bei der Produktion von Seekabeln. Ein Vorkondensator (im Bild nicht dargestellt) kondensiert den Wasserdampf hauptsächlich in der ersten Trocknungsphase bei hohen Prozessdrücken. Ein Zwischenkondensator schützt die nachgeschaltete Drehschieberpumpe BA 501 und kondensiert den Wasserdampf hauptsächlich in einer zweiten Trocknungsphase.

Abbildung 2.6 zeigt einen zur Transformatorentrocknung eingesetzten Wälzkolbenpumpstand. Der Zwischenkondensator reduziert die Restfeuchte des eingesetzten Materials so weit, dass die Wasserdampfkapazität der nachgeschaltete Drehschieberpumpe BA 501 nicht überschritten wird.



Abbildung 2.5: Wälzkolbenpumpstand zur Dampfkondensation



Abbildung 2.6: Wälzkolbenpumpstand zur Trafotrocknung

**2.2.3 Turbopumpstände****2.2.3.1 Auspumpen eines Behälters mit einem Turbopumpstand auf  $10^{-8}$  hPa**

Ein Behälter aus blankem Edelstahl soll in 12 Stunden auf einen Druck von  $p_b = 10^{-8}$  hPa 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  $10^{-8}$  hPa setzen sich zusammen aus:

$$\begin{aligned} t_1 &= \text{Auspumpzeit der Vorpumpe bis } 0,1 \text{ hPa} \\ t_2 &= \text{Auspumpzeit der Turbopumpe bis } 10^{-4} \text{ hPa} \\ t_3 &= \text{Pumpzeit zur Desorption der Edelstahloberfläche} \\ t_4 &= \text{Pumpzeit zur Ausgasung der FPM-Dichtungen} \end{aligned}$$

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  $Q_{des,M}$  und den Dichtungen  $Q_{des,K}$ :

$$p_b = \frac{Q_l}{S} + \frac{Q_{des,M}(t_3)}{S} + \frac{Q_{des,K}(t_4)}{S}$$

Formel 2-13 Basisdruck eines Vakuumsystems

$p_b$	Basisdruck	[Pa]
$Q_l$	Gasstrom durch Lecks und Permeation	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$Q_{des,M}$	Gasabgabe von der Metalloberfläche	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$Q_{des,K}$	Gasabgabe von den Dichtungen	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]

Der Behälter hat folgende Daten:

$V$	Behältervolumen	0,2 m <sup>3</sup>
$A$	Behälteroberfläche	1,88 m <sup>2</sup>
$A_K$	Dichtungsfläche FPM	0,0204 m <sup>2</sup>
$Q_l$		$< 1,0 \cdot 10^{-9}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
$q_{des,M}$	Flächenbezogene Desorptionsrate Edelstahl	$2,7 \cdot 10^{-4}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>
$q_{des,K}$	Flächenbezogene Desorptionsrate FPM	$1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>

Die Vorpumpe soll in einer Zeit  $t_1 = 180$  s den Behälter auf 0,1 hPa evakuieren und diesen Druck auch bei geöffnetem Gasballastventil erreichen. Das Saugvermögen erhält man nach Formel 2-9:

$$S_{Vorpumpe} = \frac{V}{t_1} \cdot \ln \frac{p_0}{p_1} = 10,2 \text{ l s}^{-1} = 36,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

Wir wählen eine Penta 35 mit einem Saugvermögen von  $S_v = 35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Die Turbomolekularpumpe sollte etwa das 10- bis 100-fache Saugvermögen der Vorpumpe haben, um die adsorbierten Dämpfe und Gase von der Metalloberfläche abzupumpen. Wir wählen eine HiPace 700 mit einem Saugvermögen  $S_{HV} = 685 \text{ l s}^{-1}$ . Mit Formel 2-9 erhalten wir

$$t_2 = \frac{V}{S_{Turbopumpe}} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,0 \text{ s}$$

**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  $t^{-1}$  ab. Die Zeitkonstante  $t_0$  beträgt etwa eine Stunde.

Mit Formel 1-32 aus Kapitel 1

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t_3}$$

berechnen wir die Zeit zum Erreichen des Basisdrucks

$$p_{b3} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

$$t_3 = \frac{q_{des,M} \cdot A \cdot t_0}{S \cdot p_{b3}} = 2,67 \cdot 10^6 \text{ s} = 741 \text{ h.}$$

Die resultierende Zeit von 741 Stunden ist zu lang. Sie muss durch Ausheizen verkürzt werden. Die Ausheiztemperatur wird so gewählt, dass das temperaturempfindlichste unter den eingesetzten Materialien noch nicht angegriffen wird. In unserem Beispiel wird die Temperatur durch FPM-Dichtungen begrenzt, die eine Temperatur von 370 K noch gut vertragen. Damit steigt die Desorptionsgeschwindigkeit theoretisch um mehr als einen Faktor 1.000 an [22]. Praktisch wird die Ausheiztemperatur auf einige Stunden verkürzt.

Hohe Desorptionsraten können auch durch Ausglühen des Behälters unter Vakuum oder durch bestimmte Oberflächenbehandlungen (polieren, beizen) gesenkt werden.

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 Drucks auszuschalten, der um einen Faktor 100 über dem gewünschten Basisdruck liegt. Damit wird der gewünschte Druck  $p_{b3}$  nach Erkalten des Rezipienten erreicht werden.

**Desorption der Dichtungen**

Bei Betrieb unter  $10^{-6}$  hPa sind die Ausgasraten von Kunststoffen von Bedeutung. Die Oberflächen der Dichtungen sind zwar verhältnismäßig klein, jedoch nimmt die Desorption nur mit dem Faktor

$$\frac{t_0}{\sqrt{t_4}}$$

nach Formel 1-33 aus Kapitel 1 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 Desorption der Metalloberflächen dominieren. Die Ausgasrate von Kunststoffoberflächen wird berechnet nach Formel 1-33 aus Kapitel 1:

$$Q_{des,K} = q_{des,K} \cdot A_d \cdot \frac{t_0}{\sqrt{t_4}}$$

Wir setzen  $Q_{des,K} = S \cdot p_{des,K}$  und erhalten für

$$p_{b4} = 10^{-8} \text{ hPa}; t_4 = 459 \cdot 10^6 \text{ s} = 1277 \text{ h.}$$

Hierbei ist  $t_0 = 3600 \text{ s}$  gesetzt und der zugehörige Wert  $q_{des,K}$  aus dem Diagramm [23] für FPM abgelesen. Man sieht, dass der Beitrag der Desorption der Dichtung im kalten Zustand zur Abspumpzeit in ähnlicher Größenordnung liegt, wie derjenige der Metalloberfläche.

Da die Diffusion der im Inneren der Dichtung gelösten Gase das Zeitverhalten des Desorptionsgasstroms bestimmt, hat die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten  $D$  einen entscheidenden Einfluss auf die Pumpzeit:

$$D = D_0 \cdot \exp \left[ - \frac{E_{dif}}{R \cdot T} \right]$$

**Formel 2-14** Diffusionskoeffizient (T)

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 bei einem gegebenen Saugvermögen zu einem Druck:

$$p_{Leck} = \frac{Q_{Leck}}{S}$$

Eine Anlage gilt als hinreichend dicht, wenn dieser Druck kleiner als 10% des Arbeitsdrucks ist. Leckraten von  $10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$  sind in der Regel erreichbar und auch für diese Anlage gefordert. Daraus ergibt sich ein Druckanteil aus der Leckrate von  $p_{Leck} = 1,46 \cdot 10^{-11} \text{ hPa}$ . 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  $10^{-7}$  hPa lassen sich in sauberen Behältern in etwa einem Tag ohne zusätzliche Maßnahmen erreichen.

Sollen Drücke bis  $10^{-4}$  hPa erreicht werden, so addieren sich die Abspumpzeiten von Vorpumpe und Turbopumpe. Im oben aufgeführten Fall sind dies etwa 200 s. Bei Drücken unterhalb von  $10^{-6}$  hPa ist ein hohes Saugvermögen der Turbomolekularpumpe erforderlich, um besonders das von den Metallwänden desorbierende Wasser abzupumpen.

Dies gelingt nur durch zusätzliches Ausheizen (90 – 400 °C) des Vakuumsbehälters, wenn in wenigen Stunden der geforderte Basisdruck  $p_b$  von  $10^{-8}$  hPa erreicht werden soll. Nach Erreichen des 100-fachen Wertes des angestrebten Druckes stellt man die Heizung



ab. Nach Erkalten des Rezipienten wird der Basisdruck in den meisten Fällen erreicht.

Bei Drücken unter  $10^{-8}$  hPa sollte man nur Metaldichtungen verwenden, um die hohen Desorptionsraten von Elastomerdichtungen zu umgehen.

Leck- und Permeationsraten können bei Drücken bis  $10^{-10}$  hPa in Metallbehältern ohne größeren Aufwand genügend klein gehalten werden.

### 2.2.3.2 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 Rotortemperatur von höchstens  $120\text{ °C}$  begrenzt. Oberhalb dieser Temperaturgrenze kommt es zu einer irreversiblen plastischen Deformation der Rotoren mit nicht vorhersehbarem zeitlichen Verlauf.

Durch Messung der Rotortemperatur und Begrenzung der maximalen Temperatur können die Pumpen der HiPace-Serie mit Saugvermögen  $> 1.000\text{ l s}^{-1}$  nicht überhitzt werden. Präzise Charakterisierung des Prozesses erlaubt bei einer Vielzahl von Pumpen die Abschätzung der Rotortemperatur und definiert ein Prozessfenster für den langzeitstabilen und sicheren Betrieb.

Die Eignung einer Turbopumpe zum Pumpen hoher Gaslasten kann durch das Design von Rotor und Stator sowie präzise Kontrolle des Temperaturverlaufs in der Pumpe beeinflusst werden. So sind z. B. die Pumpen der ATH M-Serie explizit auf hohen Gasdurchsatz bei vergleichsweise hohen Prozessdrücken ausgelegt. Diese Turbopumpen wurden speziell entwickelt für Beschichtungs- und Trockenätzprozesse in der Halbleiterindustrie. Die besonderen Anforderungen liegen hier beim Pumpen von korrosiven Medien, dem beheizten Betrieb der Pumpen zur Vermeidung von Kondensation von Prozesschemikalien oder Nebenprodukten und eben speziell auch hohen Prozessgasdurchflüssen für schwere Gase. Diese Entwicklungen können auf Anwendungen im Bereich Solar und LED-Lichttechnik übertragen werden. Auch der Einsatz von Turbopumpen in Schleusen mit hohem Übergabedruck zwischen Vorpumpen und Turbopumpen und industrielle Betriebsbedingungen mit hohen Kühlwassertemperaturen ist mit dieser Auslegung möglich.

Auch Pumpen, die durch hohe Kompressionsverhältnisse speziell für leichte Gase auf die Erzeugung niedriger Drücke ausgelegt sind, können innerhalb gewisser Grenzen für Vakuumprozesse mit hohen Gasdurchsätzen eingesetzt werden. 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. Diese Maßnahme kann das Prozessfenster für Pumpen erweitern.

Besonders kritisch ist das Pumpen von schweren Edelgasen wie Krypton oder Xenon. 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 Gasdurchsätze für diese Gase niedrig im Vergleich zu Gasmolekülen oder einatomigen Gasen mit niedrigerer Masse, also höherer Beweglichkeit und Stoßzahl.

Beim Betrieb mit Prozessgasen erfüllt die Turbopumpe zwei wichtige Funktionen:

- schnelles Evakuieren der Prozesskammer auf einen niedrigen Druck (saubere Anfangsbedingungen durch Entgasen der Oberflächen und Substrate)
- Konstanzhaltung des gewünschten Druckes während des Vakuumprozesses (Beschichten, Trockenätzen, etc.)

Üblicherweise sind der Gasdurchsatz  $Q$  und der Arbeitsdruck  $p_{\text{Prozess}}$  während eines Prozesses vorgegeben und damit auch das Saugvermögen an der Prozesskammer.

$$S = \frac{Q}{p_{\text{Prozess}}}$$

Die Turbopumpe wird nach dem erforderlichen Gasdurchsatz ausgewählt. Im Katalog sind die maximal zulässigen Gasdurchsätze für verschiedene Gase der jeweiligen Pumpe angegeben.

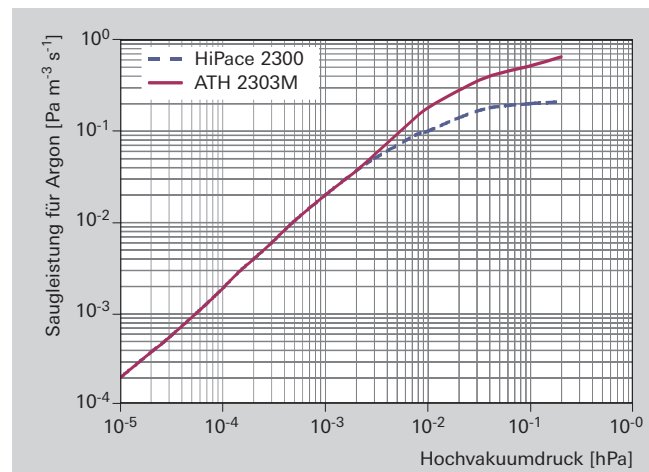


Abbildung 2.7: Gasdurchsatz unterschiedlicher Turbopumpen bei hohen Prozessdrücken

In Abbildung 2.7 sind die Gasdurchsatzkurven für unterschiedliche Turbopumpen auf Flansch NW 250 angegeben. Die Vorpumpe für die ATH 2303 M ist hierbei von ein typischer prozessstauglicher Wälzkolbenpumpenstand, wie er in der Halbleiterindustrie eingesetzt wird. Die Saugleistung muss für beide Pumpen gleich sein, da der gleiche Gasstrom nacheinander beide Pumpen passiert:

$$S_{\text{Vorvakuum}} = \frac{Q}{p_{\text{Vorvakuum}}}$$

Die Auswahl der Vorvakuumpumpe hat Einfluss auf die Temperaturbilanz der Turbopumpe. Wird das Saugvermögen der Vorpumpe gerade so ausgelegt, dass mit dem Gasdurchsatz der Turbopumpe deren maximale Vorvakuumverträglichkeit erreicht wird, so wird der Rotor der Turbopumpe thermisch belastet. Das Saugvermögen der Vorpumpe sollte größer gewählt werden, um Gasreibung und damit thermische Belastung der Turbopumpe zu reduzieren.

Das Saugvermögen an der Prozesskammer wird entweder über die Drehzahl oder ein Regelventil vor der Turbopumpe auf den erforderlichen Wert gedrosselt. Eine Druckregelung über die Drehzahl der Turbopumpe scheitert an der hohen Trägheit des Rotors, die eine schnelle Variation der Drehzahl verhindert. In einigen Prozessfenstern gelingt eine Druckregelung über die Drehzahlregulierung der Vorpumpe.

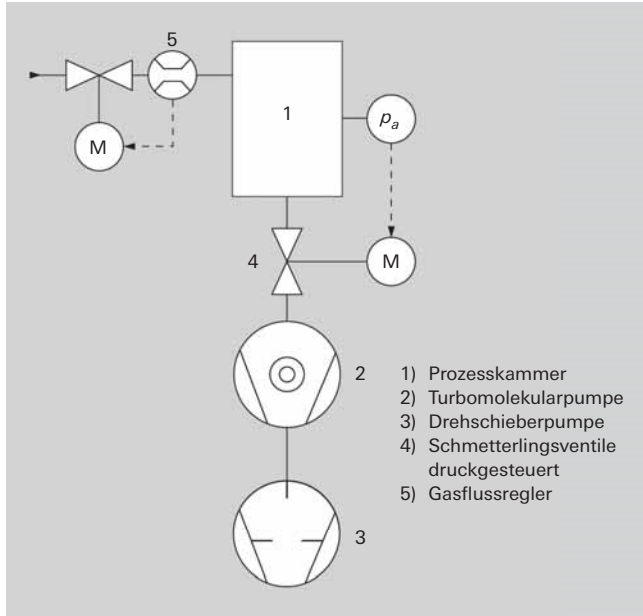


Abbildung 2.8: Vakuumanlage mit Druck- und Durchsatzregelung

Wir betrachten als Beispiel eine Vakuum-Prozessanlage nach Abbildung 2.8 mit den Parametern

$$Q = 3,0 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}, \text{ Prozessgas Argon}$$

$$p_{\text{Prozess}} = 5 \text{ hPa}$$

$$\text{Mit } S = \frac{Q}{p_{\text{Prozess}}}$$

ergibt sich ein Saugvermögen der Turbopumpe von nominell  $600 \text{ l s}^{-1}$ . Bei diesem hohen Prozessdruck wird das maximale Saugvermögen von Turbopumpen nicht mehr erreicht. Wir wählen daher als Turbopumpe (2) eine ATH 2303 M, die bei diesem Druck immer noch ein Saugvermögen von mehr als  $800 \text{ l/s}$  mit Splitterschutz erreicht und als Vorpumpe eine A 603 P. Mit dieser Prozesspumpe erreichen wir bei einem Gasdurchsatz von  $3,0 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$  einen Vorvakuumdruck von  $0,24 \text{ hPa}$ . Bei einem maximalen Vorvakuumdruck der Turbopumpe von  $3,3 \text{ hPa}$  ist diese Auslegung trotz des thermisch anspruchsvollen Prozessgases Argon konservativ.

Das Prozessgas wird über einen Massenflussregler (5) in die Kammer (1) eingelassen. Das vom Druck  $p_{\text{Prozess}}$  gesteuerte Schmetterlingsventil (4) drosselt das Saugvermögen der Turbopumpe (2). Nach Ende des Prozessschritts stellt man die Gaszufuhr ab, öffnet das Regelventil vollständig um die Kammer wieder auf Enddruck 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 4.10.2.

## 2.3 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. Dies ist eine in den meisten Fällen unzulässige Vereinfachung, da eine Rohrleitung zwischen einem Behälter und einer Pumpe das effektive Saugvermögen reduziert.

### 2.3.1 Laminarer Leitwert

Betrachten wir den Pumpstand für die Trocknungsanlage in Abbildung 2.3 und berechnen den Druckabfall zwischen Kondensator und Vorpumpe. In diesem Fall ist durch den Druck von  $4.285 \text{ Pa}$  und das Saugvermögen der Vorpumpe von  $S_v = 107 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 2,97 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ein Gasdurchsatz von  $Q = 4.285 \cdot 2,97 \cdot 10^{-2} = 127 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$  vorgegeben. Die Rohrleitung DN 63 hat einen Innendurchmesser von  $0,07 \text{ m}$  und eine Länge von  $2 \text{ m}$ . Zwei Rohrbögen  $90^\circ$  werden mit einer äquivalenten Länge von je  $0,2 \text{ m}$  berücksichtigt.

Aus dem Einlassdruck der Pumpe von  $4.285 \text{ Pa}$  und einem Wert für Luft von  $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$  für  $\bar{l} \cdot \rho$  nach Kapitel 1, Tabelle 1.5 erhalten wir eine mittlere freie Weglänge von  $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Mit der Knudsenzahl nach Kapitel 1, Formel 1-13 bestimmen wir den Strömungsbereich:

$$K_n = \frac{\bar{l}}{d} = 2,23 \cdot 10^{-2}$$

Die Knudsenzahl ist kleiner als  $0,01$ , wir haben es also mit viskoser Strömung zu tun. Die Strömung kann laminar oder turbulent sein. Bei der laminaren Strömung sind die Leitwerte höher als bei der turbulenten Strömung und es treten geringere Saugvermögensverluste auf. Für Laminarströmung muss die Reynoldszahl kleiner als  $2.300$  sein. Zur Berechnung der Reynoldszahl bestimmen wir zunächst die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  im Rohr

$$v = \frac{4 \cdot S_v}{d^2 \cdot \pi} = 8,66 \text{ m s}^{-1}$$

Die Dichte der Luft  $\rho$  bei  $4.285 \text{ Pa}$  bestimmen wir aus der Dichte der Luft  $\rho_0$  von  $1,293 \text{ kg m}^{-3}$  bei Atmosphärendruck

$$\rho = \frac{1,293 \cdot 4.285}{101.325} = 5,47 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$$

Nach Kapitel 1, Formel 1-14 erhalten wir mit der dynamischen Viskosität für Luft von  $18,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} = 1.820$$

Es herrscht also Laminarströmung vor.

Für den Einlassdruck an der Rohrleitung  $p_1$  benutzen wir Formel 1-26 aus Kapitel 1:

$$C_{\text{Rohr, lam}} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{228 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

Wir multiplizieren mit  $\Delta p = p_1 - p_2$  und erhalten so den Gasdurchsatz

$$Q = C_{\text{Rohr, lam}} \cdot \Delta p = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1^2 - p_2^2)$$

Da  $p_2$  einen Wert von 4.285 Pa und  $Q$  einen Wert von  $127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  hat, kann man direkt daraus  $p_1$  ermitteln:

$$p_1 = q_{diff} \cdot A_d \cdot \sqrt{p_2^2 + \frac{Q \cdot 256 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4}} = 4.287,2 \text{ Pa}$$

Wir haben also lediglich einen sehr kleinen Druckverlust von 2,2 Pa.

Den Leitwert der Rohrleitung erhalten wir aus Kapitel 1, Formel 1-18:

$$C = \frac{Q}{\Delta p} = 58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ oder } 58.000 \text{ ls}^{-1}$$

Das effektive Saugvermögen

$$S_{eff} = \frac{S_v \cdot C_{Rohr, lam}}{S_v + C_{Rohr, lam}} = 2,9707 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

ist nur geringfügig kleiner als das Saugvermögen ohne Rohrleitung  $S_v$  von  $2,9222 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

### 2.3.2 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 berücksichtigen wir mit Ihrer gestreckten Länge von je 0,235 m, also insgesamt  $l = 2,47 \text{ m}$ . Der Rohrleitungswiderstand ist nach Kapitel 1, Formel 1-30:

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l} = 1,71 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Hierbei ist  $\bar{c} = 471 \text{ m s}^{-1}$  für Luft bei  $T = 293 \text{ K}$ . Der Blendenleitwert des Rohreintritts ist bereits berücksichtigt.

Das effektive Saugvermögen erhält man nach der Formel:

$$S_{eff} = \frac{S_v \cdot L_{Rm}}{S_v + L_{Rm}} = 1,09 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ mit } S_v = 2,97 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Im molekularen Strömungsbereich würde das Saugvermögen der Vorpumpe also 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.



# 3 Mechanische Komponenten im Vakuum

## 3.1 Allgemeines

Eine Vakuumanlage enthält eine Vielzahl unterschiedlicher Einzelbauteile wie z. B. Kammern, Pumpen, Messgeräte, Komponenten, Ventile, Durchführungen, Manipulatoren 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 in der Vakuumtechnik verwendeten Werkstoffe, die unterschiedlichen Verbindungsarten und die mechanischen Komponenten beschrieben. Es wird aufgezeigt, worauf bei der Konstruktion und der Auswahl zu achten ist.

## 3.2 Werkstoffe

In der Vakuumtechnik sind die Anforderungen an einen Werkstoff sehr vielfältig. Abhängig vom Einsatzzweck, den Umgebungsbedingungen und des zu erreichenden Vakuums ist zu prüfen, welche Anforderungen die Werkstoffe erfüllen müssen.

Im Folgenden sind wichtige Anforderungen aufgeführt, die zu prüfen sind:

- **Ausreichende mechanische Festigkeit über den gesamten Einsatztemperaturbereich:**  
Neben der strukturellen Integrität muss sichergestellt werden, dass die Verformung von Funktionsflächen zu keiner Beeinträchtigung der Funktionalität führt. Beispiel: Der atmosphärische Luftdruck auf evakuierte Kammerbauteile beträgt etwa  $10 \text{ N/cm}^2$ . Bei einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$  ergibt dies eine Kraft von  $100.000 \text{ N}$ .
- **Hohe Gasdichtheit:**  
Jeder Werkstoff ist prinzipiell gasdurchlässig. Der Gesamtvorgang der Gasdurchlässigkeit wird Permeation genannt. Er ist abhängig vom Werkstoff, der Gasart und den Umgebungsbedingungen – insbesondere der Temperatur. Bei der Verwendung von Elastomerdichtungen ist deren Permeation zu berücksichtigen. Beispiel: Für eine FKM(Fluor Kautschuk-)Dichtung der Nennweite DN 500 ISO-K berechnet sich die Permeationsrate für atmosphärische Luft mit 60 % Luftfeuchtigkeit auf etwa  $4 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ . Bei typischen Vakuumsystemen mit FKM-Dichtungen wird daher selten ein Arbeitsdruck besser als  $1 \cdot 10^{-8} \text{ hPa}$  erreicht.
- **Geringer Eigendampfdruck, hohe Schmelz- und Siedetemperatur:**  
Ein zu hoher Eigendampfdruck begrenzt den Vakuumenddruck. Neben der Vakuumtauglichkeit von Ölen

und Fetten muss auch der Eigendampfdruck von Metallen oder deren Partialdruck in Legierungen berücksichtigt werden. Beispiel: Bei Messing begrenzt der Partialdruck des Zinks die maximal zulässige Temperatur im Hochvakuum auf etwa  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- **Saubere Oberflächen, geringer Gehalt an Fremdgasen, leichte Entgasbarkeit:**  
Saubere Oberflächen sind eine Grundvoraussetzung. Jedoch ist jede Oberfläche, die der Umgebungsluft ausgesetzt war, von einer adsorbierten Schicht überzogen. Chemisch oder physikalisch adsorbierte Moleküle an der Oberfläche oder im Volumen des Werkstoffs stellen eine Gasquelle dar, wenn diese desorbieren (sich von der Oberfläche lösen). Um einen niedrigen Enddruck zu erreichen, müssen Werkstoffe mit geringen Desorptionsraten verwendet werden. Beispiel: Eine Monoschicht absorbiertes Gas entspricht in etwa einer Gasmenge von  $4 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{m}^2$ . Betrachtet man ein beidseitig geschlossenes Rohr mit einem Durchmesser von  $50 \text{ cm}$  und einer Länge von  $100 \text{ cm}$  (Oberfläche ca.  $2 \text{ m}^2$ , Volumen ca.  $200 \text{ l}$ ), führt die Freisetzung der Monoschicht zu einem Druckanstieg von etwa  $0,4 \text{ Pa}$  bzw.  $4 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ . Dabei wurde noch nicht berücksichtigt, dass die Oberfläche immer größer ist als die geometrische.
- **Gute Temperaturwechselbeständigkeit, angepasstes Ausdehnungsverhalten:**  
Beispiel: Die unterschiedliche thermische Ausdehnung begrenzt die maximal zulässige Temperatur bei der Kombination Aluminiumdichtung und Edelstahlflansche auf etwa  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nach zu hohen Temperaturen tritt beim Abkühlen häufig eine Verschlechterung der Dichtwirkung ein.
- **Korrosionsbeständigkeit, chemische Resistenz:**  
Beispiel: Viele Beschichtungsprozesse erfordern chemisch aktive Prozessgase. Es ist daher zu prüfen, ob die verwendeten fluide Bauteile oder Dichtungen angreifen. Insbesondere dünnwandige Bauteile wie Metallbälge sind durch Korrosion gefährdet. Ihre Standzeit ist gegebenenfalls durch Versuche zu ermitteln.

Spezielle Anwendungen können zudem weitere Forderungen an die Werkstoffe stellen.

Allgemein gilt: Je niedriger der angestrebte Arbeitsdruck ist, desto höher sind die Ansprüche an das Material und desto kleiner ist die Auswahl an möglichen Materialien. Daher hat insbesondere in der UHV(Ultrahochvakuum-) Technik die Materialauswahl eine große Bedeutung.



### 3.2.1 Metallische Werkstoffe

Viele Metalle und Metalllegierungen haben eine hohe Festigkeit, sind gut zu verarbeiten und zu reinigen, temperaturbeständig und weniger empfindlich gegenüber mechanischen Einwirkungen wie etwa Gläser. Die Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte wie der Materialpreis oder die Verfügbarkeit führt im Wesentlichen zur Auswahl von Edelstahl, Normalstahl und Aluminiumlegierungen als Werkstoffe für mechanische Komponenten.

#### 3.2.1.1 Edelstahl

Edelstahl ist der bevorzugte Werkstoff für den Bau von Kammern oder Komponenten in der Vakuumtechnik. Edelstahl besitzt eine ausreichende Festigkeit für Flanschverbindungen – auch bei Ausheizprozessen. Er ist vakuumtauglich zu schweißen, seine Oberfläche ist hinreichend gut passiviert und bietet damit einen ausreichenden Schutz für viele Anwendungsbereiche. In den folgenden Tabellen sind die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften der in der Vakuumtechnik gebräuchlichen Edelstähle aufgeführt.

Häufig werden europäische Werkstoffnummern mit vergleichbaren Werkstoffbezeichnungen des AISI (American

Iron and Steel Institute) synonym verwendet, so z. B. 1.4301 mit 304, 1.4307 mit 304L, 1.4404 mit 316L oder 1.4429 mit 316LN. Die Werkstoffe sind aber nur näherungsweise vergleichbar. Für Vakuumanwendungen sind die Unterschiede meist marginal. Für spezielle Anforderungen muss die Austauschbarkeit jedoch im Einzelfall beurteilt werden. Beispiel: Wird für ein Bauteil der Werkstoff 1.4301 vorgeschrieben, ist dies üblicherweise mithilfe des zugeordneten Werkstoffzeugnisses zu belegen. Ist im Zeugnis nur der Werkstoff 304 attestiert, ist die Forderung nicht erfüllt. Entscheidend ist hier die Benennung im Zeugnis. Hersteller können Halbzeuge auch mehrfach attestieren, wenn die jeweiligen Werkstoffspezifikationen erfüllt sind. Wird ein Werkstoff z. B. als 1.4301, 1.4307, 304 und 304L attestiert, sind die Verwendungsmöglichkeiten vielfältiger.

Um Probleme – etwa bei der Abnahme einer Anlage – zu vermeiden, sind die Forderungen an die Werkstoffe und deren Attestierung bereits bei der Anfrage von Halbzeugen oder Bauteilen zu benennen. Eine nachträgliche Attestierung ist häufig nicht möglich, insbesondere bei speziellen Forderungen: beispielsweise nach besonderen

Werkstoffnummer	C [≤ %]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sonstige	Si [≤ %]	Mn [≤ %]	S [≤ %]
1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5	–	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4305	0,10	17,0 – 19,0	8,0 – 10,0	–	N ≤ 0,11, Cu ≤ 1	1,0	2,0	0,15 – 0,35
1.4306	0,03	18,0 – 20,0	10,0 – 12,0	–	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5	–	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4429	0,03	16,5 – 18,5	11,0 – 14,0	2,5 – 3	N 0,12 – 0,22	1,0	2,0	0,015
1.4435	0,03	17,0 – 19,0	12,5 – 15,0	2,5 – 3	N ≤ 0,11	1,0	2,0	0,015
1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2 – 2,5	Ti 5 × C ≤ 0,7	1,0	2,0	0,015

**Tabelle 3.1:** Chemische Zusammensetzung (Masseanteil) von Edelstählen gemäß der europäischen Werkstoffbezeichnung nach EN 10088 Teil 1

AISI-Nummer	C [≤ %]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sonstige	Si [≤ %]	Mn [≤ %]	S [≤ %]
304	0,08	18,0 – 20,0	8,0 – 10,5	-	N ≤ 0,1	0,75	2,0	0,03
304L	0,03	18,0 – 20,0	8,0 – 12,0	-	N ≤ 0,1	0,75	2,0	0,03
316	0,08	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0	N ≤ 0,1	0,75	2,0	0,03
316L	0,03	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0	N ≤ 0,1	0,75	2,0	0,03
316LN	0,03	16,0 – 18,0	10,0 – 14,0	2,0 – 3,0	N 0,10 – 0,16	0,75	2,0	0,03

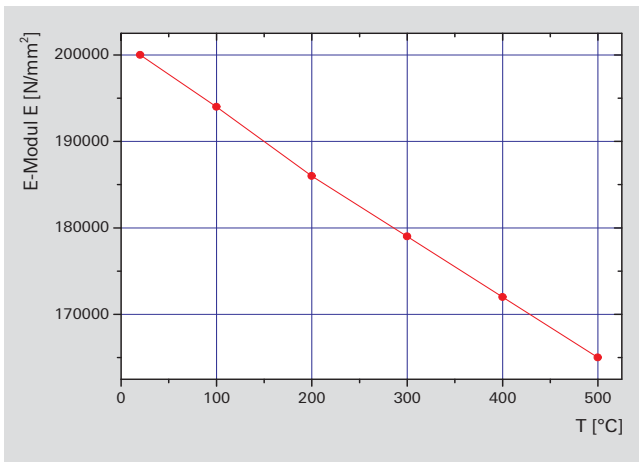
**Tabelle 3.2:** Chemische Zusammensetzung (Masseanteil) von Edelstählen gemäß der Werkstoffbezeichnung nach AISI (American Iron and Steel Institute)

Werkstoffnummer	0,2 % Dehngrenze $R_{p,0.2}$ bei 20 °C [N/mm <sup>2</sup> ]	0,2 % Dehngrenze $R_{p,0.2}$ bei 300 °C [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit $R_m$ bei 20 °C [N/mm <sup>2</sup> ]	Wärmeausdehnung zwischen 20 und 300 °C [ $10^{-6} K^{-1}$ ]	Gebrauchstemperatur bei Luft [°C]	Gefüge	Magnetisierbarkeit
1.4301	≥ 190	≥ 110	500 – 700	17,0	300	Austenit (ggf. Ferritanteil)	vorhanden <sup>1)</sup>
1.4306	≥ 180	≥ 100	460 – 680	17,0	350	Austenit (ggf. Ferritanteil)	vorhanden <sup>1)</sup>
1.4307	≥ 175	≥ 100	500 – 700	17,0	350	Austenit (ggf. Ferritanteil)	vorhanden <sup>1)</sup>
1.4401	≥ 200	≥ 127	500 – 700	17,0	300	Austenit (ggf. Ferritanteil)	weniger vorhanden <sup>1)</sup>
1.4404	≥ 200	≥ 119	500 – 700	17,0	400	Austenit (ggf. Ferritanteil)	weniger vorhanden <sup>1)</sup>
1.4429	≥ 280	≥ 155	580 – 800	17,0	400	Austenit	kaum vorhanden <sup>2)</sup>
1.4435	≥ 200	≥ 119	500 – 700	17,0	400	Austenit	kaum vorhanden <sup>2)</sup>
1.4571	≥ 200	≥ 145	500 – 700	18,0	400	Austenit (ggf. Ferritanteil)	vorhanden <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Kann im abgeschreckten Zustand leicht magnetisch sein. Die Magnetisierbarkeit nimmt mit steigender Kaltverfestigung zu.

<sup>2)</sup> Kann mit steigender Kaltverfestigung leicht magnetisch sein.

**Tabelle 3.3:** Eigenschaften von Edelstählen



**Abbildung 3.1:** Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls austenitischer Edelstähle

mechanischen Eigenschaften, einer Einschränkung in der chemischen Zusammensetzung oder die Attestierung nach AD 2000 W2 (Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter 2000, Merkblatt W2, „Werkstoffe für Druckbehälter“) oder ASME (American Society of Mechanical Engineers).

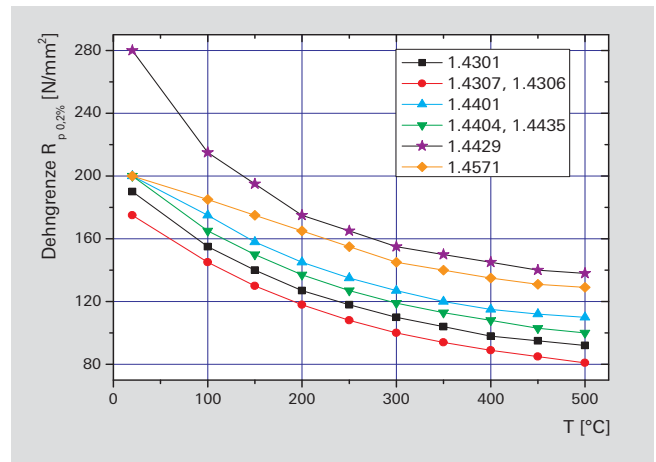
**Edelstahl 1.4301:** der am häufigsten eingesetzte Chrom-Nickel-Stahl. Sehr gut kaltumformbar, schweißbar und polierbar. Für viele Anwendungen ausreichende Korrosionsbeständigkeit. Geeignet für Vakuumanwendungen. Wird z. B. für Flansche, Rohrbauteile und Kammern verwendet.

**Edelstahl 1.4305:** Variante von 1.4301 mit Schwefelanteil zur Verbesserung der Zerspanbarkeit (Automatenstahl). Geringere Korrosionsbeständigkeit als 1.4301. Nicht schweißbar. Hinreichend gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird teilweise verwendet für Dreh- und Fräsbauteile wie z. B. Zentrierringe.

**Edelstahl 1.4307, 1.4306:** kohlenstoffarme Variante von 1.4301. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts schweißbar, ohne gegen interkristalline Korrosion anfällig zu sein. Etwas geringere Festigkeit als 1.4301. Sehr gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird verwendet, wenn ein sehr geringer Kohlenstoffanteil gefordert wird, z. B. für CF-Flansche. 1.4307 verdrängt zusehends 1.4306, da die mit dem höheren Chrom- und Nickelanteil verbundenen Vorteile häufig nicht ausreichen, um die höheren Bezugskosten zu rechtfertigen.

**Edelstahl 1.4401:** sehr gut kaltumformbar. Gut schweißbar und polierbar. Wegen des Molybdän-Zusatzes gegenüber nichtoxidierenden Säuren und chloridionenhaltigen Medien beständiger als 1.4301. Gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird z. B. verwendet für Ventilgehäuse, in Bereichen, die einen höheren Schutz vor Korrosion benötigen, oder für die Trinkwasserhausinstallation.

**Edelstahl 1.4404:** kohlenstoffarme Variante von 1.4401. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts schweißbar, ohne gegen interkristalline Korrosion anfällig zu sein. Sehr gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird verwendet, wenn ein sehr geringer Kohlenstoffanteil oder



**Abbildung 3.2:** Temperaturabhängigkeit der 0,2 % Dehngrenze austenitischer Edelstähle

eine höhere Korrosionsbeständigkeit gefordert wird, z. B. für Rohre und Flanschbauteile in der Halbleiterindustrie.

**Edelstahl 1.4435:** Der im Vergleich zu 1.4404 höhere Nickelanteil stabilisiert das austenitische Gefüge, verringert die Bildung von Deltaferrit und ist dadurch auch im Schweißnahtbereich kaum magnetisierbar. Aufgrund des erhöhten Molybdän-Zusatzes gegenüber nichtoxidierenden Säuren und chloridionenhaltigen Medien beständiger als 1.4404. Sehr gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird häufig in der pharmazeutischen Industrie eingesetzt, dort auch entsprechend der Basler Norm 2 (BN2), die engere Analysengrenzen setzt und den zulässigen Ferritgehalt definiert.

**Edelstahl 1.4429:** ähnliche Eigenschaften wie 1.4435, jedoch größere Festigkeit durch den hohen Stickstoffanteil. Dieser stabilisiert zudem das austenitische Gefüge, minimiert dadurch die Bildung von Deltaferrit und somit die Magnetisierbarkeit. Sehr gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird verwendet für CF-Flansche, insbesondere wenn eine Vakuumglühung zur Reinigung oder Entmagnetisierung bei hohen Temperaturen erfolgt. Die Verfügbarkeit für Rohre und Bleche aus 1.4429 ist gering. Bei Kammern oder Komponenten werden daher Flansche aus 1.4429 häufig mit Halbzeugen aus 1.4404 oder 1.4307 kombiniert.

**Edelstahl 1.4429 ESU:** Eigenschaften wie 1.4429, jedoch verbessertes Gefüge und höhere Reinheit durch die ESU-(Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren)Behandlung. Hervorragend geeignet für Vakuumanwendungen. Wird als Premiumqualität für CF-Flansche verwendet, die eine große Festigkeit und geringste Magnetisierbarkeit aufweisen, verbunden mit der hohen chemischen Reinheit und Homogenität des Gefüges.

**Edelstahl 1.4571:** klassischer „V4A“-Stahl mit einer hohen Verfügbarkeit. Mit Titan stabilisiert und daher schweißbar, ohne gegen interkristalline Korrosion anfällig zu sein. Ähnliche Eigenschaften wie 1.4401, jedoch aufgrund der Titankarbide im Gefüge nur mäßig polierbar und nicht tauglich zum Elektropolieren. Gut geeignet für Vakuumanwendungen. Wird z. B. für Verrohrungen und im Apparatebau verwendet, wenn eine höhere Korrosionsbeständigkeit erforderlich ist.

**ESU (Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren):** Durch das ESU-Verfahren werden unter kontrollierten, reproduzierbaren Prozessbedingungen dichte und seigerungsarme Edelstähle von hoher chemischer und struktureller Reinheit erzeugt. Im ESU-Ofen wird der Block einer Primärschmelze elektrisch umgeschmolzen. Ein elektrischer Pol liegt am Primärblock, der Gegenpol am Boden des wassergekühlten Tiegels an. Zwischen den Polen befindet sich Schlacke, die mittels Widerstandserwärmung oberhalb der Schmelztemperatur des Edelstahls aufgeheizt wird. Von der Unterseite des Primärblocks lösen sich ständig Metalltropfen, die im Kontakt mit der flüssigen Schlacke von nichtmetallischen Verunreinigungen gereinigt werden. Grobe Einschlüsse verschwinden beim Durchgang durch die Schlacke nahezu vollständig. Die verbleibenden restlichen Einschlüsse sind klein und nahezu gleichmäßig über den Sekundärblock verteilt. Der durch das ESU-Verfahren gereinigte Edelstahl zeichnet sich durch eine außerordentlich hohe Dichte und Homogenität aus.

**Austenitische Stähle** sind gut schweißbar und als Vollaustenit nicht magnetisch. Im geglühten Zustand zeichnen sie sich durch sehr hohe Zähigkeitswerte aus, die auch bei extrem tiefen Temperaturen beibehalten werden. Sie neigen zu starker Kaltverfestigung, insbesondere bei höherem Kohlenstoffgehalt. Dabei können sich Teile des Gefüges in Verformungsmartensit umwandeln. Vollaustenitische Stähle neigen beim Schweißen zur Heißrissbildung. Bei vielen austenitischen Werkstoffen wird daher die chemische Zusammensetzung so abgestimmt, dass im Schweißgut Anteile von bis zu 10 % Deltaferrit entstehen, der die Heißrissanfälligkeit reduziert. Viele als austenitisch bezeichnete Stähle können daher ferritische oder martensitische Anteile im Gefüge enthalten, abhängig von ihrer mechanischen oder thermischen Behandlung.

**Magnetisierbarkeit:** Ein vollaustenitisches Gefüge ist nicht magnetisierbar. Durch die beschriebene Umwandlung von Anteilen des Gefüges in Verformungsmartensit oder die Bildung von Deltaferrit können auch als austenitisch bezeichnete Stähle leicht magnetisch werden. Denn sowohl **Martensit** als auch **Ferrit** sind magnetisierbar. Durch Lösungsglühen kann die Kaltverfestigung

und damit das Martensit reduziert oder sogar aufgelöst werden. Die Anteile des Deltaferrits im Gefüge sind im Wesentlichen vom Verhältnis der Ferritbildner Chrom, Molybdän, Silizium und Niob zu den Austenitbildnern Nickel, Kohlenstoff, Stickstoff und Mangan abhängig. Der Ferritanteil lässt sich durch eine Wärmebehandlung teilweise abbauen und dadurch die Magnetisierbarkeit verringern. Da Edelstähle mit gleicher Werkstoffbezeichnung im Rahmen der beschriebenen Grenzen unterschiedliche chemische Zusammensetzungen haben dürfen, ist deren Magnetisierbarkeit keine fixe Größe. Durch Auftragung des Nickel-Äquivalents der Austenitbildner gegen das Chrom-Äquivalent der Ferritbildner in einem Diagramm nach DeLong lassen sich in etwa die jeweils auftretenden Gefügeanteile an Austenit und Ferrit ablesen. In Abbildung 3.3 sind für einige Edelstähle die Bereiche der Chrom- und Nickel-Äquivalente eingetragen (farbige Rechtecke) und deren mittleren Äquivalente als Symbole aufgeführt.

**Stabilisierte Stähle** enthalten Titan oder Niob, die den beim Schweißen ausscheidenden Kohlenstoff binden und damit die Bildung von Chromkarbiden verhindern. Die Bildung von Chromkarbiden würde zu einer Chromverarmung an den Korngrenzen führen und damit den Werkstoff anfällig gegen interkristalline Korrosion werden lassen. Bei Schweißkonstruktionen sollten ab ca. 6 mm Blechdicke kohlenstoffarme ( $C \leq 0,03\%$ ) oder stabilisierte Edelstähle verwendet werden. Die Titankarbide schränken die Polierbarkeit stark ein.

**Wärmebehandlungen:** Bei austenitischen Edelstählen liegt die Temperatur für das Lösungsglühen bei etwa 1.050 °C. Wegen der Gefahr der Chromkarbidbildung, die vorzugsweise im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 800 °C abläuft, und der damit verbundenen Beeinträchtigung gegenüber interkristalliner Korrosion muss der Temperaturbereich zwischen 900 °C und 500 °C schnell durchfahren werden. Fertig bearbeitete Vakuumbauteile können unter Vakuum im Temperaturbereich von 950 °C bis 1.100 °C geglüht werden. Dabei werden die Oberflächen insbesondere von restlichen Kohlenwasserstoffen gereinigt (Reinigungsglühen), im Volumen gebundener Wasserstoff gast aus (Wasserstoffarmglühen) und die Magnetisierbarkeit nimmt ab (Entmagnetisierungsglühen). Zudem lösen sich eventuell vorhandene Chromkarbide auf (Lösungsglühen) und durch die Verarbeitung entstandene Spannungen im Werkstoff werden abgebaut (Spannungsarmglühen). Die Wärmebehandlung baut jedoch auch mechanisch vorteilhafte Verfestigungen ab. Bei metallisch gedichteten Flanschen kann das Glühen zu einer unerwünschten Verringerung der Werkstoffhärte im Schneidenbereich führen. Die Schneiden können dann bei der Verwendung von Metalledichtungen umklappen und ihre Funktion einbüßen. Wir empfehlen daher bei Glühbehandlungen den Flaschenwerkstoff 1.4429 ESU. Seine außergewöhnliche Härte gewährleistet ausreichend harte Schneiden.

**Korrosion:** Korrosion hängt von verschiedenen Faktoren ab, sodass Angaben zur Beständigkeit nur einen Richtwertcharakter haben und der allgemeinen Information dienen. Sie sollen die Auswahl des Edelstahls erleichtern, stellen aber keinesfalls eine Garantie dar, da sie nicht ohne weiteres auf die realen Betriebsverhältnisse

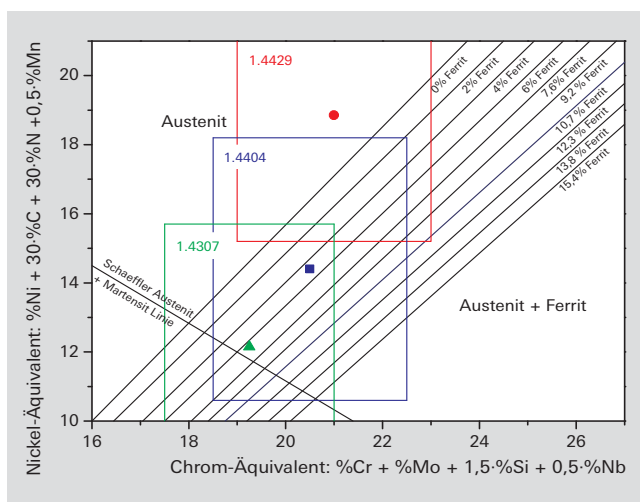


Abbildung 3.3: De Long-Diagramm

anwendbar sind. Korrosionsbeschleunigend wirken sich z. B. Temperatur und Konzentrationserhöhungen, mechanische Belastungen und Beschädigungen der Oberflächen aus. Außerdem verhindert das Nichtvorhandensein von Sauerstoff eine Neubildung der passivierenden Chromoxidschicht, sodass kein Korrosionsschutz besteht. Ferner können Verunreinigungen die Korrosion fördern. In der Praxis sind meist Chlorionen und andere Halogenidionen die Auslöser von Loch-, Spalt- und Spannungsrissskorrosion. Die Passivschicht wird dabei lokal durchbrochen und die Korrosion setzt sich lokal fort. Insbesondere dünnwandige Bauteile wie Metallbälge sind durch diese Korrosionsarten gefährdet. Ihre Standzeit ist gegebenenfalls durch Versuche zu ermitteln. Zudem stellt Kühlwasser eine nicht zu unterschätzende Gefahr für Bauteile dar. Die vom Wasser umflossenen Flächen müssen ausreichend passiviert sein und das Kühlwasser muss die vom Hersteller spezifizierten Eigenschaften aufweisen.

### 3.2.1.2 Normalstahl

Normalstahl wird in der Vakuumtechnik verwendet, solange nicht Drücke von weniger als etwa  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa erzeugt und aufrechterhalten werden müssen und ein Korrosionsschutz nicht erforderlich ist. Es ist im Vergleich zu Edelstahl ein verhältnismäßig kostengünstiges Bau- und Konstruktionsmaterial, gut schweißbar und einfach zu bearbeiten. Bei der Verwendung sind allerdings die ständige Gasabgabe von CO und die Neigung, auch an Luft zu korrodieren, zu beachten. Atmosphärenseitig kann ein Korrosionsschutz durch Lackieren erfolgen, vakuumseitig durch Vernickeln. Für den Behälterbau müssen die verwendeten Stahlgüten sorgfältig ausgewählt werden, insbesondere hinsichtlich der Schweißbarkeit und Dichtheit. Die Arbeitstechniken des Kesselbaus sind nur eingeschränkt auf den Vakuumbehälterbau übertragbar. Bei der Dimensionierung ist die Beanspruchung durch den äußeren Atmosphärendruck zu berücksichtigen und die Schweißarbeiten müssen vakuumgerecht erfolgen. Zudem sind die verwendeten Werkzeuge strikt von denen zu trennen, die für die Edelstahlbearbeitung eingesetzt werden, um den Edelstahl nicht zu verunreinigen. Gleiches gilt für die Lagerung und den Transport von Normalstahl und Edelstahl. Normalstahl wird häufig für die Befestigungselemente von Flanschverbindungen verwendet, wobei die Oberflächen verzinkt, vernickelt oder verchromt werden, um sie vor Korrosion zu schützen.

### 3.2.1.3 Aluminium

Aluminium wird vor allem im Fein- und Hochvakuumbereich meist als Legierung verwendet, in speziellen Fällen auch als Reinaluminium. Bauteile wie z. B. ISO-KF-Rohrbauteile werden vielfach aus Aluminiumgusslegierungen hergestellt, deren Flanschflächen nachgearbeitet werden. Bei der Materialauswahl ist auf Lunkerbildung und Porosität besonders zu achten. Zum Zentrieren und Stützen von Dichtringen werden Bauteile aus Stangenmaterial gefertigt. Als metallische Dichtungen in Form von Profildichtungen oder Drähten, werden bevorzugt weichgeglühte Aluminium-Silizium-Legierungen eingesetzt.

Der Dampfdruck von Aluminium ist gering und beträgt beim Schmelzpunkt von 660 °C nur ca.  $6 \cdot 10^{-9}$  hPa. Die große Wärmeausdehnung, die hohe Wärmeleitfähigkeit

und die stabile Aluminiumoxidschicht erschweren das Schweißen von Aluminium. Hier besteht die Gefahr der Poren- und Rissbildung, verbunden mit einem großen Verzug. Eine gleichmäßige Erwärmung vor dem Schweißen verringert diese Gefahren. Sie ist in der Praxis jedoch häufig nicht möglich.

Aluminium ist nicht magnetisierbar. Für metallisch dichte UHV-Verbindungen, sind Aluminiumflanschverbindungen nur sehr begrenzt einsetzbar, da deren Härte häufig zu gering ist. Es wurden zwar spezielle Bimetallflansche, bestehend aus einer Aluminiumunterlage und Edelstahlauflage oder Aluminiumflansche mit randgehärteten Dichtbereichen entwickelt. Ihr Einsatz scheitert jedoch häufig am relativ hohen Preis, der kritischen Verarbeitbarkeit oder den begrenzten Einsatzmöglichkeiten.

Zur Erhöhung der Abriebfestigkeit, z. B. für den Einsatz in Reinnräumen oder zur Erhöhung des Korrosionsschutzes, werden Aluminiumoberflächen häufig eloxiert. Dabei entsteht eine mehrere  $\mu\text{m}$  starke, poröse Oxidschicht, die nur bedingt für Vakuumanwendungen geeignet ist. In solchen Oberflächen lagern sich vermehrt Gasmoleküle ein und führen zu hohen Desorptionsraten. Zudem können Gasmoleküle den Oberflächenbereich unter Dichtungen untertunneln und damit Leckagen erzeugen. Es stehen diverse Eloxalverfahren zur Verfügung. Bei der Entscheidung, ob und welches Verfahren eingesetzt wird, müssen die Einschränkungen berücksichtigt und mit den Vorteilen abgewogen werden.

## 3.2.2 Dichtungswerkstoffe

### 3.2.2.1 Elastomerdichtungen

Elastomerdichtungen sind prinzipiell gasdurchlässig. Der Gesamtvorgang der Gasdurchdringung wird Permeation genannt und ist abhängig vom Werkstoff, der Gasart und den Umgebungsbedingungen – insbesondere der Temperatur. Zudem gasen Elastomere aus. Bei vakuumtauglichen Elastomeren nimmt die Ausgasrate derart ab, dass nach hinreichend langer Evakuierungszeit die Permeation dominiert und bei unveränderten Umgebungsbedingungen eine konstante Gasrate die Dichtung durchdringt. Permeation und Ausgasung sind diffusionsabhängig. Eine hohe Gasdichtheit bedingt eine langsame Ausgasung, die zu einer langen Zeitdauer führt, bis sich ein konstanter Permeationsgasstrom einstellt. Die Zeitdauer kann durchaus einige hundert Stunden betragen, die jedoch durch Ausheizen stark beschleunigt werden kann. Sind in einem Vakuumssystem keine größeren Gasquellen etwa durch Desorption oder Leckagen vorhanden, können Elastomerdichtungen den erreichbaren Enddruck wesentlich bestimmen. Beispiel: Der Werkstoff FKM (Fluor-Kautschuk) hat eine geringe Gasdurchlässigkeit für Luft. Für eine Dichtung der Nennweite DN 500 ISO-K berechnet sich die Permeationsrate für atmosphärische Luft mit 60 % Luftfeuchtigkeit auf etwa  $4 \cdot 10^{-7}$  Pa · m<sup>3</sup>/s. Bei Vakuumssystemen mit FKM-Dichtungen wird daher selten ein Arbeitsdruck von besser als  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa erreicht.

Elastomerdichtungen sind bei sachgemäßem Einsatz mehrfach verwendbar. Sie benötigen eine Anpresskraft von einigen N/mm<sup>2</sup>, die bei hinreichend großen Nenn-



Kurzbezeichnung	Basiselastomer	Temperaturbereich [°C]	Eigenschaften <sup>1) 2)</sup>
FKM	Fluor-Kautschuk	-15 bis 200	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ der für die meisten Vakuumanwendungen am besten geeignete Dichtungswerkstoff</li> <li>■ geringe Gasdurchlässigkeit</li> <li>■ ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit</li> <li>■ hervorragende Alterungsbeständigkeit</li> <li>■ chemisch beständig gegenüber vielen Chemikalien</li> <li>■ typischer erreichbarer Arbeitsdruck: <math>1 \cdot 10^{-8}</math> hPa</li> </ul>
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	-25 bis 120	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ gute mechanische Eigenschaften, hohe Abriebfestigkeit</li> <li>■ beständig gegen Mineral- und Hydrauliköle, Schmierfette und Benzin</li> <li>■ gute Gasdichtheit</li> <li>■ typischer erreichbarer Arbeitsdruck: <math>1 \cdot 10^{-7}</math> hPa</li> </ul>
CR	Chloropren-Kautschuk	-5 bis 120	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ vergleichbare Eigenschaften wie NBR</li> </ul>
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	-50 bis 130	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hohe Heißwasser- und Dampfbeständigkeit</li> <li>■ sehr gute Alterungs- und Ozonbeständigkeit</li> <li>■ gute Kältebeständigkeit</li> <li>■ sehr gute Beständigkeit gegen oxidierend wirkende Agenzien</li> <li>■ nicht beständig gegen aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe und Mineralölprodukte</li> <li>■ typischer erreichbarer Arbeitsdruck: <math>1 \cdot 10^{-7}</math> hPa</li> </ul>
VMQ	Silikon-Kautschuk	-55 bis 200	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hervorragenden Temperaturbeständigkeit, allerdings nicht bei Heißwasser oder Dampf übertragbar</li> <li>■ gute Kältebeständigkeit</li> <li>■ relativ hohe Gasdurchlässigkeit</li> <li>■ typischer erreichbarer Arbeitsdruck: <math>1 \cdot 10^{-6}</math> hPa</li> </ul>

<sup>1)</sup> Die Angaben zur Beständigkeit haben nur einen Richtwertcharakter, der der allgemeinen Information dient. Sie sollen die Auswahl des Elastomers erleichtern, stellen aber keinesfalls eine Garantie dar, da sie nicht ohne weiteres auf die realen Betriebsverhältnisse anwendbar sind.

<sup>2)</sup> Die aufgeführten Arbeitsdrücke sind Erfahrungswerte, wie sie in einem gut ausgelegten Vakuumsystem erreicht werden können. Im Einzelfall können sie sowohl überschritten als auch unterschritten werden.

**Tabelle 3.4:** Eigenschaften von Elastomerwerkstoffen

weiten für O-Ring-Dichtungen bereits durch den atmosphärischen Luftdruck auf den Flansch übertroffen wird. Elastomerdichtungen können bei ungünstigen Lagerbedingungen oder unsachgemäßer Behandlung ihre Eigenschaften ändern. Zu vermeidende Einflussgrößen sind UV-Strahlung, Sauerstoff, Ozon, Wärme, Feuchtigkeit, Lösungsmittel oder zu große Verformungen. Damit ihre Eigenschaften möglichst erhalten bleiben, empfehlen wir folgende Umgebungsbedingungen bei der Lagerung:

- Temperaturbereich: 5 bis 25 °C
- Temperaturschwankungen vermeiden
- Luftfeuchtigkeit: ca. 65 %
- Lagerort dunkel oder in lichtdichten Behältern
- Chemikalienfreie Atmosphäre

Im Einsatz büßen sie ihre Elastizität teilweise durch zyklische Belastungen, lange Standzeiten im verformten Zustand, hohe Temperaturen oder Alterung ein. Nach zu langem Einsatz werden sie sogar brüchig. Elastomerdichtungen müssen daher regelmäßig getauscht werden. Da die Betriebsbedingungen sehr vielfältig sind, kann keine allgemeine Aussage zur Haltbarkeit getroffen werden. Liegen keine Erfahrungswerte für die verwendeten Elastomere unter den jeweiligen Prozessbedingungen vor, muss ihre Standzeit gegebenenfalls durch Versuche ermittelt werden.

### 3.2.2.2 Metalldichtungen

In Anwendungen bei hohen oder tiefen Temperaturen, sehr langen Standzeiten, einer hohen Strahlenbelastung und überall dort, wo es auf sehr niedrige Permeationsraten ankommt, müssen anstelle der Elastomerdichtungen Metalldichtungen eingesetzt werden. Materialien,

die bei Metalldichtungen häufig zum Einsatz kommen, sind Kupfer und Aluminium, vereinzelt auch Silber und Gold und vorzugsweise Indium in der Kryotechnik. Während Gold, Silber und Indium meist als Drahtdichtungen ausgeführt sind, wird Aluminium neben der Drahtform auch als Profildichtung verwendet. Zudem gibt es federelastische, metallisch ummantelte Dichtungen.

Metalldichtungen benötigen hohe Anpresskräfte. Sie werden bei der Montage plastisch verformt und sind daher nur einmalig verwendbar. Ihre Härte muss geringer sein als die der Flansche, sodass sie sich an deren Mikrostruktur anpassen und eine metallische ultrahochvakuumdichte Verbindung entsteht. Die Schrauben oder Befestigungselemente sind so zu dimensionieren, dass die spezifischen Anpresskräfte von bis zu 600 N/mm Dichtungslänge in jedem Betriebszustand eingehalten werden.

Für ISO-KF- und ISO-K/ISO-F-Flansche aus Edelstahl stehen Metalldichtungen mit Rautenquerschnitt (Spitzkantdichtungen) zur Verfügung. Verwendet werden Aluminium-Silizium-Legierungen, die weichgeglüht werden und eine Anpresskraft von ca. 100 N/mm Dichtungslänge benötigen. Die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Aluminium und Edelstahl begrenzt die maximal zulässige Einsatztemperatur auf etwa 150 °C. Nach zu hohen Temperaturen kann beim Abkühlen eine Verschlechterung der Dichtwirkung auftreten.

Kupfer hat in etwa die gleiche thermische Ausdehnung wie austenitischer Edelstahl. Kupferdichtungen werden als Flachdichtungen (CF-Flansche) oder Drahtdichtungen

(COF-Flansche) eingesetzt. Die Ausführung muss sauerstofffrei sein, d. h., es wird Kupfer der Güte OF (Oxygen Free) oder OFHC (Oxygen Free High Conductivity) verwendet. Wird kein sauerstofffreies Kupfer verwendet, kann bei Wärmebehandlungen (z. B. beim Ausheizen) der vorhandene Sauerstoff mit Wasserstoff reagieren. Dies führt zur sogenannten „Wasserstoffkrankheit“, bei der das entstehende Wasser zu Leckagen führen kann, indem es das Gefüge sprengt. Kupferflachdichtungen für CF-Flansche benötigen eine Anpresskraft von mindestens 200 N/mm Dichtungslänge. Ihre maximal zulässige Einsatztemperatur an Luft beträgt 200 °C. Durch eine Silberbeschichtung erhöht sie sich auf maximal 450 °C. Weichgeglühte Kupferdichtungen benötigen eine geringere Anpresskraft. Sie sollten insbesondere bei Schaugläsern verwendet werden, um die Spannungen bei der Montage so gering wie möglich zu halten.

Werkstoff	Anpresskraft/Länge [N/mm] <sup>1)</sup>	Maximale Temperatur [°C] <sup>1)</sup>
FKM	2 – 10	200
Aluminium	30 – 200	150
Kupfer	150 – 600	450
Indium	ca. 7	100
Gold	100 – 500	800

<sup>1)</sup> Die Angaben haben nur einen Richtwertcharakter, der der allgemeinen Information dient. Je nach Einsatzbedingungen und Ausführung der Dichtung, können die Werte insbesondere bei außergewöhnlichen Anwendungen abweichen.

**Tabelle 3.5:** Vergleich von Dichtungsmaterialien

## 3.3 Verbindungen

### 3.3.1 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. Verbindungen von Metall und Glas durch Verschmelzung bzw. Metallisierung und Verschmelzung oder durch Löten werden für UHV-taugliche, ausheizbare Schaugläser verwendet. Verbindungen von Metall und Keramik, die durch Metallisierung bzw. Sinterung hergestellt werden, sind z. B. bei Vakuumstromdurchführungen üblich.

#### 3.3.1.1 Schweißen

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 Lunken 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 zu vermeiden – sogenannte latente oder virtuelle Leckagen. 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 Luft einschließen kommt.

Das Schweißen von Vakuumbauteilen und Kammern erfordert besonderes Wissen und die fachliche Qualifikation des Schweißpersonals. Üblicherweise dokumentiert ein Schweißfachbetrieb dies mit regelmäßigen Prüfungen seiner Schweißer durch unabhängige Prüfinstitute. Zudem sollten Verfahrensprüfungen für die jeweils verschweißten Werkstoffe und die Nahtgeometrie durchgeführt werden. Speziell ausgebildetes Schweißfachpersonal, z.B. Schweißfachingenieure oder -techniker, begleiten und bewerten die Schweißarbeiten.

Die Werkstoffe können durch die Schweißwärme und das verhältnismäßig schnelle Abkühlen ihre Eigenschaften ändern. Beispielsweise können Änderungen am Gefüge beim Schweißen austenitischer Edelstähle die Magnetisierbarkeit erhöhen oder Poren und Heißrisse beim Schweißen von Aluminium auftreten (hierzu wurde bereits im Kapitel 3.2.1.1 „Edelstahl“ bzw. 3.2.1.3 „Aluminium“ berichtet). Außerdem führen hohe Eigenspannungen im Bereich der Schweißnähte zum Verzug der Bauteile, der möglichst gering zu halten ist. Sind Funktionsflächen wie Dichtflächen betroffen, muss eine Nacharbeit erfolgen. Ist dies nicht möglich, kann das zum Verlust des gesamten Werkstücks führen. Dem gegenüber stehen diverse schweißtechnische Maßnahmen, wie die Auswahl eines geeigneten Schweißverfahrens in Verbindung mit einer geeigneten Nahtgeometrie und Schweißreihenfolge, die Schweißvorbereitung und Nachbehandlung und nicht zuletzt die Qualifikation und Erfahrung der Schweißer.

In der Vakuumtechnik kommt häufig das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) zum Einsatz. Zudem werden weitere Metallschutzgasschweißarten und spezielle Verfahren, wie das Mikroplasmenschweißen für dünnwandige Bauteile oder das Orbitalschweißen für Rohrbauteile verwendet. Maschinell deutlich aufwendigere Verfahren sind das Laserstrahlschweißen und Elektronenstrahlschweißen. Beide sind sowohl für filigrane Bauteile als auch für tiefe Schweißnähte geeignet. Zum Schweißen von großen Ventilgehäusen aus Aluminium kommt auch das Rührreibschweißen zum Einsatz, ein maschinell aufwendiges Verfahren mit geringem Schweißverzug.

Das **Wolfram-Inertgasschweißen** (WIG) benötigt keine abschmelzende Elektrode, die Fügeile können direkt

ohne Zusatzwerkstoffe verschweißt werden. Müssen z. B. aus Stabilitätsgründen Zusatzschweißnähte gezogen werden, können Schweißzusätze eingesetzt werden. Weitere Vorteile des Verfahrens sind praktisch keine Schweißspritzer, keine Schlackenbildung und die Vielseitigkeit: Edelstahl, Aluminium und auch Kupfer lassen sich WIG-schweißen. Das WIG-Verfahren wird bevorzugt, wenn eine hohe Schweißnahtgüte gegenüber der Schweißgeschwindigkeit gewünscht wird.

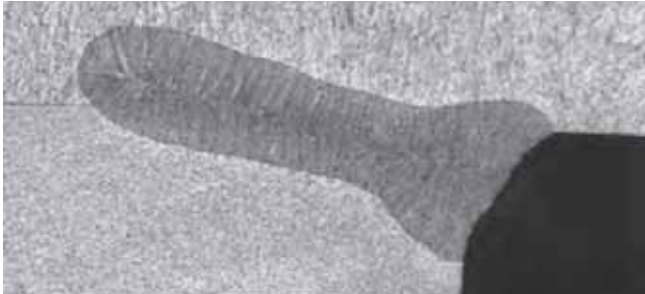


Abbildung 3.4: Schliffbild einer Laserschweißnaht

**Laserstrahlschweißen** oder kurz Laserschweißen, zeichnet sich durch eine hohe Schweißgeschwindigkeit und einen geringen thermischen Verzug aus. Der hohe konzentrierte Energieeintrag des Lasers führt zu einer engen Schweißzone und begrenzt den Bereich der Wärmezone. Über die Einstellung der Fokusbreite und der Laserintensität lassen sich sowohl dünne Folien, als auch tiefe und schlanke Schweißnähte für tragende Konstruktionen erzeugen. So lassen sich Kammerbauteile ohne zusätzliche Schweißnähte ausführen oder Anschweißflanschringe tief mit Rohrenden verschweißen, ohne dass eine aufwendige Nacharbeit der Dichtflächengeometrie erforderlich ist. Größere Spaltbreiten an den Fügestellen lassen sich nur begrenzt überbrücken. Hier werden teilweise Zusatzwerkstoffe verwendet. Ein Nachteil sind die hohen Anlagekosten.

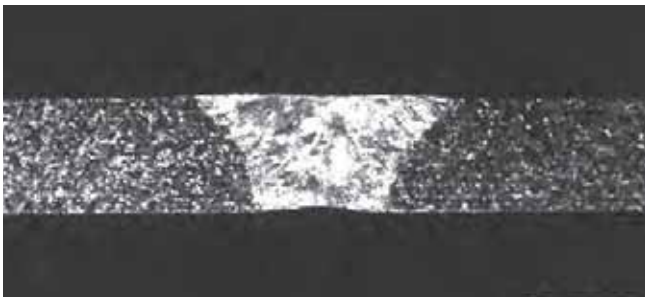


Abbildung 3.5: Schliffbild einer WIG-Orbital-Schweißnaht

Das **Orbitalschweißen** ist ein vollmechanisches Schutzgas-Schweißverfahren, das gleichbleibend hohe Nahtqualitäten liefert, indem der Lichtbogen maschinell unter kontrollierten Bedingungen um Rohre oder Rundkörper geführt wird. Der Anlageaufwand ist höher als beim WIG-Schweißen. Eine Orbitalschweißzange deckt nur einen begrenzten Bereich von Rohrdurchmessern ab. Jeder Rohraußendurchmesser benötigt zudem eine passende Vorrichtung für die Halterung des Rohres.

Beim **Elektronenstrahlschweißen** liefern beschleunigte, fokussierte Elektronen die benötigte Energie in der Schweißzone. Um die Streuung und Absorption der Elektronen zu vermeiden, erfolgt der Prozess im Hoch-

vakuum. Dadurch ist es zudem möglich, auch hochreaktive Werkstoffe zu verschweißen. Der hohe Anlagenpreis und die Schweißvorbereitung mit eventuell notwendigem Vorrichtungsbau, führen üblicherweise zu hohen Preisen für das Verfahren und begrenzen dessen Einsatz im Wesentlichen auf Serienbauteile.

Nach dem Schweißen von austenitischem Edelstahl muss wieder eine metallisch blanke Oberfläche vorliegen, damit sich eine gleichmäßige Chromoxid-Passivschicht ohne Unterbrechungen ausbildet. Beispielsweise verhindert eine Schutzgasabdeckung (auch für die Wurzelunterseite) bei Temperaturen über 600 °C das Verzundern der Oberfläche. Durch eine mechanische oder chemische Nachbehandlung mit anschließendem gründlichem Spülen werden Anlauffarben auf der Oberfläche entfernt und das Bauteil gereinigt.

### 3.3.1.2 Löten, Verschmelzen und Metallisieren

Neben dem Schweißen setzt man auch das Lötverfahren zum Verbinden von Metallen ein. In der Vakuumentchnik kommen fast ausschließlich Hartlotverbindungen mit Löttemperaturen oberhalb von 600 °C zum Einsatz. Um beim Löten auf stark korrosive Flussmittel 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. Weichlotverbindungen sind für Vakuumanwendungen häufig ungeeignet. Sie sind in der Regel nicht ausheizbar, haben eine geringere mechanische Festigkeit und enthalten häufig neben Zinn, das einen geringen Dampfdruck hat, andere Legierungsbestandteile mit einem hohen Dampfdruck. Analog zur vakuumgerechten Schweißverbindung ergibt sich eine vakuumgerechte Hartlötverbindung, wenn vor allem folgende Forderungen erfüllt sind: sorgfältig gereinigte Oberflächen, sorgfältige Ausbildung des Lötspaltes, Verwendung eines gasfreien Lotes mit niedrigem Dampfdruck, gute Fließ- und Benetzungseigenschaften des Lotes (Spaltfüllung), möglichst gut definierte Schmelzzone des Lotes und geringe Reaktion zwischen Lotmaterial und Grundwerkstoff. Die handelsüblichen Hartlote lassen sich in zwei große Gruppen einteilen: Hartlote auf Edelmetallbasis (meist Silber) und Hartlote auf Nickelbasis. Die auf Edelmetallbasis aufgebauten niedriger schmelzenden Hartlote, sind deutlich teurer als die höher schmelzenden auf Nickelbasis. Man bevorzugt daher Nickelbasislote, wenn dies technisch möglich und eine höhere Verarbeitungstemperatur akzeptabel ist. Die Anordnung der Bauteile zueinander und die Lötspalte dazwischen müssen auf das Lötverfahren abgestimmt werden. Je nach Art des verwendeten Lotes, der Löttemperatur und der Wärmeausdehnung der Bauteile betragen die Lötspalte (bei Zimmertemperatur) typischerweise 0,03 bis 0,1 mm. Die Frage, wann Schweißen und wann Hartlöten anzuwenden ist, lässt sich allgemein und umfassend nur schwer beantworten. Abgesehen von den Fällen, wo Schweißen nicht möglich ist, kann Hartlöten vorteilhaft sein, wenn möglichst viele Verbindungsstellen gleichzeitig in einer Charge hergestellt werden können.

Das Verfahren des Verschmelzens bietet sich vor allem für 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. Beim Verschmelzen von Glas-Metall-Übergängen müssen die Materialien so ausgewählt werden, dass deren Wärmeausdehnungskoeffizienten über einen weiten Temperaturbereich möglichst gut übereinstimmen. Da dies häufig nicht der Fall ist, wurden für sogenannte nicht angepasste Glas-Metall-Verschmelzungen zahlreiche Speziallegierungen entwickelt. In Form einer Schweißlippe vermittelten sie einen elastischen Kontakt zwischen Glas und Edelstahl bei Schaugläsern. 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.

Für hoch ausheizbare und hoch isolierende Stromdurchführungen setzt man Keramik-Metall-Verbindungen ein. Diese dienen unter anderem zur Herstellung von Hochleistungssenderöhren und Keramikvakuumkammern für Teilchenbeschleuniger der physikalischen Großforschung. Bei Verbindungen mit Keramik, z. B. Aluminiumoxid (92% bis 98%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), werden die 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. Für die Fertigung von Stromdurchführungen wird anschließend eine Nickelschicht aufgebracht, an die eine Metallkappe hart angelötet wird, in der wiederum der Stromleiter eingelötet wird.

### 3.3.2 Lösbare Flanschverbindungen

Die Einzelkomponenten einer Vakuumanlage, z. B. Vakuumkammern, Pumpen, Ventile, Messgeräte usw., werden direkt oder durch Rohrbauteile bzw. elastische Elemente miteinander verbunden. Die lösbaren Schnittstellen zwischen den Bauteilen müssen vakuumdicht sein. Bei der Konstruktion einer Vakuumanlage sollten 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 Flanschbauteile aus Edelstahl, Aluminium und Stahl 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.

Für lösbare Verbindungen werden vom Grobvakuum bis in den Hochvakuumbereich ISO-KF-Flanschverbindungen in den Nennweiten DN 10 bis DN 50 verwendet, für größere Nennweiten von DN 63 bis DN 1000 werden ISO-K- und ISO-F-Flanschverbindungen eingesetzt. Ultrahochvakuumtaugliche lösbare Verbindung, werden in den Nennweiten DN 16 bis DN 400 als CF-Flanschverbindungen ausgeführt respektive für größere Nennweiten von DN 400 bis DN 800 als COF-Flansche.

#### 3.3.2.1 O-Ring-Dichtungen und Nuten

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

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 A. Die Einheit Shore A wird für weiche Elastomere als Kennzahl für die Verformbarkeit verwendet. Je höher die Kennzahl, desto geringer ist die Verformung bei gleicher Krafteinwirkung. Die Eignung von O-Ringen 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, ohne Risse oder Kratzer sein. Die Ringe sollen nahtlos gepresst sein, die Teilfuge des Presswerkzeuges soll in der Ebene des Ringdurchmessers liegen und durch Schleifen entfernt werden.

Je nach Anwendung kann der O-Ring mit dem dünnen Film eines Fettes mit niedrigem Dampfdruck (Silikonfett, Fett auf Mineralölbasis oder auf Basis von Perfluorpolyether) überzogen werden. Das Vakuumfett gleicht kleine Unebenheiten in den Dichtflächen und der Oberfläche des O-Rings aus und verbessert dadurch insbesondere bei geringen Verformungsgraden die Dichtwirkung. Dabei muss der Dampfdruck des Fettes beachtet werden, der stark mit der Temperatur ansteigt und deutlich unterhalb des angestrebten Arbeitsdrucks liegen sollte. Zudem ist zu prüfen, ob Bestandteile des Fettes oder geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen mit der Anwendung verträglich sind. Bei trockenem Einbau müssen die Oberflächengüte und die Sauberkeit von Dichtflächen und Dichtungsmaterial besondere Beachtung finden. Zudem sollte der Verformungsgrad nicht zu klein gewählt werden, um einen guten Kontakt zwischen O-Ring und Dichtflächen zu gewährleisten.

Der Schnurdurchmesser der O-Ringe beträgt üblicherweise 2 bis 12 mm. Bei vielen Verbindungen beträgt er 5 mm bzw. 5,33 mm im Bereich der zölligen Abmessungen. 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, oder alternativ Gleitringdichtungen bzw. Radialwellendichtringe.

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 üblicherweise die Kombination glatter Flansch und Flansch mit Nut verwendet wird. Die Dimensionierung der Nuten muss sorgfältig erfolgen. Allgemein gültige Abmessungen gibt es hierfür nicht. Die in Tabellen von O-Ring-Lieferanten aufgeführten Abmessungen sind lediglich Richtwerte und dienen der Orientierung. Sie müssen vom Nutzer auf die jeweils



konkrete Anwendung und Eignung geprüft werden (z. B. durch Versuche). Durch äußere Einflüsse, wie Temperatur, Druck oder Reaktionen mit den verwendeten Fluiden, können Elastomere quellen, schrumpfen, verhärten oder gar rissig werden. Bei der Auswahl des Elastomers und der Auslegung der Nut ist dies zu berücksichtigen. Zudem muss in jedem Betriebszustand die Dichtwirkung ausreichend sein und gewährleistet werden, dass der O-Ring nicht zu stark gepresst wird. Wird durch eine Volumenvergrößerung des O-Rings die Nut überfüllt, kann es zur Beschädigung des O-Rings oder sogar zur Verbiegung der Flanschflächen kommen.

Bei statischer Abdichtung sollte die maximale Verpressung für eine Schnurstärke von 5 mm ca. 25 % betragen. Kleinere Durchmesser dürfen etwas mehr, größere etwas weniger verpresst werden. Eine Verpressung unter 15 % kann in der Praxis, insbesondere bei trockenem Einbau, eine unzureichende Dichtwirkung verursachen. Die Verformungskraft wird im Wesentlichen durch die Schnurstärke und die Härte des Elastomers bestimmt. Um einen O-Ring der Stärke 5,33 mm um 20 % zu verpressen, werden bei einer Härte des Elastomers von 70 Shore A ca. 5 N je mm Dichtlänge benötigt, bei einer Härte von 80 Shore A ca. 7 N/mm.

Zur Erleichterung der Montage wird der Durchmesser der Ringnut meist etwas größer gewählt als der des O-Rings. So bleibt der O-Ring auch während der Montage in der Nut. In der Länge können Elastomerringe unbedenklich um 5 % gedehnt werden. Die maximale Dehnung ist abhängig vom Werkstoff und den Betriebsbedingungen.

Elastomerdichtungen mit trapezförmigen oder ähnlichen Querschnitten werden z. B. bei Ventilsitzen oder auch bei Deckeln und Türen von Vakuumkammern verwendet. Die Trapezöffnung ist so zu dimensionieren, dass der O-Ring einerseits beim Einlegen nicht beschädigt wird und andererseits beim Abheben des Ventiltellers bzw. beim Öffnen der Kammertür nicht herausgezogen wird. Zudem muss bei großen Anpresskräften, wie sie z. B. bei großen Kammertüren auftreten, die Trapeznut ausreichend Platz für den verformten O-Ring bieten, sodass dessen Deformation in Grenzen gehalten wird.

Zum Abdichten von Schrauben, z. B. von Ölablassschrauben, wird der O-Ring in Ecklage eingebaut. Das Gewinde hat am oberen Ende eine Fasse von 45°, in die der O-Ring eingelegt und dann durch die Fläche der Schraube zusammengepresst wird. Die Dichtung sollte geschmiert sein, damit er beim Festziehen nicht beschädigt wird. Zudem muss der Einbauraum größer als das Volumen des O-Rings sein.

Flachdichtungen in Kombination mit planen Dichtflächen, sind in der Vakuumtechnik möglichst zu vermeiden. Hier wird eine schwer zu erreichende hohe Anpresskraft benötigt, damit das Dichtungsmaterial alle Unebenheiten der Oberfläche ausfüllt. Wenn Flachdichtungen verwendet werden, geschieht dies üblicherweise mit umlaufend lokal erhabenen Dichtflächen, z. B. bei der Kombination CF-Flansch mit FKM-Flachdichtung.

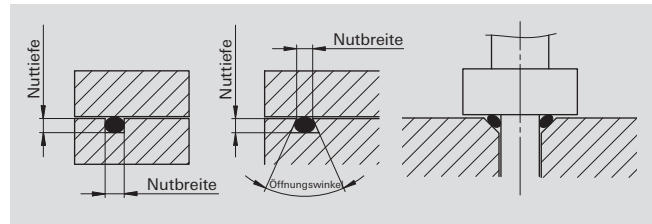


Abbildung 3.6: O-Ring Dichtungen in Rechtecknut, Trapeznut und in Ecklage

### 3.3.2.2 ISO-KF-Flansche

**ISO-KF-Kleinflanschbauteile** werden in der DIN 28403 und ISO 2861 in den Nennweiten DN 10 bis DN 50 beschrieben. Die Verbindungen sind für Drücke bis  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa geeignet und können auch für Überdrücke bis zu 1.500 hPa verwendet werden. Mit Metaldichtungen kann der Druckbereich auf kleiner  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa erweitert werden. Die hierfür benötigten deutlich höheren Anpresskräfte werden mit speziellen Spannrings für Metaldichtungen erzeugt.

Eine ISO-KF-Verbindung besteht aus zwei symmetrischen Flanschen und einer O-Ring-Dichtung, die mit einem Innen- oder Außenzentrierring positioniert und gestützt wird (Abbildung 3.7). Die zur Abdichtung notwendige Anpresskraft wird mit einem Spannring erzeugt, der über die konischen Anzugsflächen gelegt und mit einer Flügelschraube angezogen wird. Somit ist ein schnelles, rationelles Montieren und Demontieren ohne Werkzeuge möglich. Die Flansche können um ihre Hauptachse beliebig ausgerichtet werden.

Für die Montage eines Kleinflansches auf einer Grundplatte werden Pratzen (Abbildung 3.8) oder Überwurf-Halbschalen als Spannelemente verwendet. Die Abmessungen für die Bohrungen in der Grundplatte finden Sie bei den Produktbeschreibungen der Pratzen und Überwurf-Halbschalen.



Abbildung 3.7: ISO-KF-Verbindung mit Zentrierring und Spanning

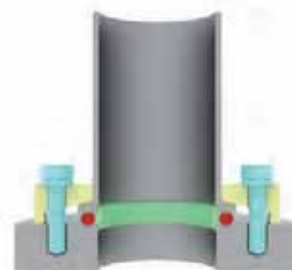


Abbildung 3.8: ISO-KF-Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrierring und Pratzen

### 3.3.2.3 ISO-K/ISO-F-Flansche

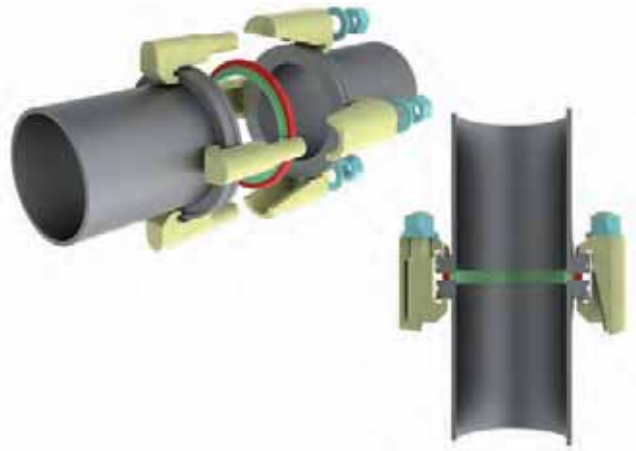
**ISO-K-Klammerflanschbauteile** und **ISO-F-Festflanschbauteile** werden in der DIN 28404 und ISO 1609 in den Nennweiten DN 10 bis DN 630 für ISO-K Flansche und bis DN 1000 für ISO-F Flansche beschrieben. Die Verbindungen sind für Drücke bis  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa geeignet und können auch für Überdrücke bis zu 1.500 hPa verwendet werden. Mit Metalldichtungen kann der Druckbereich auf kleiner  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa erweitert werden. Metalldichtungen benötigen deutlich höhere Anpresskräfte. Verschraubte Flanschverbindungen bringen diese auf. Werden Klammerschrauben verwendet, ist ihre Anzahl gegebenenfalls zu erhöhen.

Eine ISO-K- bzw. ISO-F-Verbindung besteht aus zwei symmetrischen Flanschen und einer O-Ring-Dichtung, die mit einem Innenzentrirring positioniert und gestützt und durch einen Außenring unterstützt wird. Die zur Abdichtung notwendige Anpresskraft wird mit Klammerschrauben (Abbildung 3.9) bzw. Schrauben erzeugt (Abbildung 3.13).

Beim ISO-K-Flansch verhindert ein umlaufender äußerer Steg an den Flanschrückseiten das Abrutschen der Klammerschrauben. Die Flansche können um die Hauptachse beliebig ausgerichtet werden. Für die Montage eines ISO-K-Flansches auf einer Grundplatte werden Pratten verwendet. Je nachdem, ob ein Zentrirring auf der Grundplatte aufliegt (Abbildung 3.10) oder ein O-Ring in der Grundplatte liegt (Abbildung 3.11), werden Pratten unterschiedlicher Bauhöhe verwendet. Alternativ kann auch der ISO-K-Flansch mit einem Überwurfflansch an die Grundplatte geschraubt werden (Abbildung 3.12).

Der ISO-F-Flansch hat einen von der Nennweite abhängigen festen Schraubenlochkreis. Die Flansche können jeweils um eine Lochstellung um die Hauptachse ausgerichtet werden. Ein ISO-F Flansch kann an einer Grundplatte verschraubt werden. Als Dichtung kann ein Zentrirring verwendet werden oder ein O-Ring mit Dichtungsnut in der Grundplatte.

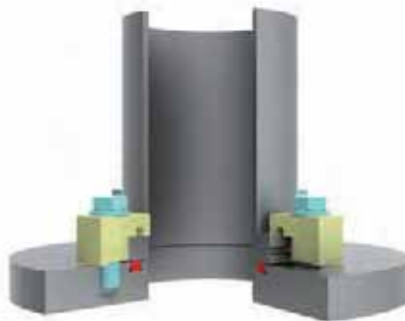
Die Montage eines ISO-K-Flansches an einen ISO-F-Flansch kann mithilfe eines Überwurfflansches erfolgen (Abbildung 3.14). Zum Einbau wird der Überwurfflansch über den ISO-K-Flansch geschoben und anschließend ein Sprengring in die äußere umlaufende Nut des ISO-K-Flansches gelegt. Die Flansche können um die Hauptachse beliebig ausgerichtet werden.



**Abbildung 3.9:** ISO-K-Verbindung mit Zentrirring und Klammerschrauben



**Abbildung 3.10:** ISO-K-Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrirring und Pratten



**Abbildung 3.11:** ISO-K-Flansch montiert auf Grundplatte mit O-Ring-Nut und Pratten für Grundplatte mit Dichtnut



**Abbildung 3.12:** ISO-K-Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrirring, Überwurfflansch und Schrauben

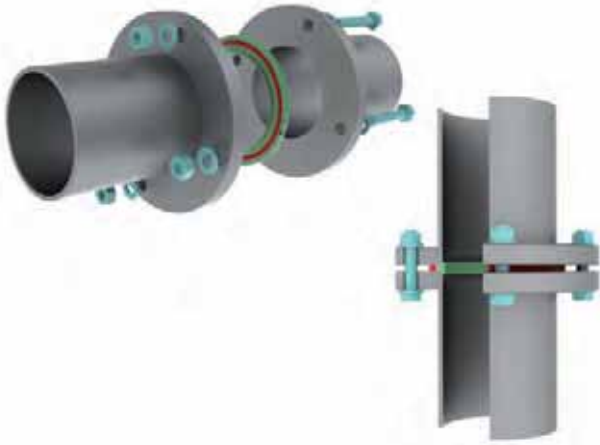


Abbildung 3.13: ISO-F-Verbindung mit Zentrierung und Schrauben



Abbildung 3.14: ISO-K-Flansch mit Überwurfflansch montiert an ISO-K-Flansch mit Zentrierung und Schrauben

### 3.3.2.4 CF-Flansche

**CF-Flansche** werden in der ISO 3669 in den Nennweiten DN 16 bis DN 250 und detaillierter in der ISO/TS 3669-2 in den Nennweiten DN 10 bis DN 400 beschrieben. Neben diesen Standards sind weitere Varianten von Herstellern oder Anwendern im Vakuummarkt vertreten. Für Nennweiten bis DN 250 sind sie häufig miteinander kombinierbar. Die größeren Nennweiten sind weniger gebräuchlich und weichen zum Teil erheblich voneinander ab. Bei Zweifeln an der Kompatibilität sollten die Abmessungen untereinander verglichen werden.

CF-Flansche wurden für UHV-Anwendungen entwickelt, sind ausheizbar bis 450 °C und für Drücke kleiner  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa geeignet. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Werkstoffe. CF-Flansche werden fast ausschließlich aus Edelstahl gefertigt, üblicherweise aus solchen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt. Für viele Anwendungen ist der Werkstoff 1.4307 ausreichend. Bei höheren Anforderungen, z. B. an die Festigkeit oder eine möglichst geringe Magnetisierbarkeit, empfiehlt sich der Premiumedelstahl 1.4429 ESU. Für den Einsatz an Aluminiumkammern wurden spezielle Bimetallflansche entwickelt, bestehend aus einer Aluminiumunterlage und einer Edelstahlaufgabe oder Aluminiumflansche werden mit randgehärteten Dichtbereichen ausgestattet. In der Praxis scheitert ihr Einsatz jedoch häufig am relativ hohen Preis, der kritischen Verarbeitbarkeit oder der begrenzten Ausheizbarkeit.

Eine CF-Verbindung besteht aus zwei symmetrischen Flanschen mit Schneidkanten, einer metallischen Flachdichtung, die in einem flachen Einstich zentriert wird, und einer ausreichenden Anzahl von Schrauben, die für den notwendigen hohen Anpressdruck sorgen (Abbildung 3.15). Eine radiale Ausparung am Flansch dient einerseits zum Lösen der Flanschverbindung, andererseits ist sie bei der Lecksuche hilfreich, da das Helium direkt an die Dichtfläche gesprüht werden kann. Neben Festflanschen, die jeweils um eine Lochstellung auszurichten sind, gibt es die Ausführung mit drehbarem Überwurfflansch, sodass die Flansche um ihre Hauptachse beliebig ausgerichtet werden können.

Als Dichtungswerkstoff wird normalerweise sauerstofffreies OFHC-(Oxygen Free High Conductivity-)Kupfer verwendet, für Temperaturen oberhalb 200 °C in einer versilberten Ausführung. Bei der Montage werden die Schneidkanten der Flansche in die eingeschlossene Dichtscheibe gedrückt. An den äußeren Schneidflanken findet ein Fließpressen statt, an den inneren gleichzeitig ein Schneidvorgang. Das Kaltfließen wird durch die äußeren vertikalen Flanschwände begrenzt, sodass sehr hohe Drücke in der Grenzschicht entstehen. Unter dem hohen Druck passt sich das Kupfer der Mikrostruktur der Schneidflanken an und füllt kleinere Oberflächendefekte aus, wodurch eine metallische, ultrahochvakuumdichte Verbindung hergestellt wird. Einmal benutzte Kupferdichtungen können nicht wiederverwendet werden. Für Drücke bis etwa  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa können auch mehrfach verwendbare Dichtungen aus FKM eingesetzt werden.

Bei der Montage werden die Schrauben zunächst gleichmäßig diametral angezogen, um jegliche Verspannungen zu vermeiden. Anschließend sollten die Schrauben der Reihe nach in mehreren Durchgängen schrittweise angezogen werden, bis das Kupfer ultrahochvakuumdicht mit den Dichtflächen verbunden ist. Beim Ausheizen sollte das Aufheizen und Abkühlen gleichmäßig und nicht zu schnell erfolgen. Temperaturunterschiede an der Flanschverbindung führen zu Spannungen, die Bauteile wie z. B. Glaselemente beschädigen oder Leckagen erzeugen können.

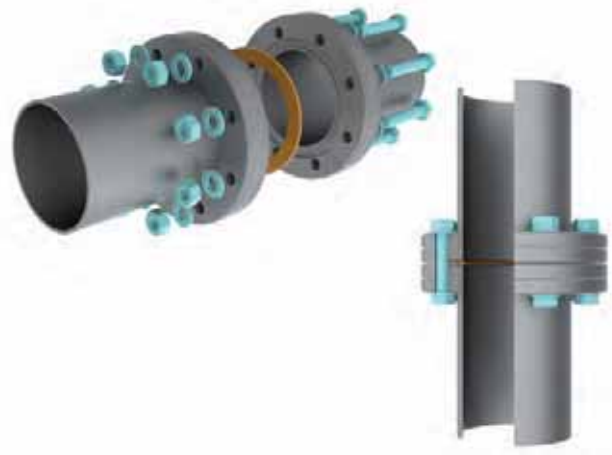


Abbildung 3.15: CF-Verbindung mit Kupferflachdichtung und Schrauben

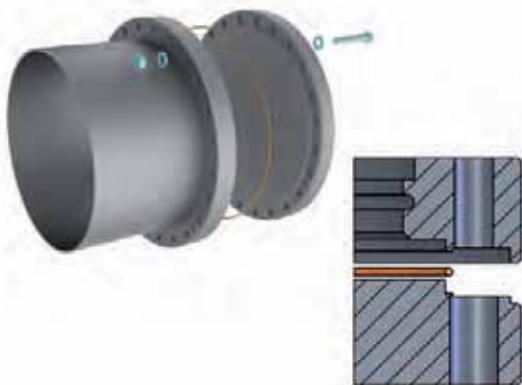
### 3.3.2.5 COF-Flansche

**COF-Flansche** werden bei großen Nennweiten für ultrahochvakuumtaugliche Verbindungen verwendet. Sie sind ausheizbar, für Drücke bis etwa  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa geeignet und nicht genormt, sodass bei der Kombination von Flanschen verschiedener Hersteller die Kompatibilität geprüft werden muss. Üblicherweise werden sie aus Edelstählen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt gefertigt, wenn möglich als geschmiedete Qualität.

Eine COF-Verbindung besteht aus einem Flanschpaar mit unterschiedlichen „male“- und „female“-Profilen, einer Drahtdichtung und einer ausreichenden Anzahl von Schrauben, die für den notwendigen hohen Anpressdruck sorgen (Abbildung 3.16). Die Flansche können jeweils um eine Lochstellung um die Hauptachse ausgerichtet werden. Als Dichtungswerkstoff wird gewöhnlich ein verschweißter Drahttring aus sauerstofffreiem OF(Oxygen Free-)Kupfer verwendet.

Bei der Montage wird die Dichtung stramm auf die Schneidflanke der „male“-Seite eingesetzt. Die Dichtflächen der beiden Profile schließen den Kupferring ein. An den Schneidflanken findet ein Fließpressen statt. Das Kaltfließen wird durch die vertikale innere Wand des „male“-Flansches begrenzt, sodass sehr hohe Drücke in der Grenzschicht entstehen. Unter dem hohen Druck passt sich das Kupfer der Mikrostruktur der Schneidflanken an und füllt kleinere Oberflächendefekte aus, wodurch eine metallische ultrahochvakuumdichte Verbindung hergestellt wird. Einmal benutzte Kupferdrähte können nicht wiederverwendet werden. Für Drücke bis etwa  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa können auch Dichtungen aus FKM eingesetzt werden. Sie sind üblicherweise nicht wiederverwendbar, erlauben jedoch eine schnellere Montage, etwa wenn die Flansche häufig montiert werden, z. B. beim Einfahren der Anlage.

Wichtig bei der Montage ist, dass die Schrauben zunächst gleichmäßig diametral angezogen werden, um jegliche Verspannungen zu vermeiden. Anschließend sollten die Schrauben der Reihe nach in mehreren Durchgängen schrittweise angezogen werden, bis das Kupfer ultrahochvakuumdicht mit den Dichtflächen verbunden ist. Beim Ausheizen ist darauf zu achten, dass das Aufheizen und Abkühlen gleichmäßig und nicht zu schnell erfolgt. Temperaturunterschiede an der Flanschverbindung führen zu Spannungen, die Leckagen erzeugen können.



**Abbildung 3.16:** COF-Verbindung mit Kupferdrahtdichtung und Schrauben

### 3.3.2.6 Weitere Flanschstandards

Neben den aufgeführten Vakuumflanschen existieren zahlreiche weitere Flanschstandards, die z. B. in der Industrie und Verfahrenstechnik eingesetzt werden, sich jedoch nicht in dem Maße in der Vakuumtechnik durchsetzen konnten. Häufig sind ihre Oberflächen rau und für Flachdichtungen ausgelegt. Für Anlagen, die sowohl unter Vakuum als auch unter Überdruck betrieben werden, sind Vakuumflansche nur sehr begrenzt einsetzbar. Hier werden z. B. Flansche nach EN 1092-1 eingesetzt. Um derartige Flansche vakuumtauglich zu gestalten, müssen die Dichtflächen nachgearbeitet werden, z. B. ein Flansch mit O-Ring-Nut und ein Flansch mit glatter Dichtfläche gepaart werden. Dabei sind die jeweiligen gesetzlichen Bestimmungen für Druckbehälter oder Rohrleitungen zu beachten.

### 3.3.2.7 Schrauben

Die Bedeutung von Schrauben bei der Auslegung von metallisch gedichteten Verbindungen darf nicht unterschätzt werden. Auch Schrauben haben Einsatzgrenzen, die vor ihrem Bruch liegen. Falsch montierte Schrauben sind potenzielle Gefahrenquellen für Undichtigkeiten, insbesondere bei zyklischen Temperaturbelastungen.

Zwei wichtige mechanische Größen müssen bei der Montage von Schrauben berücksichtigt werden: die Zugfestigkeit  $R_m$ , die beschreibt, ab welcher Zugspannung es zum Bruch der Schraube kommen kann, und die Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , die angibt, ab welcher Spannung trotz steigender Verlängerung der Schraube die Zugkraft das erste Mal gleichbleibt oder geringer wird. Sie stellt den Übergang zwischen elastischem und plastischem Bereich dar. Schrauben sollten nicht mit Spannungen beaufschlagt werden, die höher sind als die 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$ . Als Richtwerte für die Anziehmomente von Schrauben werden daher Werte angegeben, die eine 90%ige Ausnutzung der 0,2%-Dehngrenze berücksichtigen.

Die Zugfestigkeit und die Dehngrenze von **Stahlschrauben** bei Raumtemperatur finden sich in der Bezeichnung ihrer **Festigkeitsklassen**, d. h. einer zweistelligen Zahlenkombination. Die erste Zahl gibt 1/100 [N/mm<sup>2</sup>] der Zugfestigkeit an. Die Multiplikation der beiden Zahlen ergibt 1/10 [N/mm<sup>2</sup>] der Dehngrenze. Beispiel: Festigkeitsklasse 8.8,  $R_m = 8 \cdot 100 \text{ N/mm}^2 = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0,2} = 8 \cdot 8 \cdot 10 \text{ N/mm}^2 = 640 \text{ N/mm}^2$ .

In der Bezeichnung von **Edelstahlschrauben** werden die Werkstoffqualität und die Zugfestigkeit angegeben. Diese sind: A für Austenitisch, 1 bis 5 für den Legierungstyp; sowie die Festigkeitsklasse: -70 für kaltverfestigt oder -80 für hochfest. Die Festigkeitsklasse entspricht 1/10 N/mm<sup>2</sup> der Zugfestigkeit. Beispiel: Bezeichnung A2-70, A2 entspricht Austenitisch, Legierungstyp 2, 70 entspricht  $R_m = 70 \cdot 10 \text{ N/mm}^2 = 700 \text{ N/mm}^2$ .

Die verwendeten **Muttern** sollten mindestens die gleiche Festigkeit wie die Schrauben aufweisen. Bei Stahlmuttern wird eine Kennzahl angegeben, die 1/100 [N/mm<sup>2</sup>] der Prüfspannung entspricht. Beispiel: Kennzahl 8 entspricht  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ . Für Edelstahlschrauben sollte eine Mutter der gleichen oder einer höheren Werkstoffqualität und Festigkeitsklasse verwendet werden.



Achtung: Muttern mit einer niedrigeren Höhe als das 0,8-Fache des Schraubendurchmessers (flache Ausführung) haben eine eingeschränkte Belastbarkeit.

Ausführung der Schraube	0,2 % Dehngrenze $R_{p,0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Werkstoffe
Edelstahl, A2-70	450	700	Edelstahl, 1.4301, 1.4303, 1.4307
Edelstahl, A4-80	600	800	Edelstahl, 1.4401
Stahl, Festigkeitsklasse 8.8	640	800	Kohlenstoffstahl, abgeschreckt und angelassen

**Tabelle 3.6:** Mechanische Kennwerte und Werkstoffe von Schrauben bei Raumtemperatur

Zur Bestimmung des Anziehdrehmoments und der Vorspannkraft ist die Kenntnis des Reibungskoeffizienten  $\mu_{ges}$  der Schraubenverbindung notwendig. Aufgrund der Vielzahl der Oberflächen- und Schmierzustände ist es unmöglich, gesicherte Werte anzugeben. Die Streuung ist zu groß. Aus diesem Grund können lediglich Streubereiche für die Reibungskoeffizienten angegeben werden. Zur Bestimmung des richtigen Drehmomentes ist ein Versuch unter Einsatzbedingungen ratsam.

Durch die Verwendung von Schmiermitteln können die Reibungskoeffizienten verringert werden, der große Streubereich bleibt jedoch erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein kleinerer Reibungskoeffizient zu einem geringeren maximalen Anziehungsmoment führt. Also: **Schmiermitteleinsatz → Reibungskoeffizient  $\mu_{ges}$  sinkt → weniger Anziehungsmoment ist nötig bzw. darf angelegt werden.**

Bei Edelstahlschrauben sind die Reibungswerte im Gewinde und an den Auflageflächen wesentlich größer als bei vergüteten Stahlschrauben. Auch der Streubereich der Reibungswerte ist viel größer (bis über 100 %). Aufgrund des hohen Flankendrucks neigen sie zudem zum Festfressen. Hier hilft in der Regel ein Schmiermittel. Alternativ können versilberte Schrauben oder versilberte Muttern verwendet werden.

Schraube	Mutter	$\mu_{ges}$ ohne Schmierung	$\mu_{ges}$ mit MoS <sub>2</sub> Paste	$\mu_{ges}$ geölt
A2 oder A4	A2 oder A4	0,23 – 0,50	0,10 – 0,20	–
Stahl, galvanisch verzinkt	Stahl, galvanisch verzinkt	0,12 – 0,20	–	0,10 – 0,18

**Tabelle 3.7:** Reibungskoeffizienten für Edelstahl und verzinkte Stahlschrauben

## Eigenschaften von Schrauben bei erhöhten Temperaturen

Beim Einsatz von Schrauben bei höheren Temperaturen muss beachtet werden, dass sich die Zugfestigkeit und die Dehngrenze verringern. Zudem muss die Zeitdehngrenze bzw. Warmfestigkeit als Bemessungsgröße für die mechanische Belastbarkeit berücksichtigt werden. Angaben zur Dehngrenze dienen daher lediglich als Anhaltswerte. Für kritische oder sicherheitsrelevante Anwendungen müssen weitere mechanische Kenngrößen und sämtliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Ausführung der Schraube	0,2%-Dehngrenze $R_{p,0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ] bei				
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
Edelstahl, A2-70	450	380	360	335	315
Edelstahl, A4-80	600	510	480	450	420
Stahl, Festigkeitsklasse 8.8	640	590	540	480	–

**Tabelle 3.8:** Temperaturabhängigkeit der 0,2%-Dehngrenze für Edelstahl- und Stahlschrauben mit Durchmessern ≤ M24

Wird eine Durchsteck-Schraubenverbindung durch Drehen der Mutter angezogen, entsteht eine Zugkraft im Schraubenbolzen und eine gleich große Druckkraft zwischen den Platten. Dadurch wird die Schraube verlängert und das Bauteil zusammengedrückt. Durch die Verlängerung (Streckung) der Schraube entsteht die Vorspannkraft. Die Klemmkraft entsteht durch das Zusammendrücken der Teile und ist ohne weitere Krafteinflüsse auf die Verbindung gleich groß wie die **Vorspannkraft**. Beim Festdrehen der Schraube entsteht Reibung zwischen den Berührungsf lächen. Mit zunehmender Vorspannkraft steigen die Reibungsmomente im Gewinde und in der Mutterauflage. Bei der maximalen Vorspannkraft stellt die Summe der Reibungsmomente den Großteil des Gesamtanziehdrehmoments dar. Bei geschmierten Schrauben (kleinere Reibungskoeffizienten) ist der Reibungsanteil geringer, sodass hier bei gleichem **Anziehdrehmoment** die Schrauben eine höhere Vorspannkraft erzeugen. Dabei ist zu beachten, dass bei geschmierten Schrauben das maximale zulässige Anziehdrehmoment geringer ist als bei nicht geschmierten Schrauben.

Vorspannkraft und Anziehungsmoment bewirken Zug- und Torsionsspannungen in der Schraube. Beide Einflüsse müssen simultan bei der Berechnung der Schraubenbelastung betrachtet werden. Eine Alternative zur Berechnung bieten Tabellen, wie sie in der VDI-Richtlinie 2230 aufgeführt werden. Wird eine 90%ige Ausnutzung der 0,2%-Dehngrenze als zulässig angesehen, lassen sich dort für verschiedenen Reibungskoeffizienten, die zulässige maximalen Anziehdrehmomente und die zugehörigen Vorspannkraft entnehmen. Die Angaben sind jedoch lediglich unverbindliche Richtwerte. Für kritische oder sicherheitsrelevante Anwendungen müssen sämtliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die eine Schraubenberechnung erfordern können. Auszüge aus den Tabellen sind im Folgenden für Edelstahl- und Stahlschrauben aufgeführt.

Abmessung und Qualität	max. Anziehdrehmoment [Nm] für $\mu_{ges} =$					max. Vorspannkraft [kN] für $\mu_{ges} =$				
	0,10	0,14	0,20	0,30	0,40	0,10	0,14	0,20	0,30	0,40
M4, A2-70	1,7	2,2	2,6	3,0	3,3	2,97	2,73	2,40	1,94	1,60
M4, A4-80	2,3	2,9	3,5	4,1	4,4	3,96	3,64	3,20	2,59	2,13
M5, A2-70	3,4	4,2	5,1	6,1	6,6	4,85	4,47	3,93	3,19	2,62
M5, A4-80	4,6	5,6	6,9	8,0	8,8	6,47	5,96	5,24	4,25	3,50
M6, A2-70	5,9	7,4	8,8	10,4	11,3	6,85	6,31	5,54	4,49	3,70
M6, A4-80	8,0	9,9	11,8	13,9	15,0	9,13	8,41	7,39	5,98	4,93
M8, A2-70	14,5	17,8	21,5	25,5	27,6	12,6	11,6	10,2	8,25	6,80
M8, A4-80	19,3	23,8	28,7	33,9	36,8	16,7	15,4	13,6	11,0	9,10
M10, A2-70	30,0	36,0	44,0	51,0	56,0	20,0	18,4	16,2	13,1	10,80
M10, A4-80	39,4	47,8	58,0	69,0	75,0	26,5	24,8	21,7	17,5	14,4
M12, A2-70	50	62	74	88	96	29,1	26,9	23,7	19,2	15,8
M12, A4-80	67	82	100	117	128	38,8	35,9	31,5	25,6	21,1
M16, A2-70	121	150	183	218	237	55,0	50,9	44,9	36,4	30,0
M16, A4-80	161	198	245	291	316	73,3	67,9	59,8	48,6	40,0

Alle Angaben sind unverbindliche Richtwerte für Raumtemperatur – siehe VDI 2230.

Für Sechskantschrauben (ISO 4014 und 4017), Innensechskantschrauben (ISO 4762) und Muttern (ISO 4032) mit Regelgewinde bei einer 90%igen Ausnutzung der 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$ .

**Tabelle 3.9:** Maximales Anziehdrehmoment und maximal resultierende Vorspannkraft für Edelstahlschrauben

Abmessung und Festigkeitsklasse	max. Anziehdrehmoment [Nm]			max. Vorspannkraft [kN] für $\mu_{ges} =$		
	0,10	0,12	0,14	0,10	0,12	0,14
M4, 8.8	2,6	3,0	3,3	4,5	4,4	4,3
M5, 8.8	5,2	5,9	6,5	7,4	7,2	7,0
M6, 8.8	9,0	10,1	11,3	10,4	10,2	9,9
M8, 8.8	21,6	24,6	27,3	19,1	18,8	18,1
M10, 8.8	43	48	54	30,3	29,6	28,8
M12, 8.8	73	84	93	44,1	43,0	41,9
M16, 8.8	180	206	230	82,9	80,9	78,8

Alle Angaben sind unverbindliche Richtwerte für Raumtemperatur – siehe VDI 2230. Für Sechskantschrauben (ISO 4014 und 4017), Innensechskantschrauben (ISO 4762) und Muttern (ISO 4032) mit Regelgewinde bei einer 90%igen Ausnutzung der 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$ .

**Tabelle 3.10:** Maximales Anziehdrehmoment und maximal resultierende Vorspannkraft für Stahlstahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8

Werden Schrauben in Sacklochbohrungen geschraubt, entsteht ein eingeschlossener Hohlraum am Ende der Gewindebohrung. Solche Totvolumen werden unter Vakuum nur sehr langsam entleert und führen zu einer lang anhaltenden Gasabgabe, die sich wie ein Leck äußert. Man spricht daher auch von einem virtuellen Leck. Unter Hochvakuum und insbesondere UHV-Bedingungen sollten derartige Totvolumen konstruktiv vermieden oder – wenn nicht anders möglich – entlüftet werden.

Eine komfortable Art der Entlüftung bieten **Vakuum-schrauben**. Ihr Schraubenkern ist aufgebohrt (Entgasungsbohrung). Zudem befindet sich in der Schraubenkopfaufgabe eine radiale Ausfräsung (Entgasungssenkung), über die der Bereich des Durchgangslochs der Schraubenverbindung entlüftet wird. Die mechanischen Kenngrößen für Schrauben sind nicht auf Vakuumschrauben übertragbar, da die Entlüftungsbohrung zu einer mechanischen Schwächung führt.

### 3.4 Vakuumkammern

Das Herzstück einer Vakuumanlage bildet eine auf die Anwendung zugeschnittene Vakuumkammer. Sie umhüllt die Anwendung und trennt sie zuverlässig vom Außenbereich oder schützt die Umgebung vor den Prozessen im Inneren. Egal ob ein Grobvakuum für Trocknungsprozesse benötigt wird, ein Fein- oder Hochvakuum für Plasmaprozesse oder Ultrahochvakuum für Oberflächenuntersuchungen: - die Vakuumkammer muss stets die Druckdifferenz von einer Atmosphäre mechanisch tragen.

Vakuumbehälter unterliegen innerhalb der Europäischen Union keiner speziellen Richtlinie, auf deren Grundlage eine Auslegung und Berechnung zu erfolgen hat. Sie sind keine Druckgeräte (die Druckgeräterichtlinie 97/23/EG gilt für Bauteile mit einem inneren Überdruck von mehr als 500 hPa) und sie sind keine Maschinen im Sinne der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Dennoch müssen sie sicher und zuverlässig ausgelegt, berechnet, gefertigt und geprüft werden, bevor eine Inbetriebnahme erfolgen kann.

Die Berechnung von Wandstärken für zylindrische Rohre, Kugelkörper, plane Böden oder Formteile wie Klöpperböden kann mithilfe der AD-2000-Merkblätter erfolgen. Das Regelwerk AD 2000 wurde von der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ zwar für die Berechnung von Druckbehältern entworfen, dort wird aber auch der Belastungszustand „äußerer Überdruck“ beschrieben. Hier finden sich z. B. Gleichungen zur Berechnung von erforderlichen Wanddicken, die das „elastische Einbeulen“ oder die „plastische Verformung“ von zylindrischen Rohren berücksichtigen.

Bei Rechteckkammern oder ähnlichen Bauformen müssen die Durchbiegung der Flächen und die auftretenden Spannungen geprüft werden. Sind sie zu groß, müssen Wandstärken erhöht oder die Flächen versteift werden, z. B. mit zusätzlich aufgeschweißten Rippen. Hierbei sind Programme hilfreich, die mechanische Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchführen und zur Optimierung des Kammerdesigns genutzt werden können. Neben der zulässigen mechanischen Beanspruchung ist auch zu prüfen, ob im Lastzustand „außen Atmosphäre, innen Vakuum“ die Dichtflächen zueinander plan bleiben. Verwerfen sich Dichtflächen, können Undichtigkeiten auftreten, die einen Einsatz der Kammer verhindern.



Abbildung 3.17: EUV-Quellenkammer mit Kühlprofilen und wassergekühlten Flanschen

Die Grundform der Kammer folgt häufig aus der Anwendung. Wenn möglich wird ein zylindrisches Rohr als Kammergrundkörper gewählt, das ein Optimum an Materialeinsatz und Stabilität darstellt. Bei kleineren Nennweiten kann ein planer Boden eine Rohrseite verschließen, größere Nennweiten sollten durch gewölbte Böden verschlossen werden, um den Materialeinsatz und die Masse der Kammer in Grenzen zu halten. Beispiel: Bei einem Kammerdurchmesser von 600 mm benötigt ein planer Boden etwa die dreifache Wandstärke wie ein gewölbter Boden. Ein Hauptflansch mit passendem Deckel gewährt den Zugang zur Kammer, ein Türscharnier erhöht den Bedienkomfort. Kammerfüße außen sorgen für einen sicheren Stand, Ringschrauben oder Hebeösen ermöglichen einen sicheren Transport.

Soll die Kammer temperiert werden oder führen innere Wärmequellen zu einer starken Erwärmung der Kammerhülle, wird eine Kammerkühlung aufgebracht. Dies kann durch aufgeschweißte Kühlprofile geschehen oder großflächig als sogenannte Kissenkühlung (Abbildung 3.18) oder gar als doppelwandiger Behälter.



Abbildung 3.18: Weltraumsimulationskammer mit Kissenkühlung

Häufig wird eine Kammer im Dialog zwischen Anwender und Konstrukteur um ein Experiment oder einen Prozess herum entworfen. Eine Alternative zu individuell abgestimmten Kammern sind Standardvakuumkammern. Dies sind vorkonfigurierte Grundkörper, die um frei wählbare Abgänge ergänzt werden. Sie bieten eine schneller lieferbare und kostengünstigere Alternative zu einer komplett individuell gestalteten Vakuumkammer.

#### 3.4.1 Verarbeitung – Oberflächen

Die Themen „Werkstoffauswahl“ und „Schweißen“ wurden bereits in den Kapiteln zuvor behandelt. Die inneren Oberflächen von Vakuumkammern und -bauteilen stellen einen entscheidenden Faktor für das Erreichen des Arbeitsdrucks im Hochvakuum und im UHV dar. Die Bearbeitung muss unter der Maßgabe erfolgen, die effektive Oberfläche zu minimieren und Oberflächen mit möglichst geringen Desorptionsraten zu erzeugen.

Am häufigsten werden Oberflächen von Vakuumkammern und Komponenten nach dem Schweißen und der mechanischen Bearbeitung **glasperlenfeingestrahlt**. Dabei werden mit Hochdruck Glasperlen mit definiertem Durchmesser auf die Oberfläche geblasen. Dichtflächen dürfen nicht gestrahlt werden, sie werden beim Strahlen abgedeckt. Das Verfahren verdichtet die Oberfläche, ebnet sie mikroskopisch ein, trägt oberflächennahe Schichten wie Anlauffarben ab und erzeugt eine dekora-



tive Ansicht. Die zu strahlenden Oberflächen müssen sauber und fettfrei sein, das Strahlgut muss regelmäßig getauscht werden, insbesondere beim Wechsel von Werkstoffgruppen, z. B. bei ferritischen und austenitischen Edelstählen.

**Schleifen** dient zur Beseitigung von Makrorauigkeiten wie einer Walzhaut, Zunder oder Riefen. Es sollte trocken an sauberen, öl- und fettfreien Oberflächen erfolgen, Schleifmittel dürfen nicht in die Oberfläche eingearbeitet werden. Abhängig von der Ausgangsrauigkeit und der abzutragenden Schichtstärke, sollte in mehreren Schritten mit zunehmend feinerem Korn im Kreuzschliff, d. h. wechselnder Schleifrichtung geschliffen werden. Häufig ist Schleifen ein vorbereitender Schritt für nachfolgende Oberflächenbehandlungen wie z. B. Elektropolieren. Schleifen erzeugt einen optisch gleichförmigen Eindruck. Bei zuvor schon relativ glatten, gebeizten Oberflächen kann Schleifen einen dekorativeren Eindruck erzeugen, jedoch auch die Oberfläche vergrößern.

**Bürsten** dient zur Nachbehandlung von Schweißnähten. Die verwendeten Bürsten müssen aus Edelstahl sein und dürfen nicht mit anderen Materialien kontaminiert sein, damit kein Fremdmaterial in die Oberfläche eingebracht wird. Gleiches gilt beim **Polieren**. Poliermittel oder Abrieb dürfen nicht in die Oberfläche eingetragen werden, bzw. müssen anschließend vollständig entfernt werden. Die effektive Oberfläche darf nicht vergrößert werden durch eine mikroskopische Aufrauung.

**Beizen** stellt eine effektive Reinigung der Oberfläche dar. Verunreinigungen und eine etwa 1 bis 2  $\mu\text{m}$  starke Schicht werden gelöst. Relevante Beizparameter wie die Konzentration der Beize, die Temperatur oder die Beizdauer müssen exakt eingehalten werden, um ein Überbeizen zu vermeiden. Nach dem Beizen muss intensiv gespült werden, um sämtliche Reste der Beizflüssigkeit zu entfernen. Die Oberflächenrauigkeit ändert sich durch Beizen nur unwesentlich.

**Elektropolieren** ist die selektive anodische Auflösung des Metalls in einem Elektrolyten unter Nutzung einer Gleichstromquelle. Dabei werden typischerweise 12 bis 15  $\mu\text{m}$  von der Oberfläche abgetragen, um eine kristalline reine Oberfläche zu erzeugen. Damit die Oberfläche gleichmäßig abgetragen wird, muss häufig eine für das Bauteil angepasste Elektrode gefertigt werden. Dies macht das Verfahren aufwendig. Zudem müssen CF-Dichtflächen abgedeckt werden, da an Kanten die elektrische Feldstärke lokal erhöht ist, was zu einer verstärkten Abtragung von Material führt. Unter UHV-Anwendern ist das Verfahren strittig. Es wird hierbei über Einlagerungen von Wasserstoff in die Oberflächen oder über Reste des Elektrolyten auf den Oberflächen diskutiert. Wie nach dem Beizen müssen Bauteile nach dem Elektropolieren intensiv gespült werden. Zudem sollte anschließend eine Leckprüfung erfolgen, da Material auch im Bereich der Schweißnähte abgetragen wird. Abhängig vom Vorzustand kann Elektropolieren die Oberflächenrauigkeit halbieren.

### 3.4.2 Verarbeitung – Reinigung

Saubere Oberflächen sind eine Grundvoraussetzung in der Vakuumtechnik. Sämtliche Verunreinigungen sind von den Oberflächen zu entfernen, sodass sie nicht unter Vakuumbedingungen desorbieren und Gaslasten erzeugen oder sich auf Einbauten niederschlagen. Dazu erfolgt zunächst eine Vorreinigung, z. B. mit einem Hochdruckreiniger, zur Beseitigung grober Verschmutzungen. Anschließend werden die Bauteile in einem Mehrkammer-Ultraschallbad gereinigt. Im ersten Bad erfolgt unter Ultraschallbedingungen mit Zusatz von speziellen Reinigern die Reinigung und Entfernung der Oberflächen. Verschmutzungen werden durch die Tenside umhüllt, von der Oberfläche abgehoben und im Reinigungsbad gebunden. Der PH-Wert des Reinigungsbades muss auf den Kammerwerkstoff abgestimmt sein. In weiteren Bädern werden die Reinigungsmittel vollständig entfernt, und zwar durch Vorspülen mit anschließendem gründlichem Nachspülen mit heißem, deionisiertem Wasser. Abschließend erfolgt zügig eine Trocknung in einem heißen, staubarmen und kohlenwasserstofffreien Luftstrom. Große Kammern werden mit Dampfstrahlern oder Hochdruckreinigern mit Zusatz von speziellen Reinigungsmitteln gereinigt. Anschließend muss auch hier mehrfach mit heißem deionisiertem Wasser gespült werden und eine rasche Trocknung mit heißer Luft erfolgen.

Nach der Reinigung dürfen vakuumseitige Flächen nur noch mit sauberen, fussel-freien Handschuhen angefasst werden. Die Verpackung erfolgt in PE-Kunststofffolien, Dichtflächen und Dichtschneiden werden mit PE-Abdeckkappen geschützt.

Die Oberfläche gereinigter Bauteile stellt immer noch eine Ausgasquelle dar. Insbesondere adsorbierte Wassermoleküle und Spuren von Kohlenwasserstoffen aus der Lagerung an Luft sind die größten Restgasquellen im UHV. Um diese effektiv von den Oberflächen zu lösen, werden UHV-Kammern ausgeheizt. Unter ständigem Evakuieren, bei einem Druck besser als  $1 \cdot 10^{-6}$  hPa, werden die Bauteile in der Regel auf Temperaturen von 150 bis 300 °C für etwa 48 Stunden erwärmt.

Fremdatome, die durch Physisorption oder Chemisorption an den Oberflächen gebunden sind, erhalten dadurch thermische Energie, mit der sie die Bindung lösen und von der Oberfläche entweichen können. Die von der Oberfläche gelösten Moleküle müssen von der Vakuumpumpe aus dem System entfernt werden. Nach dem Abkühlen erhält man einen um Größenordnungen reduzierten Enddruck. Wird die Kammer belüftet, belegen sich die Oberflächen erneut mit Molekülen. Die Verwendung von trockenem Stickstoff als Flutgas und kurze Öffnungszeiten an einer trockenen Atmosphäre können die Belegung der Oberflächen mit Wasser nicht vollständig verhindern, sondern lediglich reduzieren. Soll ein Enddruck kleiner  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa innerhalb einer erträglichen Abpumptime erreicht werden, ist ein erneutes Ausheizen unumgänglich.

## 3.5 Komponenten und Durchführungen

Eine Vakuumanlage verfügt über eine Vielzahl an Einzelbauteilen, die zu einer Einheit zusammengefügt werden müssen. Mit lösbaren, vakuumdichten Flanschverbindungen lassen sich die Bauteile direkt oder über Vakuumkomponenten, wie Rohrbauteile oder Schläuche verbinden. Dafür steht eine Vielzahl von Standardbauteilen zur Verfügung, hauptsächlich aus Edelstahl, zum Teil auch aus Aluminium. Vakuumverteiler können aus Rohrbauteilen wie Bögen, T-Stücken oder Kreuzstücken aufgebaut werden, Adapter bieten Übergänge von Vakuumflanschen auf Gewinde oder VCR-Verbindungen, Reduzierstücke oder Übergangsstücke machen einen Wechsel unter den Nennweiten oder unter den Flanschsystemen möglich.

Ist der Montageraum begrenzt, sollen möglichst wenige Flanschverbindungen verbaut werden; sind die benötigten Übergänge und Anschlüsse nicht mit Standardkomponenten realisierbar, kommen kundenspezifische Komponenten zum Einsatz. Diese beginnen bei Zwischenstücken in Sonderlängen und enden bei hochkomplexen, individuellen Sonderlösungen.

### 3.5.1 Schläuche und elastische Verbindungen

Die einfachste Form einer elastischen Verbindung ist der Kunststoffschlauch. Größere Nennweiten werden durch eingelegte Metallspiralen verstärkt, um eine Einschnürung zu verhindern. Ihre Enden werden an Schlauchadapter geklemmt und mit Schlauchschellen fixiert. Da Kunststoff im Vakuum ausgast, sollten derartige Schläuche nur im Grob- und Feinvakuum verwendet werden. Für Drücke kleiner  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa sind Metallschläuche unabdingbar. Sie werden aus dünnwandigen Rohren in Form von konzentrischen Wellen kalt umgeformt und mit den Flanschanschlüssen hermetisch dicht verschweißt. Geglühte Wellschläuche wurden nach dem Umformen spannungsarm gegläht und haben dadurch ein geringeres Rückstellmoment. Eine Verformung bewirkt jedoch eine erneute Kaltverfestigung, die abhängig vom Grad der Verformung den Effekt des spannungsarmen Glühens wieder aufhebt. Dünnwandige Wellschläuche sind besonders flexibel und leicht zu verformen.

Unter Vakuum ziehen sie sich Wellschläuche zusammen. Der Effekt tritt beim Einsatz flexibler Verbindungen auf, wenn diese hydraulische Elemente darstellen. Abhängig von ihrer axialen Federrate und vom hydraulischen Querschnitts ihres Profils ergeben sich axiale Kräfte, die auf die Flanschverbindungen übertragen werden. Bei großen Nennweiten ergeben sich enorme Zugkräfte, die bei der Auslegung eines Systems berücksichtigt werden müssen. Während Wellschläuche vornehmlich dazu dienen, zwei Flansche im Raum zu verbinden, dienen Federungskörper zum axialen Ausgleich oder zur Aufnahme von Schwingungen. Ihr Profil ist besonders flexibel, da es in Form einer Omega-Welle gestaucht ist.

Membranbälge werden aus einzelnen, miteinander verschweißten Lamellen gefertigt. Auf einer kurzen Einbaulänge sind große axiale Hübe und Biegewinkel realisierbar. Ein lateraler Versatz ist aufgrund der Steifigkeit der Lamellen nur über relativ viele Membranpaare möglich, indem diese einen S-förmigen Verlauf bilden.

### 3.5.2 Schaugläser

Schaugläser werden hauptsächlich dazu verwendet, das Innere einer Vakuumkammer auch während des Prozesses zu beobachten. Daher werden in der Regel Borosilikatgläser entsprechender Dicke verwendet und mit Elastomerdichtungen in einem Schauglasflansch verbaut (ISO-KF-, ISO-K- und ISO-F-Schaugläser). Für UHV-Anwendungen und für hohe Temperaturen werden die Gläser metallisiert und mit Schweißlippen zum Ausgleich der Wärmeausdehnung verlötet (Fused-Silica-Glas oder Saphirglas) oder verschmolzen (Kodialglas). Über die Schweißlippen werden sie hermetisch dicht mit dem Schauglasflansch verschweißt. Um Spannungen zu minimieren, sollten CF-Schaugläser nur mit geglähten Kupferdichtungen montiert werden. Zudem muss das Aufheizen und Abkühlen gleichmäßig und nicht zu schnell erfolgen.

Dienen Schaugläser auch dem Transfer von elektromagnetischen Wellen, müssen ihr Transmissionsbereich und ihre optische Qualität berücksichtigt werden. Glashalterungen mit FKM-Dichtungen für Ein-Zoll und Zwei-Zoll Schaugläser erlauben den Einbau optischer Gläser in Vakuumflansche. Schauglasblenden verhindern oder reduzieren die Verschmutzung von Schaugläsern etwa bei Beschichtungsprozessen.



Abbildung 3.19: CF-Schauglas mit Glas-Metall-Verschmelzung

### 3.5.3 Stromdurchführungen

Die Konstruktion einer Stromdurchführung ist wesentlich davon abhängig, für welche Stromstärke und Spannung sie verwendet werden soll und welche Anforderungen hinsichtlich Vakuumdichtigkeit und Temperaturbeständigkeit gestellt werden. Durchführungen mit organischen Isolierwerkstoffen sind nur für niedere Spannungen brauchbar. Für mittlere Strombelastung werden häufig Gießharzdurchführungen verwendet. Gießharz ist als Isolator und als Vakuumdichtung für nicht allzu hohe Temperaturen gut geeignet. Durchführungen mit Glasmetallverschmelzungen 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.

Allgemein muss berücksichtigt werden, dass höhere Temperaturen sowohl die elektrische Isolationswirkung herabsetzen als auch die Stromtragfähigkeit der Leiter mindern. Wenn nichts anderes vermerkt ist, beziehen sich die elektrischen Betriebsdaten auf Raumtemperatur. Zudem gelten die maximalen Betriebsspannungen nur bei einem Vakuum kleiner  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa. Bei höheren Drücken kann es bei geringen Abständen zwischen Leitern mit großem Spannungsunterschied zu Gasentladungen und Spannungsüberschlägen kommen. Im gefährdeten Druckbereich zwischen  $1 \cdot 10^{-3}$  hPa und 10 hPa sind entsprechende Weglängen zwischen Leitern mit hoher Spannung vorzusehen. Alternativ können ein Verguss mit Gießharz oder Abschirmungen aus Glas- oder Keramikrohren Abhilfe schaffen.

Stromdurchführungen gibt es als Drahtdurchführungen, als Mehrfachdurchführungen mit Stecker oder als Durchführungen mit Coaxialsteckern. Es gibt Varianten speziell für die Übertragung von hohen Strömen oder Spannungen oder von vielen Signalspannungen auf einem engen Bauraum.



**Abbildung 3.20:** Stromdurchführung mit keramisch isoliertem Drahtleiter aus Kupfer

### 3.5.4 Weitere Durchführungen

**Thermoelementdurchführungen** übertragen kleine Thermospannungen und müssen auf das verwendete Thermoelement abgestimmt sein. Die Materialien der Leiterpaare für Thermoelemente müssen entweder identisch mit denen des Thermoelements sein oder zumindest thermoelektrisch vergleichbar, sodass eine thermoelektrisch neutrale Übertragung der Thermospannung erfolgt. Für Mantelthermoelemente sind zudem elastomergedichtete Durchführungen verfügbar, deren O-Ringe den Mantel vakuumdicht umschließen.

**Fluiddurchführungen** sind in Flansche eingeschweißte Rohre, deren Enden offen oder mit Swagelok®- oder VCR-Verschraubungen versehen sind. Für die Durchleitung von kalten oder heißen Fluiden werden doppelwandige Verrohrungen verwendet, bei denen die medienführenden Rohre thermisch gegen den Flansch isoliert sind.

**Isolatoren** werden eingesetzt, um Bereiche galvanisch zu entkoppeln. Die hermetisch dicht an Flanschanschlüssen verlöteten Keramiken können abhängig von der Länge der Isolationsstrecke große Potenzialunterschiede im hohen kV-Bereich trennen.

**Rohrdurchführungen** klemmen über zwei in Reihe liegende Elastomer-O-Ringe Glas- oder Metallrohre vakuumdicht ein.

## 3.6 Ventile

An Ventile in Vakuumanlagen werden neben den allgemeinen technischen Anforderungen an Absperrorgane spezielle vakuumtechnische 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 größer  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa einsetzbar. Für Druckbereiche kleiner  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 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  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa eingesetzt. Der Einbau erfolgt häufig so, dass bei geschlossener Stellung der Atmosphärendruck auf dem Ventilteller liegt und so die Schließkraft verstärkt.

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 (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.

### 3.6.1 Ansteuerung von Ventilen

Die Art und Weise, wie Ventile betätigt werden, ist vielfältig. Ventile mit kleinen Nennweiten können rein elektromagnetisch über Elektromagnete bzw. Spulen geöffnet werden. Sie schließen üblicherweise mit Federkraft. Bei größeren Ventilen sind die benötigten Spulen recht groß und erzeugen viel Wärme. Über eine eingebaute Steuerelektronik lässt sich hier nach dem Öffnen der Magnetstrom auf einen niedrigeren Haltestrom reduzieren, um das Überhitzen des Antriebs zu verhindern.

Dennoch werden selten Ventile für Nennweiten größer DN 40 elektromagnetisch angetrieben.

Bei einem pneumatisch betriebenen Ventil wird Druckluft zur Betätigung genutzt. Der benötigte Steuerdruck liegt häufig im Bereich 0,4 bis 0,8 MPa. Dabei überträgt ein Druckluftzylinder seine Bewegung auf den Ventilteller. Wird eine Richtung mit Druckluft betrieben und die Gegenrichtung mit einer Feder zurückgestellt, nennt man den Antrieb „pneumatisch einfach wirkend“. Wird für beide Richtungen Druckluft benötigt, nennt man ihn „pneumatisch doppelt wirkend“. Befindet sich ein elektromagnetisches Steuerventil zum Ein- und Auslass der Druckluft direkt am pneumatischen Antriebskopf, liegt ein elektropneumatischer Antrieb vor. Hier muss Druckluft aufgelegt und zum Schalten das Steuerventil mit seiner Steuerspannung (häufig 24 V DC) angesteuert werden. Bei einem rein pneumatischen Antrieb wird üblicherweise ebenfalls ein elektromagnetisches Ventil zur Steuerung der Druckluft verwendet. Nur liegt es hier z. B. im Schaltschrank oder, wenn viele Ventile geschaltet werden, auf einer sogenannten Ventilinsel, die die jeweiligen Steuerventile beherbergt. Bei einem Ausfall der Steuerung ist es häufig vorteilhaft, wenn die Ventile mit Rückstellfedern in eine definierte Ventilstellung fallen. Man unterscheidet hier zwischen den Ausführungen „stromlos geschlossen“ und „stromlos offen“, wobei der Standard die geschlossene Stellung ist. Außerdem können Ventile über Elektromotoren betrieben werden. Hier sind auch Zwischenstellungen möglich, wenn die Ventilkonstruktion dies zulässt.

Die meisten Ventile haben zur Anzeige der Ventilstellung „Auf/Zu“ optische Stellungsanzeiger. Für automatisierte Prozesse ist es sinnvoll oder sogar notwendig, eine Rückmeldung über die tatsächliche Ventilstellung zu erhalten, die unabhängig vom eingestellten Schaltzustand ist. Hierzu werden Ventile mit Stellungsgeber ausgerüstet, die direkt die Lage des Ventiltellers wiedergeben. Fehlfunktionen wie ein Ausfall der Druckluft oder die Fehlfunktion des Steuerventils werden hierdurch aufgezeigt.

### 3.6.2 Eckventile

Eckventile zeichnen sich durch eine hohe Dichtigkeit aus, sie sind robust, industrietauglich und unempfindlich gegenüber Verschmutzungen. Am Gehäuse aus Aluminium oder Edelstahl sind der Ein- und Ausgangsflansch zueinander im 90°Winkel angeordnet. Abbildung 3.21 zeigt den Aufbau eines balggedichteten Eckventils. Eine Elastomerdichtung in Trapez- oder O-Ring-Form befindet sich im Ventilteller. Zum Verschließen wird der Ventilteller gegen den Ventilsitz gedrückt. Da die mechanischen Betätigungsorgane außerhalb des Vakuumbereichs liegen, können sie problemlos geschmiert werden. Eckventile gibt es mit allen gängigen Flanschtypen und in den Ausführungen handbetätigt, pneumatisch, elektropneumatisch und elektromagnetisch betrieben.

Für UHV-Anwendungen gibt es hermetisch dichte Ventilgehäuse und Ventilsitzdichtungen aus FKM oder Kupfer (Ganzmetallausführung).

### 3.6.3 Inline- und Membranventile

Inline-Ventile sind prinzipiell gleich aufgebaut wie die zuvor beschriebenen Eckventile. Ihr Ein- und Ausgangsflansch liegen jedoch in einer Achse. Durch den Aufbau sind die Strömungswiderstände der Inline-Ventile meist höher als die vergleichbarer Eckventile.

Ventile kleiner Nennweiten werden auch als Membranventile ausgeführt. Hier übernimmt eine Membrane sowohl die Abdichtung im Sitz nach innen, als auch nach außen.

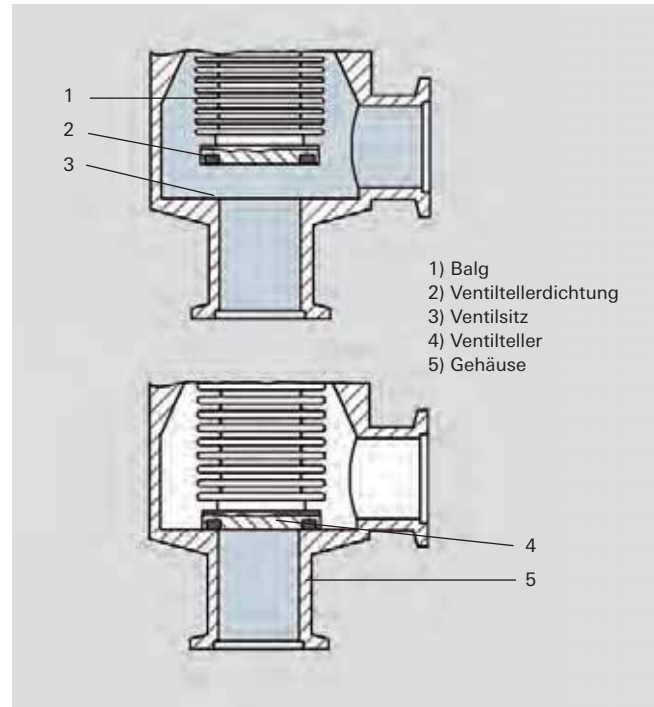


Abbildung 3.21: Balggedichtetes Eckventil

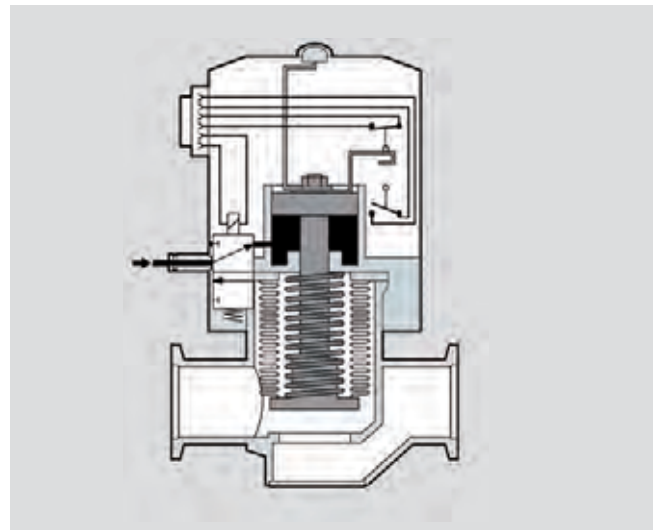
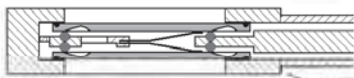


Abbildung 3.22: Inline-Ventil mit elektropneumatischer Betätigung

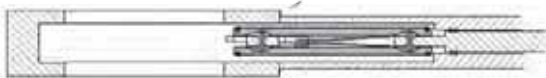


### 3.6.4 Schieberventile

Während die zuvor beschriebenen Ventile nur teilweise den Nennquerschnitt freigeben, bieten Schieberventile einen freien Durchgang im geöffneten Zustand. Zusammen mit ihrer geringen Bauhöhe, führt dies zu hohen Leitwerten und damit verbundenen minimalen Leistungsverlusten beim Einsatz mit Hochvakuum-pumpen. 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 0,1 MPa abdichten, aber nur bei kleinem Differenzdruck am Ventilteller geöffnet werden.



Stellung „geschlossen“



Stellung „offen“

Abbildung 3.23: UHV-Zugschieberventil

### 3.6.5 Schmetterlingsventile und Kugelhähne

Beim Schmetterlingsventil ist die Dichtung auf dem Umfang der Ventilplatte angebracht. Die Platte dreht sich um eine Achse, die quer durch das kreisrunde Ventilgehäuse verläuft. Dabei bleibt der Ventilteller in der Ventilöffnung. Das Ventil hat eine kurze Bauform und einen geringen Leitungswiderstand, da die Klappe fast den ganzen Querschnitt freigibt.

Kugelhähne sind äußerst robuste Ventile mit freiem Durchgang und für Vakua bis etwa  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa geeignet. In einem Gehäuse ist eine durchbohrte Kugel drehbar gelagert und beidseitig mit ebenfalls durchbohrten Kugelkalotten (meist aus PTFE) abgedichtet. Wenn die Bohrung in Durchflussrichtung steht, ist der gesamte Querschnitt freigegeben. Zu beachten ist, dass der Kugelhahn im geschlossenen Zustand ein eingeschlossenes Volumen enthält.

In der 3-Wege-Ausführung ist die Kugelbohrungen in Form eines „L“ oder „T“ aufgebohrt. Bedingt durch die Größe der Bohrungen, sind beim Schalten die drei Anschlüsse nicht überschneidungsfrei.

### 3.6.6 Gasdosier- und Gasregelventile

Gasdosierventile dienen zum Einlass definierter Gasströme in ein Vakuumssystem, um z. B. in einem System einen bestimmten Druck aufrechtzuerhalten bzw. einzustellen. Sie arbeiten häufig nach dem Prinzip eines Nadelventils. Durch Drehen einer Spindel wird ein Spalt freigegeben, dessen Öffnung und Länge einen Strömungsleitwert darstellt. Der Gasstrom ist von den Umdrehungen der Spindel abhängig und wird in einer Kennlinie dargestellt. Die Ventilstellung lässt sich an einer Skala ablesen und ist reproduzierbar einzustellen. Gasregelventile sind motorisch ansteuerbare Dosierventile oder Proportionalventile, bei denen die Größe der Ventilöffnung stetig mit dem angelegten Spulenstrom bis zur maximalen Öffnung ansteigt. Über Kennlinien ist der dem Spulenstrom zugeordnete Volumenstrom dargestellt. Regelventile werden mit Steuergeräten betrieben oder direkt durch externe Steuerungen angesteuert. Sie werden in automatisierten Prozessen zur Druck- oder Durchflussregelung eingesetzt.

Für kleinste Volumenströme unter UHV-Bedingungen, z. B. für Massenspektrometeranwendungen, gibt es ausheizbare Ganzmetall-Gasdosier- und Gasregelventile, die mit einer Platte aus Keramik gegen einen Sitz aus Metall abdichten.



Abbildung 3.24: UHV-Ganzmetall-Gasdosierventil

## 3.7 Manipulatoren und mechanische Durchführungen

Zahlreiche Vakuumprozesse in der Forschung und industriellen Produktion benötigen eine Bewegung von Proben oder Bauteilen im evakuierten Bereich. Dies können lineare Positionsänderungen in Richtung der drei Raumachsen oder das Drehen um die Achsen sein, als Einzelbewegung oder als Kombinationen der Bewegungsarten untereinander.

Manipulatoren und mechanische Durchführungen ermöglichen Translationen und Rotationen im Vakuum, wobei deren Antrieb auf der Atmosphärenseite liegt und die Bewegungen vakuumdicht übertragen werden. Dabei werden verschiedenste Wirk- und Übertragungsprinzipien entsprechend den jeweiligen Vakuum- und Anwendungsbedingungen genutzt. Als dichtende

Elemente kommen metallische Membran- und Wellbälge, spezielle Elastomerdichtungen, magnetisch gekoppelte Systeme oder differenziell gepumpte Dichtungen zum Einsatz.

Ausführungen mit beidseitig freien Flanschanschlüssen und offenem Durchgang bezeichnet man als **Manipulatoren**, Komponenten, deren Aktuator vakuumdicht in einem Flansch verbaut ist, als **mechanische Durchführungen**. Letztere zeichnen sich durch eine kompakte Bauform aus. Manipulatoren sind untereinander kombinier- und erweiterbar. Darüber hinaus können an ihnen mechanische Durchführungen angebaut werden, sodass vielfältigste Arten von Bewegungen ins Vakuum übertragen und somit mannigfaltige Bewegungsaufgaben gelöst werden können. Zusätzlich können am Eingangsflansch weitere Durchführungen für z. B. Strom oder Fluide angebracht werden und diese somit durch den Manipulator direkt zur Anwendung geführt werden.

Auf den Flanschen von Manipulatoren lasten gerade bei größeren Nennweiten beachtliche Kräfte durch den Atmosphärendruck. Damit die Flansche auch unter Vakuum lagestabil sind, muss bei der Konstruktion von Manipulatoren großer Wert auf deren Eigensteifigkeit gelegt werden. Eine besondere konstruktive Herausforderung besteht darin, die hochpräzise Übertragung von Bewegungen in Einklang zu bringen mit der äußeren Belastung und weiteren Lasten durch Einbauten. Zudem müssen die eingesetzten Komponenten ausheizbar sein, um die Verwendung auch im UHV-Bereich zu gewährleisten.

### 3.7.1 Funktionsprinzipien

Bei der Auswahl eines geeigneten Manipulators oder einer mechanischen Durchführung sollte der Anwender das zugrunde liegende Funktionsprinzip kennen, um die technischen Parameter in Bezug auf die Eignung für seine Aufgabenstellung beurteilen zu können.

#### 3.7.1.1 Membranbalggedichtete Translation

Membranbälge bestehen aus paarweise aneinander geschweißten Membranscheiben. Sie sind in ihrer axialen Ausdehnung äußerst beweglich bei einer kleinen Federrate. Membranbälge gewährleisten einen hermetisch dichten, metallischen Einschluss und sind für höchste UHV-Anforderungen geeignet.

Die Auswahl und Auslegung der Membranbälge erfolgt gemäß der geforderten Bewegungsaufgabe unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen: Lebensdauer (Anzahl der Bewegungszyklen), Betriebstemperatur, Ausheiztemperatur, Differenzdrücke. Die Lebensdauer kann dabei bis zu 0,5 Millionen Zyklen betragen bei Membranen aus dem Werkstoff 316L und bis zu 10 Millionen Bewegungszyklen für den elastischeren, jedoch magnetisierbaren Werkstoff AM 350. Membranbälge sind innerhalb der vorgegebenen Zyklenzahl wartungsfrei. Nach Erreichen der berechneten Bewegungszyklen müssen sie getauscht werden. Für Umgebungen mit Staub und Schmutz sind sie ungeeignet.

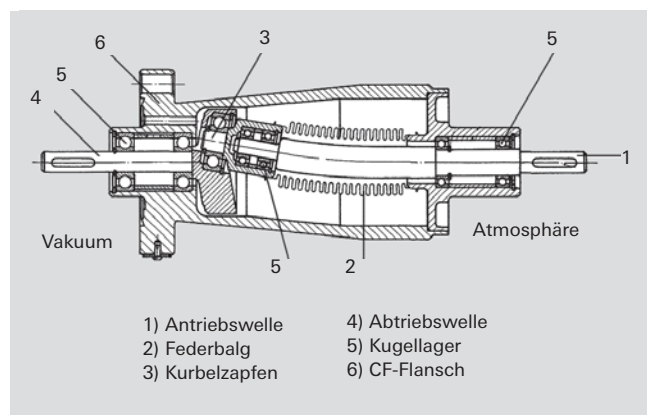
Membranbälge werden in Z-Achsen-, XY-Achsen- und XYZ-Achsen-Präzisionsmanipulatoren, Justiermanipulatoren und balggedichteten Drehdurchführungen eingesetzt.

Beim Ausheizen von Geräten mit Membranbälgen muss auf eine gleichmäßige Erwärmung geachtet werden. Heizbänder auf Membranbälgen sollten vermieden werden. Sie führen zu einer starken, lokalen Erwärmung, da die Membranen zum einen eine geringe Masse und zum anderen eine kleine Fläche für die Wärmeleitung haben. Temperaturgeregelte Heizmanschetten sind hier die bessere, wenn auch aufwendigere Alternative.

#### 3.7.1.2 Balggedichtete Rotation

Das sogenannte Katzenschwanz- oder auch Taumelprinzip erlaubt die Übertragung einer Drehbewegung mit einem Balg, d. h. Drehbewegungen bei einer hermetischen Trennung zwischen Vakuum und Atmosphäre. In Abbildung 3.25 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 die nichtdrehende Balgabdichtung (2), die eine Taumelbewegung ausführt, erfolgt die hermetische Abdichtung. Ab- und Antriebswelle werden mittels Edelstahlkugellagern gelagert, die mit einer vakuumtauglichen Trockenschmierung beschichtet sind.

Die Trockenschmierung erhöht nicht nur die Lebensdauer und die mögliche maximale Drehzahl, sie verhindert auch ein Festsetzen der Kugeln während des Ausheizens bei hohen Temperaturen. Neben Trockenschmierungen können für UHV-Anwendungen auch Hydridlager mit Keramikugeln eingesetzt werden. Ihr hoher Preis rechtfertigt einen Einsatz nur bei höchsten Anforderungen. Alternativ können bei Hochvakuumanwendungen, die unempfindlich auf geringe Anteile von Kohlenwasserstoffen sind, Lager mit vakuumtauglichen Fetten geschmiert werden.



**Abbildung 3.25:** Balggedichtete UHV-Drehdurchführung (Katzenschwanzprinzip)

### 3.7.1.3 Magnetisch gekoppelte Rotation und Translation

Als hermetisch dichte Dreh- oder Schiebendurchführungen werden Magnetkupplungen benutzt. Sie bestehen aus einer Permanentmagnetanordnung außen, die einen im Vakuum dreh- bzw. verschiebbar gelagerten, ebenfalls mit Magneten bestückten Rotor mitnimmt. Beide Teile sind durch ein dünnwandiges Rohr vakuumtechnisch voneinander getrennt. Der Abstand der Magnete von Innen- und Außenläufer sollte möglichst gering sein, damit die Koppelkraft zwischen ihnen möglichst groß ist. Der Rotor innen ist mit der zu bewegend Anwendung verbunden, der Magnetläufer außen wird manuell bewegt oder motorisch angetrieben. Die Lager innen sind vakuumtauglich trocken geschmiert.

Häufig werden Hochleitungsmagnete aus Metallen der Seltenen Erden eingesetzt, wie z. B. Kobalt-Samarium-Magnete. Sie gewährleisten eine höchstmögliche Kopplungskraft bei gleichzeitig hervorragender Beständigkeit gegenüber höheren Temperaturen, wie sie beim Ausheizen auftreten. Derart magnetisch gekoppelte Systeme sind für UHV-Anwendungen geeignet. Auch wenn die Magnetfelder zum größten Teil abgeschirmt sind, lässt sich die Ausbreitung der magnetischen Feldlinien nicht restlos vermeiden. Der Anwender muss daher prüfen, ob seine Anwendung unempfindlich genug gegenüber dem verbleibenden Magnetfeld ist.

Mit magnetgekoppelten Systemen können reine Dreh- und Linearbewegung und simultane Dreh/Linearbewegung realisiert werden. Die übertragbaren Verschiebekräfte und Drehmomente sind durch die Anzahl der Magnete und deren Anordnung begrenzt. Die erreichbare Präzision ist abhängig von der zu bewegend Masse. Die Magnetfelder wirken wie eine Feder zwischen den beiden Kopplungspartnern. Je höher die externen Kräfte oder Momente sind, desto größer ist die Abweichung der Positionen zwischen Innen- und Außenläufer. Sind die externen Kräfte und Momente im Vergleich zu den maximal zulässigen gering, können Bewegungen sehr präzise übertragen werden.

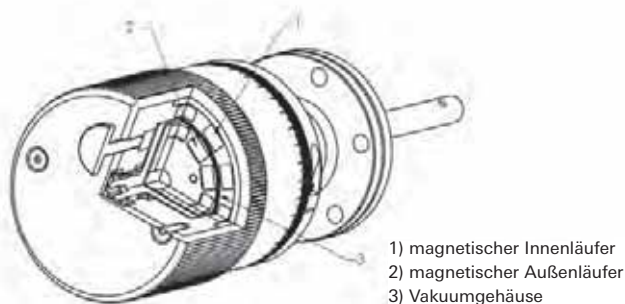


Abbildung 3.26: Magnetisch gekoppelte UHV-Drehdurchführung

### 3.7.1.4 Elastomergedichtete Rotation und Translation

Für dynamisch beanspruchte, hochvakuumtaugliche Dichtungen werden spezielle Elastomerdichtungen verwendet, die häufig aus dem Werkstoff FKM (Fluorkautschuk) bestehen. Die Abstimmung der Grenzmaße zwischen Gehäuse, Dichtung und Aktuator-Welle muss sorgfältig erfolgen, ebenso die Auslegung und Ausführung der Oberflächengüten.

Für häufige Bewegungen und zur Erhöhung der Dichtwirkung benötigen Elastomerdichtungen an den beweglichen Kontaktstellen eine Schmierung, die die Reibung mindert, einen vorzeitigen Verschleiß verhindert und kleine Unebenheiten in den Oberflächen ausgleicht. Bei der Auswahl eines geeigneten Vakuumfettes oder -öls müssen dessen Eigenschaften – insbesondere der Dampfdruck – bei der maximalen Betriebs- und Ausheiztemperatur berücksichtigt werden.

Elastomergedichtete Durchführungen sind nur bedingt ausheizbar. Zudem ist zu prüfen, ob Bestandteile des Fettes oder geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen mit der Anwendung verträglich sind. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen stellen elastomergedichtete mechanische Durchführungen eine ökonomische Alternative zu Geräten mit aufwendigeren Funktionsprinzipien dar, wenn nicht höchste Ansprüche an die Vakuumqualität gestellt werden.

Ein Vorteil der durchgehenden Aktuator-Welle ist die direkte Verbindung der vakuumseitigen Anwendung mit dem Antrieb auf der Atmosphärenseite. Hier tritt kein spiel- oder lastabhängiger Positionierungsfehler auf. Zudem können abhängig von der Dimensionierung und Lagerung der Aktuator-Welle große Lasten bewegt werden.

Mit elastomergedichteten Durchführungen können reine Dreh- und Linearbewegung und simultane Dreh/Linearbewegung realisiert werden.

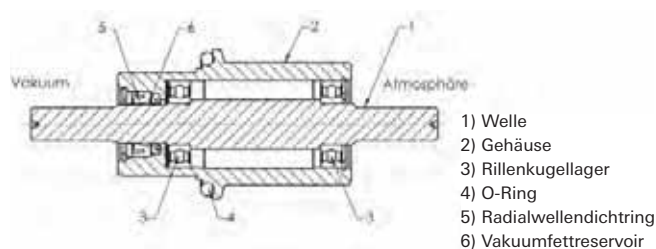


Abbildung 3.27: Elastomergedichtete Drehdurchführung

### 3.7.1.5 Rotation über Gleitdichtungen mit gepumpten Zwischenräumen

Die einzige Möglichkeit, einen Manipulator mit freiem Durchgang und frei zueinander drehbaren Flanschen zu fertigen, ist die Verwendung von Gleitdichtungen. Da eine Gleitdichtung allein keine UHV-dichte Trennung ermöglicht, werden mehrere in Reihe geschaltet und die Zwischenräume evakuiert. Üblicherweise werden drei spezielle PTFE-Gleitdichtungen in Reihe verbaut. Für den ersten Zwischenraum reicht eine Vorvakuumpumpe. Sollen im Inneren UHV-Bedingungen herrschen, wird eine weitere Zwischenabsaugung benötigt, an die eine Hochvakuumpumpe angeschlossen wird.

### 3.7.2 Genauigkeit, Wiederholgenauigkeit und Auflösung

Manipulatoren und mechanische Durchführungen haben verschiedenste Aufgabenstellungen. Sie reichen von kontinuierlichen Linear- und Drehbewegungen mit vorgegebenen Geschwindigkeiten bis zu präzisen Positionie-



rungsaufgaben. Proben zur Analyse transportieren, Serienprodukte zwischen Prozesskammern verfahren, oder Messköpfe an ihre Messstelle positionieren – solche Aufgaben erfordern oft nur Positionsgenauigkeiten von 0,1 bis 1 mm. Andere Positioniervorgänge erfordern präziseste Wiederholgenauigkeiten von wenigen Mikrometern oder bei Aufgaben wie Scanvorgängen feinste Auflösungen von 1 µm.

Um Anforderungen zur Auswahl eines Manipulators oder einer mechanischen Durchführung richtig benennen zu können, sind das Verständnis der folgenden Begriffsdefinitionen sowie, die Kenntnis der Eigenschaften und Fehlerquellen der Geräte wichtig.

Die **Genauigkeit (Präzision)** beschreibt die Abweichung zwischen der gewünschten Position und der wirklich erreichten Position. Startend von einer Position, manuell über eine Skala abgelesen oder motorisch angefahren, endend bei einer Position, die sich nach einer definierten Anzahl von Skalenbewegungen oder Motorschritten ergibt.

Die Genauigkeit folgt demnach aus einer Vielzahl von Faktoren. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen, hier einige Aspekte, die häufig betrachtet werden müssen: Wie genau lässt sich die Skala ablesen? Wie genau lässt sich das Stellrad bewegen? Wie groß ist die Unterteilung der Motorschritte? Folgt die Bewegung exakt dem Motorschritt? Außerdem sind die Eigenschaften der Führungs- und Antriebsbauteile entscheidend für die Genauigkeit: Wie groß ist der Steigungsfehler und das Spiel eines Spindeltriebes? Wie groß sind die Abweichung von der idealen Führungslinie einer Linearführung? Weiterhin bewirken externe Lasten durch Anbauten oder durch den Luftdruck Verformungen in der Antriebs- und Führungseinheit. Sind Manipulatoren nicht ausreichend stabil aufgebaut, neigt sich der verfahrbare Flansch beim Evakuieren relativ zum Anschlussflansch.

Die **Wiederholgenauigkeit** beschreibt die Abweichung, mit der eine bestimmte Position wieder zu erreichen ist. Sie ist besser oder gleich der Genauigkeit, da nicht sämtliche Fehlerquellen eingehen. Z. B. wirken sich der Spindelsteigungsfehler oder die Führungsabweichung hier nicht aus, wohl aber das Spiel in den Bauteilen.

Die **Auflösung** beschreibt die kleinste mögliche Schrittweite einer Bewegung. Steigungsfehler oder Führungsgenauigkeit wirken sich auch hier nicht aus. Die Ablesbarkeit der Skala oder die kleinste Schrittweite des Motors sind hier entscheidend. Voraussetzung ist hier, dass die Führungs- und Antriebseinheit der Vorgabe folgt. Kommt es z. B. aufgrund der Elastizität der Bauteile und des Unterschieds zwischen Haft- und Gleitreibung zu Wegsprüngen unter den Gleitreibungspartnern (Stick-Slip-Effekt), können solche Effekte die Auflösung bestimmen. Kugelumlaufsysteme sind frei von solchen Effekten und sind bei anspruchsvollen Positionierungsaufgaben einer Gleitführung vorzuziehen.

### 3.7.3 Technische Ausstattung und Eigenschaften

Manipulatoren und mechanische Durchführungen können sowohl mechanisch eher simpel als auch hochwertig ausgeführt sein. Daher sollte sehr genau beachtet

werden, ob das jeweilige Gerät den Ansprüchen an Präzision, Haltbarkeit und Wartungsaufwand entspricht und eine ergonomische Bedienbarkeit gewährleistet ist.

#### 3.7.3.1 Konstruktionsmerkmale eines Z-Achsen-Präzisionsmanipulators

Der Einsatz von Kugelumlaufsystemen bei Spindeltrieb und Führung hat mehrere entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Trapez- und metrischen Gewindetrieben oder Gleitführungen. Aufgrund ihrer geringen Reibung besitzen Kugelumlaufsysteme einen hohen Wirkungsgrad, der sich insbesondere bei großen Nennweiten positiv auswirkt. Trotz hoher externer Lasten (etwa durch den Druckunterschied im evakuierten Zustand) ermöglichen sie eine komfortable Wegverstellung mit moderater Betätigungskraft. Der bereits beschriebene Stick-Slip-Effekt ist nicht vorhanden, sodass zum einen eine sehr feine Auflösung bereitsteht und zum anderen kein Losbrechmoment auftritt, das eine Bedienung erschwert und insbesondere Motorantriebe stark belastet. Untersetzungsgetriebe zur Unterstützung von Motoren sind hier nicht nötig. Ein weiterer Vorteil ist der sehr geringe Verschleiß. In einer sauberen Umgebung, die zu keiner Verschmutzung des Fettes führt, hält die Originalschmierung aus hochwertigem Langzeit-Hochtemperaturfett praktisch unbegrenzt und eine Wartung entfällt.

Ein verbiegssteifer Führungskörper wirkt sich wesentlich auf die Präzision aus. Die Wahl einer stabilen U-Form aus Edelstahl führt zu großer Steifigkeit bei geringem Materialeinsatz und damit verbundenem Gewicht. Innerhalb der U-Form ist die Führungsschiene an die stabile Rückwand verschraubt. Gegenüber freilaufenden Wellenführungen, die nicht unterstützt werden können, erhält man mit Profilschienenführungen ein besonders verformungsarmes Gerüst, das auch unter hohen Lasten eine präzise Verstellung unter Einhaltung aller Raumachsen über den gesamten Verfahrensweg realisiert.

Die Balgeinheit ist üblicherweise auf 10.000 Zyklen bei vollständiger Nutzung des Verfahrenswegs ausgelegt. Durch eine Austauschbarkeit des Balges wird gewährleistet, dass Manipulatoren mit hochwertigen Führungs- und Antriebskörpern weiterhin genutzt werden können.



Abbildung 3.28: Z-Achsen-Präzisionsmanipulator

### 3.7.3.2 Konstruktionsmerkmale eines XY-Achsen-Präzisionsmanipulators

Die Konstruktion eines XY-Achsen-Präzisionsmanipulators zeichnet sich ebenfalls durch eine sehr stabile Konstruktion aus, die einen Ausgleich zwischen Gewicht, Baugröße und Stabilität darstellt. Seine tragende Grundstruktur ist verwindungssteif aus einer Aluminiumlegierung gefertigt, deren Oberfläche eloxiert und damit langfristig geschützt ist.

Präzisionskreuzrollenführungen sichern eine lange Lebensdauer bei höchster Präzision. Der manuelle Antrieb der beiden Achsen erfolgt über Mikrometerschrauben mit großer Betätigungstrommel. Sie gewährleistet eine einfache, ergonomische Einstellung bei einer sehr guten Lesbarkeit der Skala und führt damit zu einer hohen Auflösung.

Ein Freiraum um die Balgeinheit sorgt für die Montagemöglichkeit einer Heizmanschette, sodass diese gleichmäßig geheizt werden kann. Auch hier ist die Balgeinheit einfach austauschbar, sodass sie nach Durchfahren der ausgelegten Anzahl an Zyklen ausgetauscht werden kann.



Abbildung 3.29: XY-Achsen-Präzisionsmanipulator



## 4.1 Pumpprinzipien und Leistungsdaten von Vakuumpumpen

### 4.1.1 Einteilung der Vakuumpumpen

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

Gasfördernde Pumpen, auch Gastransferpumpen genannt, werden eingeteilt in Verdrängerpumpen und kinetische Vakuumpumpen. Verdrängerpumpen fördern

Gas aus abgesperrten Räumen in die Atmosphäre oder in eine nachgeschaltete Pumpstufe. Kinetische Pumpen fördern das Gas durch Beschleunigung in Pumprichtung. Dies geschieht entweder durch mechanischen Antrieb oder durch einen gerichteten Dampfstrahl, der am Ende der Pumpstrecke kondensiert wird. Gasbindende Vakuumpumpen binden das Gas entweder durch Physisorption bei Raumtemperatur oder tieferen Temperaturen oder aber durch Chemisorption an reinen Oberflächen. Die Chemisorption wird technisch durch sogenannte Getterpumpen realisiert, in denen durch Verdampfen bzw. Sublimieren oder Zerstäuben (Sputtern) immer wieder reine Getteroberflächen erzeugt werden. Ionisiert man die zu bindenden Gasteilchen in einer Ionen-Getter-Pumpe vor der Wechselwirkung mit einer Getteroberfläche, können

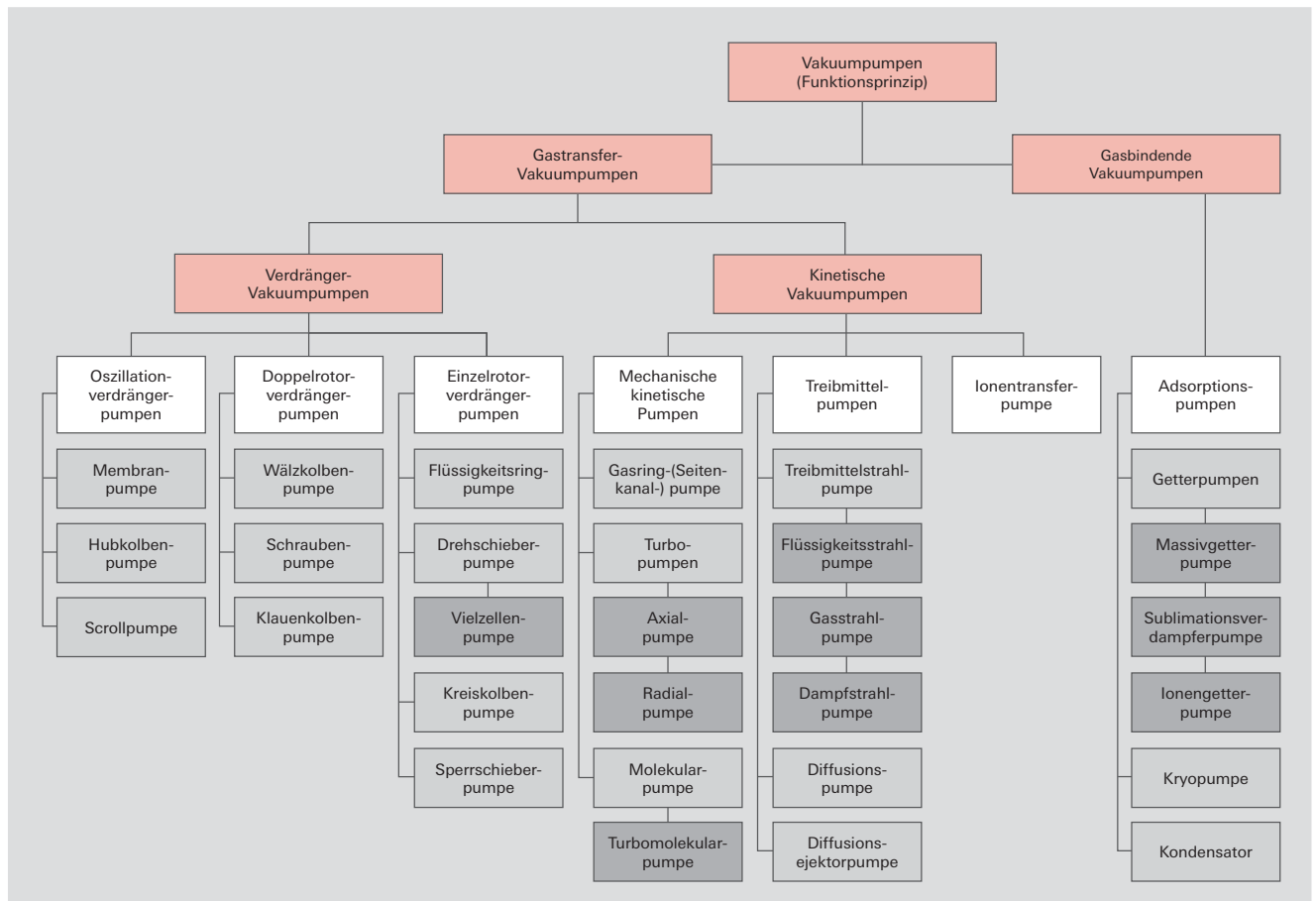


Abbildung 4.1: Übersicht Vakuumpumpen

sie gleichzeitig die Getteroberfläche durch Sputtern reinigen und vom zerstäubten Material begraben werden. Sogenannte nicht verdampfbare Getter (Non Evaporable Getter, NEG) bestehen aus sehr reaktiven Legierungen von vorwiegend Zirconium oder Titan und besitzen eine sehr große spezifische Oberfläche. Durch Mikroporen können Gase auch in die tieferen Schichten des Gettermaterials eindringen und dort als stabile chemische Verbindungen gebunden werden.

#### 4.1.2 Saugvermögen und Saugleistung

$$\text{Das Saugvermögen } S = \frac{dV}{dt}$$

(Formel 1-17) 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 das durch die Geometrie der Pumpe maximal erreichbare Saugvermögen bezeichnet. Die Bestimmung des Saugvermögens ist in der Basisnorm ISO 21360-1:2012 beschrieben. Das Saugvermögen wird in  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  angegeben. Gebräuchlich sind auch die Einheiten  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  und  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

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

(Formel 1-16) gibt den Gasdurchsatz durch eine Vakuumpumpe in Abhängigkeit vom Ansaugdruck an. Sie wird in  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  oder  $\text{hPa} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} = \text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  angegeben. Bei Pumpständen aus gasfördernden Pumpen ist die Saugleistung aller in Reihe geschalteten Pumpen gleich.

#### 4.1.3 Enddruck und Basisdruck

Der Enddruck  $p_e$  ist der niedrigste Wert, dem sich der Druck einer blindgeflosschten Vakuumpumpe unter definierten Randbedingungen ohne Gaseinlass asymptotisch nähert. Arbeitet eine Pumpe beim Enddruck, so ist das nutzbare Saugvermögen null, da sie nur ihre eigenen Rückströmverluste fördert. Der Enddruck ist ein theoretischer Wert. Anstelle des Enddrucks wird heute der Basisdruck angegeben. Die Bedingungen zum Erreichen des Basisdrucks sind in der Norm ISO 21360-1:2012 angegeben. Da der Basisdruck in einer vorgeschriebenen Zeit erreicht werden muss, liegt er meistens höher als der Enddruck.

#### 4.1.4 Kompressionsverhältnis

Als Kompressionsverhältnis bezeichnet man das maximale Druckverhältnis zwischen Auslassdruck  $p_{aus}$  und Saugdruck  $p_{ein}$

$$K_0 = \frac{p_{aus}}{p_{ein}}$$

Formel 4-1: Kompressionsverhältnis

Man misst das Kompressionsverhältnis bei blind geflanschem Saugstutzen (wegen der Nullförderung als  $K_0$  bezeichnet) durch Gaseinlass auf der Auslassseite, sofern nicht gegen den konstanten Atmosphärendruck ausgestoßen wird.

#### 4.1.5 Saugvermögen von hintereinander geschalteten Pumpstufen

Betrachten wir eine Vakuumpumpe mit dem Nennsaugvermögen  $S_0$  und dem Kompressionsverhältnis  $K_0$ . Die Pumpe hat Rückströmverluste über Spalte mit dem Leitwert  $L_R$ . Der Eingangsdruck sei  $p_{ein}$  und der Auslassdruck sei  $p_{aus}$ . Auf der Auslassseite sei eine weitere Pumpe mit dem Saugvermögen  $S_V$  angeschlossen. Wir haben es also z. B. mit einem Wälzkolben- oder Turbopumpstand zu tun.

Der gesamte Pumpstand mit dem Saugvermögen  $S$  fördert die Gasmenge

$$q_{pV} = p_{ein} \cdot S = p_{aus} \cdot S_V = S_0 \cdot p_{ein} - L_R (p_{aus} - p_{ein})$$

Formel 4-2: Gasstrom Pumpkombination

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

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

Formel 4-3: Rückströmleitwert

und für das reale Kompressionsverhältnis

$$K = \frac{p_{aus}}{p_{ein}} = \frac{S}{S_V}$$

Formel 4-4: Reales Kompressionsverhältnis

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

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

Formel 4-5: Rekursionsformel Saugvermögen

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.

#### 4.1.6 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 in der Pumpe bei den vorkommenden Temperaturen ohne Gasballast kondensieren würde, so ermöglicht der Gasballast eine Öffnung des Auslassventils, bevor Dampfkondensation eintritt. Der Dampf wird mit dem Ballastgas ausgestoßen. Als Ballastgas werden atmosphärische Luft sowie speziell ausgewählte Inert- oder Prozessgase verwendet. Durch den Einsatz des Gasballasts steigt der erreichbare Basisdruck einer Vakuumpumpe geringfügig an. Deshalb wird bei Vakuumpumpen mit Gasballasteinrichtung der Basisdruck generell sowohl mit als auch ohne Gasballast angegeben.

#### 4.1.7 Wasserdampfverträglichkeit/ Wasserdampfkapazität

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

$$p_W = \frac{q_{pV, Ballast} \cdot (p_S - p_a)}{S \cdot (\alpha \cdot p_0 - p_S)}$$

**Formel 4-6:** Wasserdampfverträglichkeit

$p_W$	Wasserdampfverträglichkeit
$q_{pV, Ballast}$	Gasballaststrom
$S$	Saugvermögen der Pumpe
$p_S$	Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfs bei Abgastemperatur
$p_a$	Partialdruck des Wasserdampfs in der Luft
$p_0$	Atmosphärendruck
$\alpha$	Korrekturfaktor, dimensionslos

Der Korrekturfaktor trägt der Tatsache Rechnung, dass zum Öffnen des Auslassventils ein Druck größer als der Atmosphärendruck erforderlich ist. In unserem Beispiel kann  $\alpha$  als 1,1 angenommen werden.

Die Wasserdampfverträglichkeit hat die Dimension eines Drucks und wird in hPa angegeben.

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  $q_{pV, Ballast}$ . 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 Wasserdampfs zu fördern. Wird trotzdem Wasserdampf ohne Gasballast gepumpt, so löst sich das Kondensat im Pumpenöl. Als Folge davon steigt der Basisdruck und das Kondensat kann zu Korrosionsschäden führen.

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

$$q_{m, Wasser} = p_W \cdot S \cdot M \cdot (RT)^{-1}$$

**Formel 4-7:** Wasserdampfkapazität

$q_{m, Wasser}$	Wasserdampfkapazität
$M$	Molare Masse von Wasser
$R$	Allgemeine Gaskonstante
$T$	Absolute Temperatur

Die Wasserdampfkapazität wird in  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$  angegeben. Es handelt sich also um einen Wasserdampf-Massenstrom. Als Formelzeichen ist oftmals auch  $c_W$  (Water Vapor Capacity) gebräuchlich.

#### 4.1.8 Sperrgas

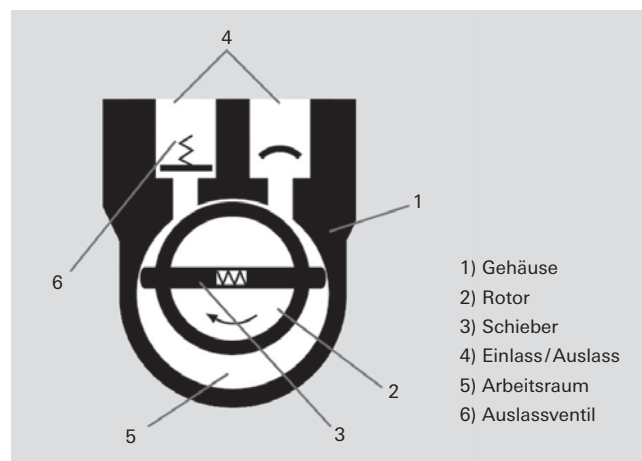
Beim Pumpen von korrosivem Prozessgas besteht die Gefahr, dass dieses Teile der Pumpe angreift. Um dieser Gefahr zu begegnen, müssen empfindliche Teile durch einen kontinuierlichen Inertgasstrom geschützt werden. Zu diesem Zweck wird ein spezielles Gaseinlasssystem in die Pumpen eingebaut, durch das Gas an definierten Stellen in das Pumpensystem strömt. Bei Turbomolekularpumpen müssen vor allem die Lager und der Motorraum geschützt werden. Der Einlass von Sperrgas in den Motorraum schützt dabei sowohl vor chemischen Reaktionen aggressiver Gase mit nicht korrosionsfesten Bestandteilen des Schmiermittels oder der Lager als auch vor dem Eindringen von Stäuben und Partikeln in den Schmiermittelraum und damit der Vermengung mit dem Schmiermittel. Auch bei schmiermittelfreien Turbopumpen empfiehlt sich der Einsatz von Sperrgas zum Schutz der Motoren und der Verhinderung des Partikeleintrags, was z. B. zu einem Kontakt zwischen Welle und Notlagern führen könnte.

Bei prozesstauglichen ölfreien Vorpumpen wird zusätzlich zum Sperrgas für die Lager noch Spülgas in einzelne Stufen der Prozesspumpe eingeblasen. Über Druckregler vor kalibrierten Düsen oder über Durchflussregler (MFC = Mass Flow Controller) wird der prozessabhängige Spülgasdurchfluss eingestellt und über Druckmessfühler und -schalter sowie Durchflussmesser kontinuierlich überwacht.

## 4.2 Drehschiebervakuumpumpen

### 4.2.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Die Drehschiebervakuumpumpe ist eine ölüberlagerte Rotationsverdrängerpumpe. Das Pumpensystem besteht aus dem Gehäuse (1), dem exzentrisch eingebauten Rotor (2), den mit Flieh- und Federkraft radial bewegten Schiebern (3) und dem Ein- bzw. Auslass (4). Das Einlassventil ist, sofern vorhanden, als Vakuumsicherheitsventil ausgebildet und ist im Betrieb immer geöffnet. Im Inneren des Gehäuses befindet sich der Arbeitsraum (5), der durch den Stator, den Rotor und die Schieber begrenzt wird. Der exzentrische Rotor und die Schieber teilen den Arbeitsraum in zwei separate Räume mit veränderlichem Volumen. Dreht sich der Rotor, so strömt Gas in den sich vergrößernden Schöpfraum, bis dieser durch den zweiten Schieber abgesperrt wird. Anschlie-



**Abbildung 4.2:** Funktionsprinzip der Drehschiebervakuumpumpe



ßend wird das eingeschlossene Gas so weit komprimiert, bis sich das Auslassventil gegen den Atmosphärendruck öffnet. Das Auslassventil ist ölüberlagert. Beim Öffnen des Ventils dringt eine kleine Menge Öl in den Schöpfraum ein und bewirkt neben einer Schmierung auch die Abdichtung der Schieber gegen das Gehäuse (den Stator).

Bei Gasballastbetrieb wird eine Bohrung nach außen geöffnet, die stirnseitig in den abgeschlossenen Schöpfraum mündet. Dadurch wird in der Kompressionsphase der Pumpens bereits bei relativ niedriger Kompression der Druck erreicht, der zum Öffnen des Auslassventils erforderlich ist. Damit kann ein gefördertes Gas-Dampf-Gemisch bereits vor einer einsetzenden Kondensation des Dampfes ausgestoßen werden. Der bei Betrieb mit Gasballast erzielte Enddruck ist höher als bei Betrieb ohne Gasballast.

### Betriebsmittel, Öl

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

### Mehrstufige Pumpen

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

### Vakuumsicherheitsventil

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

### 4.2.2 Anwendungshinweise

Drehschiebervakuumpumpen 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 und

bewirken eine Erhöhung des Enddruckes, eine Herabsetzung der Schmierfähigkeit des Betriebsmittels und können zu Korrosion innerhalb der Pumpe führen. Vor dem Abpumpen von Dämpfen sollte die Pumpe mindestens eine halbe Stunde mit Gasballast warmgelaufen sein. Die höhere Temperatur des Betriebsmittels reduziert die Kondensation. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Kondensation sind ein möglichst geringer Auslassdruck und eine getrennte Abscheidung der Kondensate. Dazu sollten einlass- und auslassseitig Kondensatabscheider verwendet werden. Staudruck am Auslass durch einen Ölnebelabscheider und eine vertikale Abgasführung müssen vermieden werden. Falls eine Absaugung vorhanden ist, sollte der Auslass daran angeschlossen werden.

### Stäube, Partikel und Chemikalien

In gewissen Grenzen können Filter und Abscheider die Vakuumpumpe vor Verschleiß und Korrosion schützen. Abscheider mit Filtereinsätzen aus Polyester (SAS) oder Epoxy-Glasmikrofaser (DFT) binden Staub. Aktivkohlefilter (FAK) binden anorganische Dämpfe, ihre Füllungen sind auswechselbar. Einströmende Kohlenwasserstoffe (Öldampf) können in der beheizten Katalysatorfalle (URB) katalytisch verbrannt werden. Zeolithfallen (ZFO oder ST) adsorbieren verschiedene Dämpfe. Sie können bei Sättigung durch eine Ausheizvorrichtung regeneriert werden. Kondensate können im Kondensatabscheider (KAS oder CT) gesammelt und von Hand abgelassen werden. Chemische Ölfiler (OFC) reinigen das Pumpenöl mithilfe der in der Drehschieberpumpe integrierten Ölpumpe oder extern (DE).

Bei hohen Gasdurchsätzen und auch bei Gasballastbetrieb wird Ölnebel aus der Pumpe mitgerissen. Man rechnet mit 4 ml Ölverlust bei Durchsatz von  $100 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 \text{ Gas}$ . Der Öldampf kann im Ölnebelfilter (ONF oder OME) abgeschieden und mit einer zusätzlichen Rückführung (ONFR oder ODK) in den Ölkreislauf der Pumpe zurückgeführt 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.

### 4.2.3 Portfolioüberblick

Pfeiffer Vacuum Drehschiebervakuumpumpen gibt es in ein- und zweistufiger Ausführung. Saugvermögen und erreichbarer Enddruck sind von der Netzfrequenz abhängig.

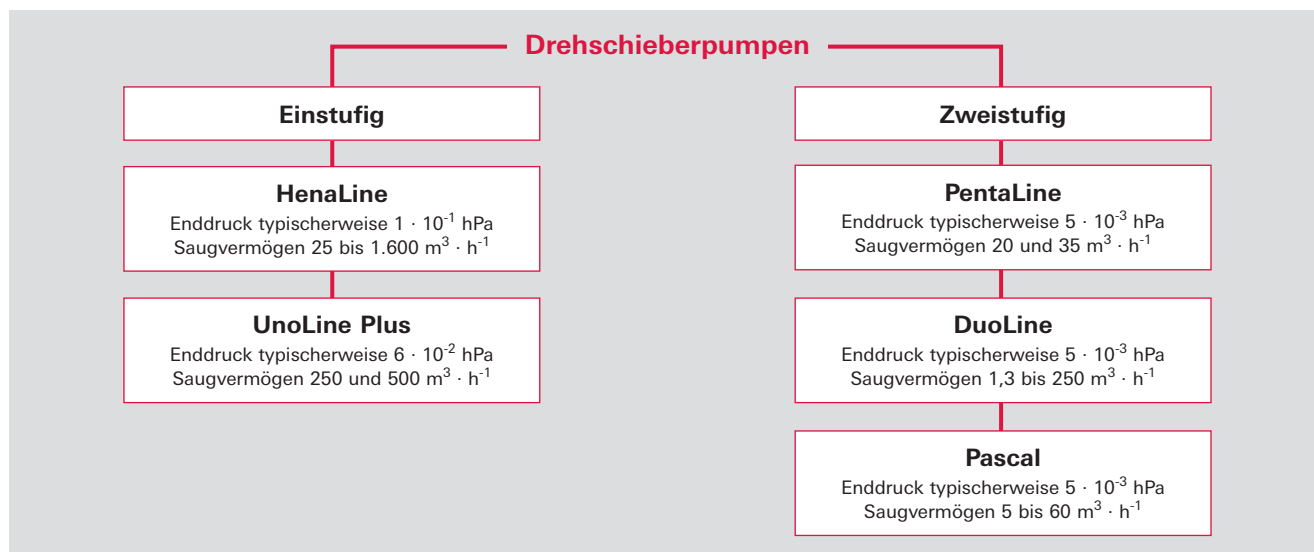


Abbildung 4.3: Pfeiffer Vacuum Drehschieberpumpen

### 4.2.3.1 Einstufige Drehschiebervakuumpumpen

#### HenaLine

Die einstufigen, ölgedichteten Drehschiebervakuumpumpen der HenaLine erzeugen mit einem Saugvermögen von 25 bis 1.600 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> ein Vakuum mit einem Enddruck bis 0,3 hPa. 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 schwierigen Betriebsbedingungen, z. B. bei hohen Ansaugdrücken, sowie im Zyklusbetrieb. Ölnebelabscheider, Ölrückführung und Vakuumsicherheitsventile sind serienmäßig integriert. Sie verhindern nicht nur eine Verschmutzung

der Umgebungsluft, sondern schützen auch Pumpe und Anlage. Ein Gasballastventil ermöglicht das Abpumpen von Wasserdampf und anderen Prozessdämpfen. Die Hena-Pumpen der i-Serie sind speziell für analytische Anwendungen entwickelt worden. Sie zeichnen sich durch einen niedrigeren Enddruck und reduzierten Gasballaststrom aus.

#### UnoLine Plus

UnoLine Plus Pumpen sind optimal einsetzbar bei industriellen Anwendungen. Diese Drehschiebervakuumpumpen haben sich als Einzelpumpen sowie als Vorpumpen für Pfeiffer Vacuum Wälzkolbenpumpen seit Jahren bewährt. Erreicht wird ein Enddruck von etwa 6 · 10<sup>-2</sup> hPa. Die Pumpen sind wassergekühlt und

HenaLine			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
Hena 25	25 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	Elektronenstrahlschweißen, Glühlampenfertigung, Oberflächenbeschichtung, Vakuumtrocknung, Lecksuche, Metallurgie, Gas-Rückgewinnung, Schleusenwendungen, Simulationskammern
Hena 40	40 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 40i	40 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,2 hPa	
Hena 60	63 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 60i	63 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,2 hPa	
Hena 100	100 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 200	200 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 250	250 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 300	300 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 400	400 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 630	630 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,3 hPa	
Hena 1000	1.000 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1,0 hPa	
Hena 1600	1.600 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0,7 hPa	

Tabelle 4.1: Kenndaten HenaLine (alle Angaben für Betrieb an 50 Hz)

UnoLine Plus			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
BA 251	250 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	Geeignet für alle Industrieanwendungen z. B. Metallurgie, Trafotrocknung, Beschichtung, Chemie
BA 501	500 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	6 · 10 <sup>-2</sup> hPa	

Tabelle 4.2: Kenndaten UnoLine Plus (alle Angaben für Betrieb an 50 Hz)

äußerst unempfindlich gegen Stäube und Schmutz. Sie sind mit einer Ölregenerierungseinrichtung ausgestattet. Kondensate, Schmutz und Stäube können, vom Betriebsmittel getrennt, im Abscheider 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.

#### 4.2.3.2 Zweistufige Drehschiebervakuumpumpen

Zweistufige Drehschieberpumpen sind für Anwendungen im Grob- und Feinvakuumbereich bis zu einem Druck von  $10^{-3}$  hPa geeignet. Eine eingebaute Gasballasteinrichtung erlaubt das Abpumpen von kondensierbaren Dämpfen.

##### PentaLine

Pumpen der Baureihe PentaLine zeichnen sich durch ihr neuartiges Antriebskonzept aus. Die Pumpe wird 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 je nach Baugröße ca. 25% bis 50% 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 vermieden, speziell bei kalter Pumpe. Neben der oben angesprochenen Gasballasteinrichtung kann bei der PentaLine die Pumpe zur Erhöhung der Wasserdampfverträglichkeit temperaturgeregelt betrieben werden. Über eine SPS-kompatible Schnittstelle (oder Remoteanschluss) können die Funktionen Pumpe EIN, Standby EIN und erhöhte Wasserdampfverträglichkeit EIN gewählt werden.

##### DuoLine

Die Drehschiebervakuumpumpen 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 MC-Reihe).

##### 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.

PentaLine			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
Penta 20	$22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	Ideal geeignet für Turbopumpstände, Analytik, Industrie, Forschung & Entwicklung, Beschichtung
Penta 35	$34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	

Tabella 4.3: Kenndaten PentaLine

DuoLine			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
DUO 1,6	$1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	Turbopumpstände, Analytik, Forschung & Entwicklung, Beschichtung
DUO 3	$2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 6	$5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 11	$9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 35	$32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 65	$62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 125	$115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 255	$250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	

Tabella 4.4: Kenndaten DuoLine

Duo M-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
DUO 1,6 M	$1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	Turbopumpstände, Analytik, Forschung & Entwicklung, Beschichtung, nicht explosive, toxische Gase
DUO 3 M	$2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 6 M	$5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 11 M	$9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 35 M	$32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 65 M	$62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 125 M	$115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
DUO 255 M	$250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	

Tabella 4.5: Kenndaten Duo M-Reihe

**Duo MC-Reihe**

Pumpen der MC-Reihe sind für Korrosivgasanwendungen geeignet. Sie unterscheiden sich von den Standardpumpen durch ein spezielles Gasballastventil, durch das Inertgas in die Pumpe eingelassen werden kann. Daneben sind die Pumpen mit Spezialschiebern ausgestattet, die besonders resistent gegen Chemikalien sind. Alle Korrosivgaspumpen der MC-Reihe 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.

**Pascal**

Die Drehschiebervakuumumpen der Baugruppe Pascal werden in der Saugvermögensklasse von 5 bis 21 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> alternativ mit Wechsel- oder Drehstrommotoren angetrieben. Einlass- und Auslassflansch können vertikal oder horizontal für bestmögliche Integration oder Anbringung von Zubehör montiert werden. Neben der Standardreihe stehen die I-Reihe mit Zwangsschmierung und zwei unterschiedliche Korrosivgasreihen zur Auswahl.

**SD-Reihe**

Die Drehschiebervakuumumpen der SD-Reihe sind für nicht-korrosive Gase ausgelegt. Ihre Bedarfsschmierung (Saugvermögensklasse bis 21 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>) sorgt für minima-

len Ölauswurf am Auspuff. Durch niedrige Pumpentemperatur wird die Ölrückströmung bei Langzeitbetrieb am Enddruck minimiert.

Wie bei allen anderen Pumpen der Saugvermögensklasse bis 21 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> ist die Wellendichtung der Pumpen ohne Zerlegen des Pumpenblocks zugänglich und ermöglicht so eine leichte Wartung im Feld.

**I-Reihe**

Die Pumpen der I-Reihe sind mit einer Zwangsschmierung ausgerüstet. Damit erzielen sie eine verbesserte Wasserdampfverträglichkeit im Vergleich zur SD-Serie. Durch die Zwangsschmierung erreichen die Pumpen der I-Serie ein sehr geringes Geräuschniveau und niedrige Vibrationen.

**C1-Reihe**

Die zwangsgeschmierten Pumpen der C1-Serie sind durch FPM-Dichtungen und chromoxidbeschichtete Wellen sowie spezielle Materialien für Gehäuse, Schieber, Wellenhülsen und Schaugläser besonders für Korrosivgasanwendungen geeignet. Die beiden größten Modelle der Serie verfügen zusätzlich über integrierte Ölfilter und eine Ölkastenspülung.

Die C1-Serie wird werksseitig für den Einsatz mit Mineralölen vorbereitet.

Duo MC-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
DUO 20 MC	20 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	5 · 10 <sup>-3</sup> hPa	Korrosivgasanwendungen, Chemielabor, toxische, nichtexplosive Gase
DUO 35 MC	32 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
DUO 65 MC	62 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-3</sup> hPa	

Tabella 4.6: Kenndaten Duo MC-Reihe

Pascal SD-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
2005 SD	5 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	Industrie, Analytik, Forschung & Entwicklung, Lecksuche
2010 SD	10 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2015 SD	15 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2021 SD	21 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2033 SD	30 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2063 SD	60 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-3</sup> hPa	

Tabella 4.7: Kenndaten Pascal SD-Reihe

Pascal I-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
2005 I	5 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	Analytik, Forschung & Entwicklung, Trocknung, Destillation
2010 I	10 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2015 I	15 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	
2021 I	21 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-3</sup> hPa	

Tabella 4.8: Kenndaten Pascal I-Reihe

**C2-Reihe**

Die Pumpen der C2-Serie sind ebenfalls zwangsgeschmiert. Ihre Korrosivgasausrüstung übertrifft diejenige der C1-Serie durch Lagerbeschichtung, eine Neutralgasspülung zur Entgasung des Betriebsmittels sowie spezielle Schiebermaterialien. Die beiden größten Modelle der Serie sind zusätzlich mit Anschlüssen für Öldruck- und Öltemperatursensoren ausgestattet. Mit dieser Korrosivgasausrüstung sind die Pascal C2-Pumpen in besonderem Maße für den Einsatz in Ätz- und Beschichtungsprozessen der Halbleitertechnologie geeignet.

Die C2-Serie wird werksseitig für den Einsatz mit perfluorierten Betriebsmitteln vorbereitet.

Pascal C1-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
2005 C1	$5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	Korrosivgasanwendungen, Chemielabors, Schleusen und Transferkammern mit Chemikalienbelastung, Sterilisation
2010 C1	$10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2015 C1	$15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2021 C1	$21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2033 C1	$30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2063 C1	$60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	

**Tabelle 4.9:** Kenndaten Pascal C1-Reihe

Pascal C2-Reihe			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
2010 C2	$10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	Beschichtung, Halbleiter (CVD, Plasmaätzen, Implantation), Pumpen von reinem Sauerstoff
2015 C2	$15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2021 C2	$21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2033 C2	$30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
2063 C2	$60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	

**Tabelle 4.10:** Kenndaten Pascal C2-Reihe

Ölsorte	Beschreibung	Erreichbarer Enddruck	Anwendungen und Eigenschaften	HenaLine, UnoLine Plus, DuoLine, PentaLine, OktaLine	Pascal
P3	Mineralöl für Standardanwendungen Extrem niedriger Dampfdruck	$< 1 \cdot 10^{-3}$ hPa	Luft, nicht-korrosive Gase, Edelgase	■	
A120	Mehrzweck-Mineralöl ohne Additive, Universalöl für 50 Hz	$< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa	Luft, nicht-korrosive Gase, Edelgase; hohe Viskosität		■
D1	Diesteröl für Standard- und Sonderapplikationen	$< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa	Luft, nicht-korrosive Gase, Edelgase, Sauerstoff, schwach aggressive und organische Lösungsmittel	■	
A155	Synthetiköl auf organischer Esterbasis	$< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa	Kohlenwasserstoffhaltige Dämpfe, NH <sub>3</sub> , R134a, Kältemittel; oxidationsbeständig, beständig gegen Polymerisation (geringe Ablagerung)		■
F4 F5	Perflourpolyether für Sonderapplikationen	$< 1 \cdot 10^{-3}$ hPa	Sauerstoff, Ozon, Halogene, organische und anorganische Lösungsmittel, HCl, BF <sub>3</sub> , HF	für Pumpen $< 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ für Pumpen $> 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	
A113	Perflourpolyether-Synthetiköl	$< 5 \cdot 10^{-3}$ hPa	Sauerstoff, Ozon, Halogene, organische und anorganische Lösungsmittel; hochbeständig gegen korrosive Gase, geeignet für Plasmaätzen		■
A119	Mehrzweck-Mineralöl ohne Additive, Universalöl für 60 Hz	$< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa	Luft, nicht-korrosive Gase, Edelgase; niedrige Viskosität, dadurch gute Anlaufeigenschaften bei niedrigen Temperaturen		■
A121	Zweifach destilliertes mineralisches Synthetiköl mit Antioxidansadditiv	$< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa	Zyklisches Pumpen auf Atmosphärendruck, für hohe Temperaturen und Drücke, beständig gegen saure und organische Dämpfe; nicht für Plasmaätzen geeignet		■
A102	Mineralöl mit Antiemulgieradditiv	$< 3 \cdot 10^{-2}$ hPa	Trennung Wasser/Öl (antiemulgierend), Trocknung und Pumpen von Wasserdampf, Gefriertrocknung		■
A111	Temperaturstabiles, mineralisches Synthetiköl	$< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa	Gasumlauf und Rückführung; oxidationsempfindlich (für häufige Zyklen auf Atmosphärendruck nicht geeignet)		■
A200	Zweifach destilliertes Mineralöl ohne Additive	$< 2 \cdot 10^{-3}$ hPa	Beständig gegen korrosive Gase und gegen ionisierendes Plasma; geringe Rückströmung		■
A300	Mineralisches zweifach destilliertes Weißöl ohne Additive	$< 5 \cdot 10^{-3}$ hPa	Hochbeständig gegen korrosive Gase und gegen ionisierendes Plasma, beständig gegen Halogene und Lewis-Säuren; geringe Rückströmung		■

Tabelle 4.11: Ölarten für Vorpumpen und Wälzkolbenpumpen

#### 4.2.3.3 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 verschiedene Betriebsmittelsorten an, die allen gängigen Anwendungen gerecht werden. Die Pumpen sind ab Werk auf jeweils ein Betriebsmittel voreingestellt. Nur bei Verwendung dieses von Pfeiffer Vacuum vorgeschlagenen Betriebsmittels können die im Katalog angegebenen Leistungsdaten der Drehschiebervakuumpumpen gewährleistet werden. Für Schäden, die auf den Einsatz anderer Betriebsmittel zurückzuführen sind, kann keine Gewährleistung übernommen werden. Verschiedene Öle dürfen untereinander nicht vermengt werden. Sie sind teilweise nicht mischbar und können deshalb zu Schäden am Pumpsystem führen.

#### 4.2.3.4 Zubehör

##### Staubabscheider (SAS oder DFT)

Wenn prozessbedingt Stäube anfallen, muss der Pumpe ein Staubabscheider vorgeschaltet werden, da Partikel zu erhöhtem Verschleiß führen und den Schmiermittelkreislauf verstopfen können. Entsprechend dem Anschlussflansch der Pumpe stehen verschiedene Ausführungen zur Verfügung.

##### Kondensatabscheider (KAS oder CT)

In den Ansaug- und Auspuffleitungen eines Vakuumsystems können sich beim Abpumpen von Dämpfen Kondensate bilden, die zu Korrosion führen und die Eigenschaften des Schmiermittels beeinträchtigen. 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 oder OME)**

Ölnebelabscheider, auch Ölnebelfilter genannt, werden auf den Auspuffstutzen von Drehschiebervakuumpumpen 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 Kunststoff- oder Aluminiumgehäuse mit Ölsammelraum.

**Ölrückführungseinrichtung (ORF oder ODK)**

Ölrückführungen dienen zum Sammeln und Rückführen von vernebeltem Pumpenöl. Sie werden bei allen Anwendungen eingesetzt, bei denen es zu hohem Betriebsmittelaustrag aus der Drehschieberpumpe kommt, vor allem also bei Hochdruckanwendungen oder häufigem zyklischen Betrieb. Ihr Einsatz führt zu einer Senkung der Betriebskosten und höherer Prozessstabilität, vor allem bei der Verwendung von Spezialölen, in der Fluor- und Kerntechnik. Dabei wird das im Ölnebelabscheider anfallende Öl in einem Behälter gesammelt und in die Vakuumpumpe zurückgeführt.

**Zeolithfalle (ZFO oder ST)**

Die Zeolithfalle verhindert durch Adsorption die Rückströmung von Kohlenwasserstoffen aus Drehschiebervakuumpumpen zu einlassseitigen Vakuumbauteilen oder -rezipienten. Durch Ausheizen kann das Adsorptionsmittel regeneriert werden. Die Regenerationsintervalle sind prozessabhängig.

**Katalysatorfalle (URB)**

Die Katalysatorfalle verhindert eine Rückströmung von Kohlenwasserstoffen aus ein- oder zweistufigen Drehschiebervakuumpumpen durch katalytische Verbrennung derselben zu Kohlendioxid 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 einer Vielzahl von Chemikalien eingesetzt. Dazu zählen Schwefelwasserstoff, Cyanide, Quecksilber, Ammoniak, Schwefeloxide, nitrose Gase sowie dampfförmige Lösungsmittel, Säuren und Basen. Die Aktivkohlefilter werden mit einer Erstfüllung geliefert. Ein Austausch der Aktivkohlefüllung ist möglich. Ihre Standzeit ist prozessabhängig.

**Mechanische und chemische Ölfilter (OFM, OFC oder DE)**

Das chemische Ölfilter wird in den Ölkreislauf von Drehschieberpumpen gesetzt. Mit dem Ölfilter werden Stäube bzw. Partikel herausgefiltert, die aus dem Prozess in das Betriebsmittel gelangen. Außerdem absorbiert das chemische Ölfilter korrosive Substanzen aus dem Öl. Damit wird der Verschleiß der Pumpe reduziert und so ihre Standzeit erhöht.

**Stickstoffkühlfalle (KLF oder LNT)**

Stickstoffkühlfallen werden zwischen Vakuumanlage und Drehschieberpumpe eingesetzt. Sie frieren kondensierbare Medien aus dem Prozessgasstrom aus. Damit können Drehschieberpumpen wirkungsvoll vor Chemikalien- oder Lösungsmittelangriff geschützt werden. Die Fallen sind in Standardversion aus Aluminium oder in korrosionsstabiler Edelstahlversion erhältlich. Der Kältemittelverbrauch und die Standzeit richten sich nach der Anwendung.

Beim Abpumpen tiefkalter Behälter kann eine Kühlfalle auch den Rezipienten vor zurückströmenden Betriebsmitteldämpfen aus der Drehschieberpumpe schützen.

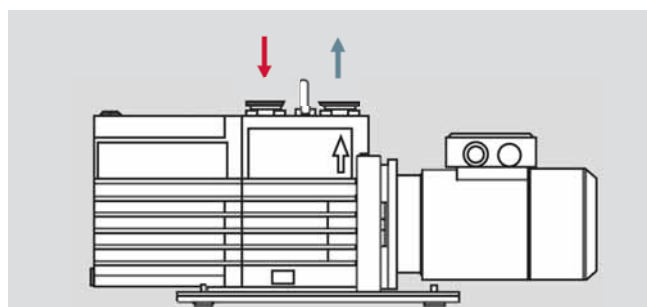
**Automatisches Gasballastventil (AGB)**

Das automatische Gasballastventil ist die elektrische, ferngesteuerte Ausführung des handbetätigten Gasballastes. Es besteht aus einem elektromagnetischen Ventil (stromlos geschlossen), das eine Gaseinleitung in die Hochdruckstufe der Pumpe ermöglicht. Der automatische Gasballast kann an eine Neutralgasquelle angeschlossen werden. Das automatische Ventil sollte bei häufiger Verwendung oder eingeschränktem Zugang zur Pumpe eingesetzt werden.

**Ölstandsüberwachung (OLS)**

Eine Ölstandsüberwachung wird direkt an der Drehschieberpumpe zwischen Ölkasten und Schauglas montiert. Muss eine große Anzahl an Pumpen überwacht werden oder ist die Pumpe in einer schwer zugänglichen Betriebsumgebung installiert, erlaubt die OLS eine komfortable Überwachung der Pumpen.

Für ausgewählte Pumpentypen sind Überwachungseinheiten (Operations Monitoring Units) erhältlich, die entweder einen oder mehrere Betriebsparameter der Drehschieberpumpe überwachen. Dazu zählen Öldruck, Ölfüllstand, Temperatur des Betriebsmittels und Auspufftemperatur.



Einlassseitiges Zubehör	Zubehör für Prozess und Überwachung	Auslassseitiges Zubehör
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Staubabscheider</li> <li>■ Zeolithfalle</li> <li>■ Katalysatorfalle</li> <li>■ Kondensatfalle</li> <li>■ Aktivkohlefilter</li> <li>■ Stickstoffkühlfalle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mechanische und chemische Ölfilter</li> <li>■ Automatisches Gasballastventil</li> <li>■ Ölstandsüberwachung, Öldrucküberwachung, Öltemperaturüberwachung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ölnebelabscheider</li> <li>■ Ölrückführungseinrichtung</li> <li>■ Kondensatfalle</li> </ul>

Abbildung 4.4: Zubehör für Drehschieberpumpen

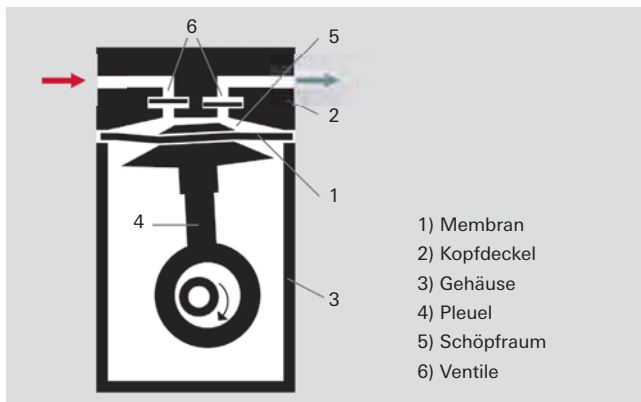


Abbildung 4.5: Funktionsprinzip einer Membranvakuumpumpe

## 4.3 Membranvakuumpumpen

### 4.3.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Membranvakuumpumpen sind trockene Verdrängerpumpen. Ein von einer Kurbelwelle 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 Elastomerwerkstoffen verwendet. Da der Schöpfraum durch die Membran zum Antrieb hin hermetisch abgedichtet ist, wird das geförderte Medium weder durch Öl verunreinigt, noch können aggressive Medien die Mechanik angreifen. Das Totvolumen zwischen dem Auslassventil und dem Schöpfraum führt zu einem begrenzten Kompressionsverhältnis, sodass mit einer Pumpstufe nur ein Enddruck von ca. 70 hPa erreicht werden kann. Durch Hintereinschalten mehrerer Pumpstufen ist ein Enddruck von 0,5 hPa erreichbar. Kleinere Drücke können nicht erzielt 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.  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 4.3.2 Anwendungshinweise

Aufgrund ihres kohlenwasserstofffreien Schöpfraums sind Membranpumpen besonders gut als trockene Vorpumpen für Turbomolekularpumpen mit Holweckstufe geeignet. Schon zweistufige Membranpumpen, die etwa

5 hPa Enddruck erreichen, kann man als Vorpumpen für Holweckturbo-pumpen verwenden. Das saubere Vakuum wird besonders bei Analytik- und F&E-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 Gasballast, müssen geeignete Abscheider bzw. Kühlfallen vorgeschaltet werden, um eine stärkere Kondensatbildung in der Pumpe zu verhindern. Trotzdem wird sich der Enddruck erhöhen.

### 4.3.3 Portfolioüberblick

Membranpumpen von Pfeiffer Vacuum unterscheiden sich in Enddruck, Saugvermögen und Korrosivgastauglichkeit. Das Saugvermögen der Pumpen liegt zwischen  $3$  und  $160 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $0,25 - 9,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Es werden Enddrücke von  $< 4 \text{ hPa}$  bei zweistufigen Pumpen und  $< 0,5 \text{ hPa}$  bei vierstufigen Pumpen erreicht. Saugvermögen und erreichbarer Enddruck sind von der Netzfrequenz abhängig.

Für Anwendungen mit korrosiven Gasen stehen Pumpen in Korrosivgasausführung mit beschichteten Membranen und korrosionsfesten Gehäusen zur Verfügung.

Die Bezeichnungen der Pumpen sind so gewählt, dass sich das Saugvermögen in  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  und die Anzahl der Pumpstufen direkt ablesen lassen. Korrosivgaspumpen tragen am Ende der Typenbezeichnung den Buchstaben C.

### 4.3.4 Zubehör

Als Zubehör für Membranpumpen sind erhältlich:

- Einschraubflansche und Flanschadapter
- Spülgasanschlüsse
- Vorkammerrelaisboxen
- Netzteile für Wand- oder Normschienenmontage
- Verbindungskabel zum Turbopumpenantrieb

Membranpumpen			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
MVP 003-2	$0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 7,0 \text{ hPa}$	Kleine Turbopumpstände (ideal mit HiPace 10 und HiPace 80), mobile Analysegeräte, Regenerierung Helium-Lecksucher Minitest
MVP 006-4	$0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 2,0 \text{ hPa}$	
MVP 015-2	$0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 3,5 \text{ hPa}$	Turbopumpstände, Lecksucher, Forschungslabors, Analytik, Chemie
MVP 015-4	$0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 0,5 \text{ hPa}$	
MVP 030-3	$1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 2,5 \text{ hPa}$	
MVP 040-2	$2,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 4,0 \text{ hPa}$	
MVP 070-3	$3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 1,0 \text{ hPa}$	
MVP 070-3 C	$3,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\leq 1,5 \text{ hPa}$	Korrosivgasanwendungen, bei denen ein kohlenwasserstofffreies Vakuum benötigt wird

Tabelle 4.12: Kenndaten von Membranpumpen

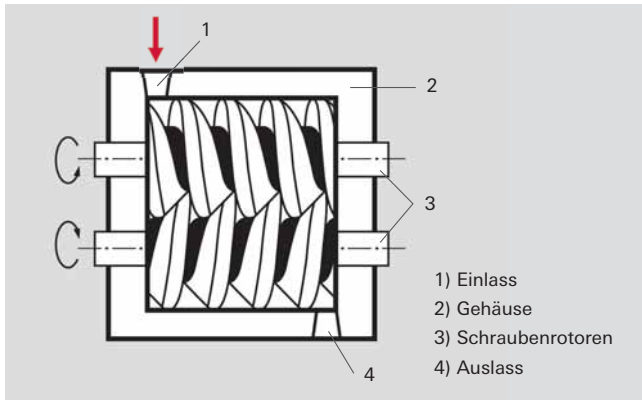


Abbildung 4.6: Funktionsprinzip der Schraubenvakuumpumpe



Abbildung 4.7: Rotoren der HeptaDry

## 4.4 Schraubenvakuumpumpen

### 4.4.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Zwei parallel gelagerte, ineinandergreifende Schraubenrotoren (3) mit gegenläufigen Gewinden drehen sich gegenseitig synchron ohne gegenseitige Berührung in einem zylinderförmigen, sie eng umschließenden Gehäuse (2). Diese Anordnung bildet eine mehrstufige Pumpe. Durch den gegenseitigen Eingriff der beiden Rotoren werden in jedem Gewindegang abgeschlossene Volumina entlang der Rotoren zum Auslass (4) hin transportiert. Die Pumpe hat weder am Einlass (1) noch am Auslass Ventile. Wenn ein Fördervolumen die Auslassöffnung erreicht, findet 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. Durch innere Verdichtung lässt sich diese Verlustleistung vermindern. Durch Reduzierung der Gewindesteigung in Richtung des Auslasses wird eine innere Verdichtung erreicht. Die Spaltweite zwischen dem Gehäuse und den Rotoren sowie zwischen den Rotoren untereinander bestimmt den erzielbaren Enddruck einer Schraubenvakuumpumpe. Großen Einfluss auf den Enddruck haben auch die Geometrie und die dadurch vorgegebene Spaltform beim Profileingriff zwischen den Rotoren.

Da die Verlustleistung, die durch den pulsierenden Gasstrom erzeugt wird, die Pumpe auf der Auslassseite aufheizt, ist 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 ( $p < 1$  hPa) 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 Schraubenvakuumpumpe mit innerer Verdichtung. Die Schraubenrotoren weisen eine

asymmetrische Geometrie mit variabler Steigung auf. Sie 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.

### 4.4.2 Anwendungshinweise

In den letzten Jahren verdrängen wassergekühlte Schraubenvakuumpumpen und die im folgenden Abschnitt vorgestellten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen im Bereich großer Saugvermögen ( $100\text{--}600\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) vor allem ölgeschmierte Drehschieberpumpen.

Vorteile der Schraubenvakuumpumpen:

- Kein Schmiermittel im Bereich der Gasförderung
- Keine Verunreinigungen des Fördermediums
- Keine Entsorgungsprobleme in Bezug auf das Betriebsmittel
- Hoher Wirkungsgrad durch innere Verdichtung
- Nahezu konstantes Saugvermögen zwischen 1 und 1.000 hPa
- Gute Flüssigkeits- und Partikelverträglichkeit
- Ideale Vorpumpe für Wälzkolbenpumpen

HeptaDry Schraubenvakuumpumpen sind deshalb gut geeignet für Chemieanwendungen oder Prozesse mit Staubanfall z. B. in der Kristallzucht 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 und somit werden eventuell vorhandene Klimaanlage entlastet und deren Energieverbrauch gesenkt.

Haupteinsatzgebiete von Schraubenvakuumpumpen:

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

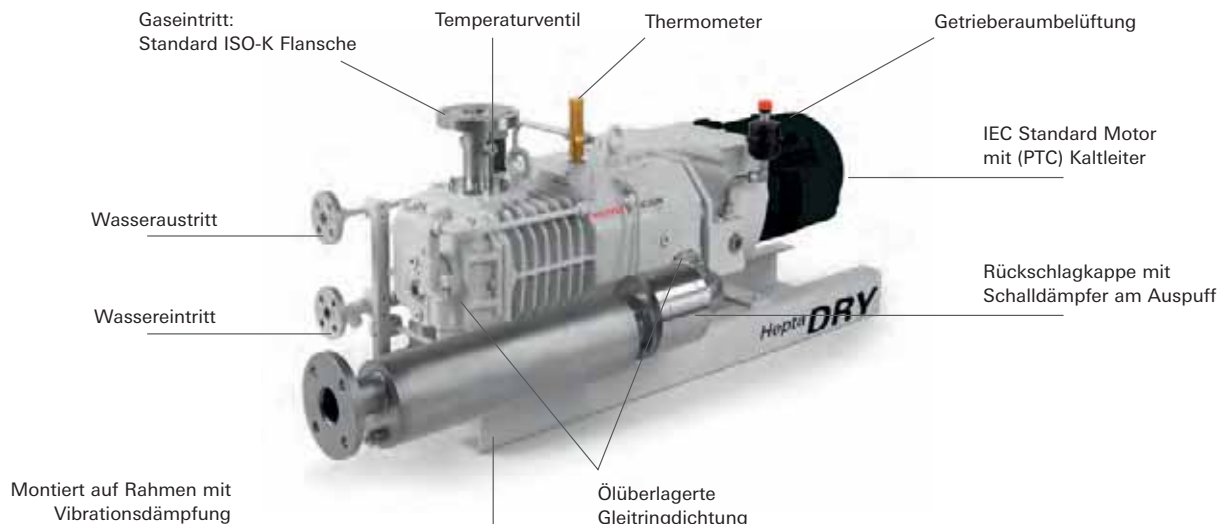


Abbildung 4.8: HeptaDry mit Anschlüssen und Zubehör

#### 4.4.3 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 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>. Es werden Enddrücke unter 0,1 hPa erreicht. Saugvermögen und erreichbarer Enddruck sind von der Netzfrequenz abhängig.

Unabhängig vom Modell kann die HeptaDry in ihrem jeweiligen Arbeitsbereich kontinuierlich betrieben werden. Im Druckbereich p < 1 hPa sinkt das effektive Saugvermögen wegen der immer stärker werdenden Rückströmung zwischen den einzelnen abgesperrten Volumina innerhalb der Pumpe. Die Abnahme des Saugvermögens zu hohem Druck hin hat eine ähnliche Ursache, da hier das Gas durch innere Verdichtung auf Drücke größer als Atmosphärendruck verdichtet wird und deshalb die Rückströmung wegen des hohen Differenzdrucks stark zunimmt.

Zur Standardausrüstung der Pumpe zählen: Ansaugsieb, Wasserdurchlaufkühlung mit Thermostatventil und Thermometer, Schalldämpfer mit auslassseitiger Rückschlagkappe und Aufbau mit Vibrationsdämpfern auf einem Rahmen. Als Antrieb dient ein dreiphasiger Asynchronmotor mit Temperaturüberwachung für 50 und 60 Hz (3.000 bzw. 3.600 U min<sup>-1</sup>).

#### 4.4.4 Zubehör

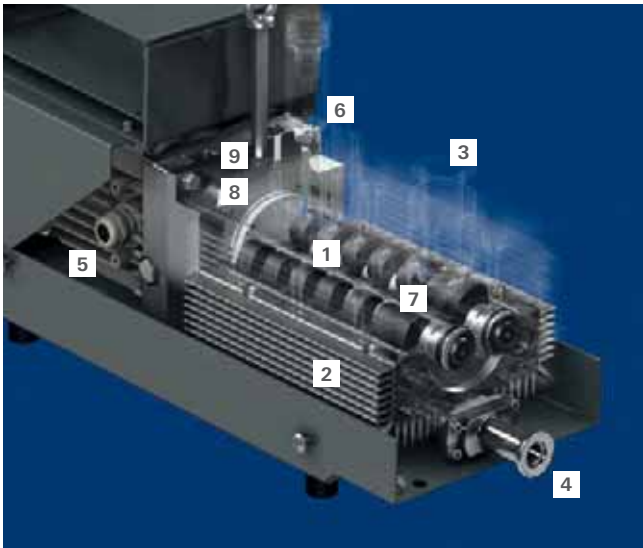
Als Zubehör für die Schraubenpumpen sind Staubabscheider (SAS) erhältlich. Entsprechend dem Anschlussflansch der Pumpe stehen verschiedene Ausführungen zur Verfügung.

Als Betriebsmittel wird Diesteröl D1 eingesetzt.

HeptaDry-Reihe				
Typenbezeichnung	Saugvermögen bei 50 Hz	Saugvermögen bei 60 Hz	Enddruck bei 50 Hz	Enddruck bei 60 Hz
Hepta 100 P	110 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	130 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	< 5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	< 1 · 10 <sup>-2</sup> hPa
Hepta 200 P	220 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	265 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	< 5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	< 1 · 10 <sup>-2</sup> hPa
Hepta 300 P	320 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	410 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	< 5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	< 1 · 10 <sup>-2</sup> hPa
Hepta 400 P	350 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	420 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	< 5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	< 1 · 10 <sup>-2</sup> hPa
Hepta 600 P	525 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	630 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	< 5 · 10 <sup>-2</sup> hPa	< 1 · 10 <sup>-2</sup> hPa

Tabelle 4.13: Kenndaten HeptaDry





**Abbildung 4.9:** Funktionsprinzip der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe, luftgekühlt

## 4.5 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen – Vakuumerzeugung

### 4.5.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Ein- und mehrstufige Wälzkolbenpumpen sind technisch trocken laufende Rotationsverdränger-Vakuumpumpen. Sie werden auch als Rootspumpe oder Rootsgebläse bezeichnet. Die Reihe der in diesem Kapitel vorgestellten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen wird ACP-Reihe (Adixen Clean Pump) genannt.

In der Pumpe drehen sich zwei gegenläufig synchron laufende Rotoren (1) berührungslos in einem Gehäuse (2) (Abbildung 4.9). Die Rotoren haben die Form einer „Acht“ und sind voneinander und vom jeweiligen Stator durch einen engen Spalt getrennt. Auf den Wellen der Rotoren sitzen vier bis sechs Rotorpaare. Die einzelnen Rotorräume sind durch Statorscheiben mit Gasdurchlass voneinander getrennt. Das geförderte Gas wird von der Ansaugöffnung (3) zur Auslassöffnung (4) transportiert.

Eine Welle wird durch einen Motor (5) angetrieben. Die Synchronisation der anderen Welle erfolgt über ein Zahnradpaar (6) im Getrieberaum. Die Schmierung beschränkt sich auf den vom Schöpfraum (7) durch Wellendichtungen (8) abgetrennten Getrieberaum sowie gekapselte Niederdruck- und Hochdrucklager (9).

Da im Schöpfraum keine Reibung auftritt, kann die Wälzkolbenpumpe mit hoher Drehzahl bis zu  $6.000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$  betrieben werden. Die symmetrische Massenverteilung der Rotoren um die Wellenachse erlaubt zudem eine einwandfreie dynamische Auswuchtung, sodass die Pumpe trotz hoher Drehzahlen sehr ruhig läuft.

### 4.5.2 Anwendungshinweise

Trockene, luftgekühlte mehrstufige Wälzkolbenpumpen der ACP-Reihe bieten durch ihre Bauform und ihre Leistungsparameter oft die Möglichkeit, ölgeschmierte Drehschieberpumpen im verfügbaren Saugvermögensbereich direkt zu ersetzen.

Vorteile der mehrstufigen Wälzkolbenpumpen:

- Kein Schmiermittel im Bereich der Gasförderung
- Keine Verunreinigungen des Fördermediums durch Öl oder Partikel
- Keine Entsorgungsprobleme in Bezug auf das Betriebsmittel
- Konstante, langzeitstabile Vakuumparameter
- Hohe Zuverlässigkeit durch minimale Anzahl von Verschleißteilen
- Mit ein- oder dreiphasigem Frequenzumrichter konstante Betriebsparameter an jeder Spannungsversorgung und Netzfrequenz, universeller Netzanschluss
- Luftkühlung, keine Installations- und Betriebskosten für Wasserkühlung
- Permanent gegen hohe Einlassdrücke zu betreiben
- Lange Serviceintervalle, dadurch niedrige Betriebskosten
- Fernsteuermöglichkeit durch Frequenzumrichter
- Optimale Anpassung an die Anwendung durch einstellbare Drehzahl, Reduzierung von Schallpegel, Energieverbrauch und Leistungsaufnahme
- Niedrigste Leckagerate
- Ideale Vorpumpe für Turbo- und Wälzkolbenpumpen
- Zertifiziert nach UL/CSA und SEMI S2

### Dämpfe

Ohne zusätzliche Maßnahmen besteht bei ölfreien Pumpen durch ihre vergleichsweise niedrige Betriebstemperatur die Gefahr der Kondensation innerhalb der Pumpe. Ähnlich wie bei Drehschieberpumpen können die mehrstufigen Wälzkolbenpumpen mit einem Gasballastventil ausgestattet werden, um die Wasserdampfverträglichkeit und die Wasserdampfkapazität der Pumpe zu erhöhen. Eine Kondensatbildung innerhalb der Pumpe resultiert in einer Erhöhung des Enddrucks, führt zu Korrosion und schlimmstenfalls zum Totalausfall der Pumpe.

ACP-Pumpen können ohne Gasballast Medien mit einer Feuchtigkeit bis zu 5% fördern. Mit dem Gasballast der Standardpumpe beträgt die Wasserdampfverträglichkeit 10 hPa und die Wasserdampfkapazität  $100 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ . Mit einem erhöhten Gasballastdurchsatz in speziellen Versionen der Pumpen (CV, Condensable Vapors) können je nach Umgebungstemperatur Wasserdampfverträglichkeiten um 100 hPa und Wasserdampfkapazitäten von 700 bis  $1.000 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$  erreicht werden.

Ähnlich wie bei Drehschieberpumpen gilt: Vor dem Abpumpen von Dämpfen sollte die Pumpe mindestens eine halbe Stunde mit Gasballast warmgelaufen sein. Die höhere Temperatur des Pumpenblocks reduziert die Kondensation. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Kondensation sind ein möglichst geringer Auslassdruck und eine getrennte Abscheidung der Kondensate. Staudruck am Auslass durch eine vertikale Abgasführung muss vermieden werden. Falls eine Absaugung vorhanden ist, sollte der Auslass daran angeschlossen werden.

### Stäube und Partikel

Die mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der ACP-Serie können durch unkontrollierten Eintrag größerer Partikel im schlimmsten Fall verblocken und einen Totalausfall erleiden. Daher werden bei staubbeladenen Prozessen oder z. B. in der Glasverarbeitung zum Schutz vor Bruch einlassseitig Filter installiert.

**Korrosive Gase**

Die Pumpen der ACP-Reihe eignen sich nicht für das Abpumpen von großen Mengen korrosiver Gase. Für diese Aufgabe stehen mehrstufige Wälzkolbenpumpen für Korrosivgasprozesse der Halbleiter-, Solar- und Beschichtungstechnik zur Verfügung (siehe Kapitel 4.6). Trotzdem können mit Pumpen der ACP-Reihe mindestens Spuren korrosiver Gase gefördert werden. Dazu werden Versionen mit Inertgasspülung eingesetzt, bei denen die Lager durch einen Inertgasvorhang geschützt und Prozessgase durch Inertgaseinlass in einer der Pumpstufen verdünnt werden.

**Leckrate**

Die hohe Dichtheit macht die mehrstufige Wälzkolbenpumpe zur perfekten Lösung für Langzeitanwendungen und Gaskreisläufe mit teuren Gasen (<sup>4</sup>He, <sup>3</sup>He, isotope-markierte Gase).

**Leichte Gase und Hochvakuum**

Die mehrstufigen Wälzkolbenpumpen haben ein Auslassventil zum Schutz des Schöpfraums vor Rückdiffusion von Luftfeuchtigkeit und Sauerstoff, was in Korrosivgasanwendungen chemische Reaktionen in der Pumpe nach sich ziehen würde. Dieses Ventil muss in Anwendungen, in denen Vakuum erzeugt werden soll, in periodischen Abständen geöffnet werden (z. B. durch Gasballast), um die Ansammlung und Rückdiffusion leichter Gase zu verhindern.

Bereits ein leichter Unterdruck am Auspuff oder der Einsatz von Gasballast genügt, um auch einen permanenten

Gasdurchsatz von Helium, z. B. in einem Verdampfer-'kryostaten, mit annähernd denselben Leistungsdaten wie Stickstoff oder Luft zu fördern.

In Anwendungen, in denen sich der Einsatz von Schleppegas verbietet (z. B. in Kreislaufanwendungen), muss am Auslass der Pumpe Unterdruck herrschen.

**4.5.3 Portfolioüberblick ACP**

Die ACP ist eine luftgekühlte, trockene mehrstufige Wälzkolbenpumpe für Anwendungen im Grob- und Feinvakuumbereich. Die Saugvermögen der Produktreihe reichen von 14 bis 37 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>. Es werden Enddrücke unter 0,1 hPa erreicht. Saugvermögen und erreichbarer Enddruck sind von der am Frequenzkonverter gewählten Drehzahl abhängig.

Unabhängig vom Modell kann die ACP in ihrem jeweiligen Arbeitsbereich bei jedem Arbeitsdruck kontinuierlich betrieben werden.

Die ACP-Pumpen können durch Zugabe von Gasballast bzw. Sperrgas an unterschiedlichen Stellen der Pumpe unterschiedlich konfiguriert und auf eine Vielzahl von Anwendungen optimiert werden.

**4.5.3.1 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen, luftgekühlt**

Die in Tabelle 4.14 gezeigten Ausführungen sind sowohl mit dreiphasigem als auch mit einphasigem Netzanschluss verfügbar. Unabhängig von Netzspannung und -frequenz sind alle Pumpen mit einem Frequenzumrichter ausgerüstet.

Konfigurationen von luftgekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen						
Typenbezeichnung	Standardausführung			„G“-Ausführung für korrosive Gase	„CV“-Ausführung für kondensierbare Medien	
	Ohne Gasballast	Manuelles Gasballastventil	Permanenter Gasballast mit Einlassfilter		Manuelles Gasballastventil	Permanenter Gasballast mit Einlassfilter
ACP 15	■	■	■	■		
ACP 28	■	■	■	■	■	■
ACP 40	■	■	■	■	■	■

Tabelle 4.14: Mögliche Konfigurationen von luftgekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen

Luftgekühlte mehrstufige Wälzkolbenpumpen			
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck ohne/mit* Gasballast	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
ACP 15	14 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-2</sup> hPa	Nicht-korrosive Gase, Argon, Vorpumpen für Turbopumpen
ACP 28	27 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-2</sup> hPa	
ACP 40	37 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	3 · 10 <sup>-2</sup> hPa	
ACP 15	14 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	Standardanwendungen mit einer Luftfeuchtigkeit > 5% oder Desorption von Kammerwänden, Regenerierung von Kryopumpen
ACP 28	27 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	
ACP 40	37 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	
ACP 15G	14 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	Schleusen und Transferkammern, Vorpumpen für Turbopumpen mit hohem Anfall an leichten Gasen, Prozessgase mit geringem Anteil an korrosiven Gasen, partikelbeladene Prozessgase, Sauerstoff und oxidierende Medien
ACP 28G	27 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	
ACP 40G	37 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	
ACP 28CV	27 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	Trocknung, Destillation, Anwendungen mit verdampfenden Flüssigkeiten
ACP 40CV	37 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	2 · 10 <sup>-1</sup> hPa*	

Tabelle 4.15: Kenndaten von luftgekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen



### 4.5.3.2 Zubehör

#### Partikelfilter (IPF)

Wenn prozessbedingt Stäube und Partikel anfallen, muss der Pumpe ein Partikelfilter vorgeschaltet werden, um ein Verblocken der Pumpe zu verhindern. Entsprechend dem Anschlussflansch der Pumpe stehen verschiedene Ausführungen zur Verfügung. Die effektive Maschenweite der Filter beträgt 25 µm. Auf Anfrage stehen weitere Filtertypen und andere Maschenweiten zur Verfügung.

#### Schalldämpfer (ES)

Der auslassseitige Schalldämpfer ES 25S reduziert den Geräuschpegel der Pumpen speziell bei hohen Arbeitsdrücken nahe dem atmosphärischen Druck. Er hat keinen Einfluss auf den Geräuschpegel der Pumpe nahe dem Enddruck.

#### Schallschutzhauben (NRC und SEK)

Schallschutzhauben reduzieren den Schalldruck der ACP-Pumpen auch bei Betriebsdrücken nahe dem Enddruck. Hauben des Typs NRC reduzieren den Schalldruck um etwa 5 bis 6 dB(A) und beschränken die maximale Umgebungstemperatur auf 35 °C. Hauben des Typs SEK reduzieren den Schalldruck um etwa 10 dB(A) und beschränken die maximale Umgebungstemperatur auf 30 °C.

## 4.6 Mehrstufige Wälzkolbenpumpen – Prozesse im Vakuum

In der Halbleiterindustrie werden mikroelektronische Bauteile auf der planaren Oberfläche eines Einkristalls aufgebaut. Im Produktionsprozess werden Schichten mit bestimmten elektrischen Eigenschaften (Isolatoren, Leiterbahnen und Schichten mit bestimmten Leitfähigkeitseigenschaften) übereinander aufgebracht. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der benachbarten Schichten entstehen elektronische Bauelemente wie Transistoren, Kondensatoren, Widerstände, etc.

In einer Vielzahl von Einzelprozessen bei der Produktion integrierter Schaltungen, z. B. bei der Dotierung des Halbleiter-Ausgangsmaterials, dem Schichtwachstum, der Strukturierung und auch bei der Analytik, wird Vakuumtechnik eingesetzt. Die Produktion findet in Reinräumen statt. Vakuumpumpen werden entweder direkt im Reinraum an den Produktionsanlagen eingesetzt oder in einem darunterliegenden eigenen Pumpengeschoss (Basement).

Die Prozesse stellen unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten Pumpen. Prozesse ohne korrosive, toxische oder kondensierbare Medien können mit Pumpen ohne besondere Korrosivgasausrüstung betrieben werden. Dazu zählen z. B.

- Schleusen und Transferkammern
- PVD (Physical Vapor Deposition) von Metallen ohne Reaktivgasatmosphäre
- Implanter (Beam Line und End Station)
- Annealing (Ausheilen von Kristalldefekten durch Ausheizen) unter Vakuum oder Inertgasatmosphäre
- Waferinspektion

Die eingesetzten Pumpen (L-Reihe) werden in Kapitel 4.6.3 beschrieben. Durch den Einsatz der Pumpen direkt im Reinraum können Vorvakuumleitungen ins Pumpengeschoss und ihre eventuelle Beheizung eingespart, Leitwertverluste verringert und weltweit reproduzierbare Installationen mit hoher Prozessstabilität erreicht werden.

Mittelschwere Prozesse können korrosive Chemikalien mit Kondensationsneigung beinhalten, erzeugen jedoch keine Partikel. Dazu zählen unterschiedliche Verfahren wie

- Oxidation, Veraschen
- RTP (Rapid Thermal Processing; Waferbearbeitung in Hochtemperaturprozessen durch Halogenlampen mit hoher Leistung)
- Trockenätzen von polykristallinem Silicium, Aluminium oder Wolfram
- Implanter (Quellen)
- einige CVD-Verfahren

Die eingesetzten Pumpen (P-Reihe) werden in Kapitel 4.6.4 beschrieben. Aus Sicherheitsgründen und aufgrund der Nähe zum Abgasreinigungssystem werden Prozesspumpen häufig im Basement installiert.

Die anspruchsvollsten Prozesse (Harsh Processes, Pumpen der H-Reihe) erfordern den Umgang mit Partikeln, hochkorrosiven Chemikalien oder Reaktionsnebenprodukten und Chemikalien oder Reaktionsnebenprodukten mit Kondensationsneigung. Beispiele für derartige Prozesse sind:

- MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) von Titanitrid
- Isotropes Trockenätzen von Dielektrika
- HDP CVD (High Density Plasma Chemical Vapor Deposition) von Siliciumdioxid
- SACVD (Sub Atmospheric Chemical Vapor Deposition) von Siliciumdioxid
- SACVD HARP (Sub Atmospheric Chemical Vapor Deposition, High Aspect Ratio Process) von Siliciumdioxid

Teilweise werden für diese Verfahren auch Kombinationen von Turbomolekularpumpen (siehe Kapitel 4.9.3.2) und Prozesstrockenläufern eingesetzt.

Die zuvor genannten Prozesse für die P- und H-Pumpen benutzen Chemikalien mit z. B.

- hoher Toxizität, wie Arsin ( $\text{AsH}_3$ ) oder Phosphin ( $\text{PH}_3$ )
- hoher Korrosivität wie plasmaaktiviertem Stickstofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ), Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), Fluor-Kohlenstoffen, etc.
- stark oxidierenden Eigenschaften wie plasmaaktiviertem Sauerstoff oder Ozon
- metallorganische Chemikalien, z. B. Tetraethylorthosilicat (TEOS), Trisilylamin (TSA)

Umfangreiche Kenntnisse in Vakuumtechnik und Vakuumprozessverfahrenstechnik sind Voraussetzung zur Definition einer funktionsgerechten und langzeitstabilen Lösung mit möglichst geringen Verbrauchskosten. Dazu zählt z. B. die Definition der Pumpenarbeitstemperatur, um Kondensation bei zu niedriger Temperatur, Pulverbildung bei zu hoher Temperatur oder Verblocken der Pumpe bei zu langen Verweilzeiten der Chemikalien im Pumpenraum zu verhindern. Darüber hinaus ist oft eine präzise Kontrolle des Temperaturverlaufs nicht nur in

der Pumpe, sondern auch von Produktionsanlage, Vorvakuumleitung und Abgasleitung erforderlich.

Vakuumprozesse in der Solarindustrie und bei der Bildschirmherstellung ähneln oft den auch in der Halbleiterindustrie eingesetzten Prozessen. Wegen der größeren zu beschichtenden Flächen sind in diesen Industriezweigen allerdings auch die Gasdurchsätze höher und verlangen entsprechend Pumpen mit höherer Saugleistung.

Ein Beispiel: In der Solarindustrie werden zur besseren Ausbeute des Sonnenlichts antireflektierende und die Oberfläche passivierende Siliciumnitridschichten in einem Plasma-CVD-Prozess auf die Solarzellen aufgebracht. Die Abscheidung findet dabei nicht nur wie gewünscht auf dem Substrat statt, sondern auch auf den Wänden der Vakuumkammer. Spätestens wenn die auf die Wände aufgewachsenen Schichten einen kontrollierten Vakuumprozess nicht mehr zulassen, muss die Prozesskammer gereinigt werden. Dies geschieht durch eine In-situ-Plasmareinigung mit dem starken Oxidationsmittel  $\text{NF}_3$ . Wird die Pumpe (in diesem Beispiel AD 73 KH, siehe Kapitel 4.6.5) bei zu niedriger Temperatur betrieben, kommt es, wie in Abbildung 4.10 gezeigt, zu einer Ablagerung des Reaktionsprodukts Ammoniumhexafluorsilicat im Pumpstand. Zur optimalen Prozesskontrolle gehören neben einer prozesstauglichen Pumpe und einem in der Praxis erprobten und qualifizierten Satz von Betriebsparametern:

- Eine beheizte Vorvakuumleitung zur Vermeidung der dortigen Kondensation
- Bei vertikaler Vorvakuumleitung eine Schutzvorrichtung, die das Herunterfallen von Gegenständen in die Pumpe vermeidet (z. B. ein T-Stück mit Blindflansch am senkrechten unteren Ende und mit waagrechtem Ausgang zur Pumpe)
- Ein Soft-Start-Ventil zur Vermeidung der Aufwirbelung von Partikeln
- Ein Absperrventil am Einlass der Pumpe zum kontinuierlichen Betrieb der Pumpe bei hohen Temperaturen auch bei Wartungsarbeiten an der Vorvakuumleitung
- Ein Lecksuchanschluss in der Vorvakuumleitung, möglichst nahe an der Vorpumpe. Leckagen würden zur Bildung von Siliciumdioxid-Partikeln führen.
- Eine beheizte Abgasleitung zwischen Pumpe und Abgasreinigung
- Ein Abgasreinigungssystem



Abbildung 4.10: Kondensation von Ammoniumhexafluorsilicat  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  in einer zu kalt gefahrenen Rootspumpe

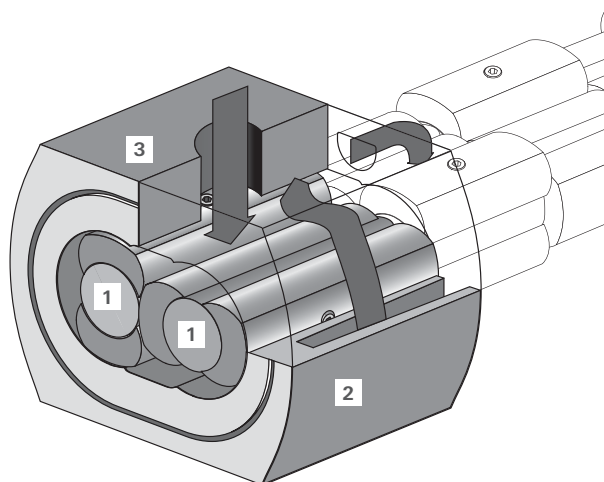


Abbildung 4.11: Funktionsprinzip der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe, Prozesspumpe

#### 4.6.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Die in diesem Kapitel vorgestellten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen sind wie die im vorigen Abschnitt vorgestellten Pumpen technisch trocken laufende Rotationsverdränger-Vakuumpumpen. Im vorliegenden Abschnitt beschäftigen wir uns mit Pumpen für korrosive Prozesse und die aus diesen abgeleiteten Pumpen für Schleusen- und Transferkammern.

In der Pumpe drehen sich zwei gegenläufig synchron laufende Rotoren (1) berührungslos in einem Gehäuse (2) (Abbildung 4.11). Die Rotoren haben die Form einer „Acht“ und sind voneinander und vom jeweiligen Stator durch einen engen Spalt getrennt. Auf den Wellen der Rotoren sitzen vier bis sechs Rotorpaare. Die einzelnen Rotorräume sind durch Statorscheiben mit Gasdurchlass voneinander getrennt. Das geförderte Gas wird von der Ansaugöffnung (3) zur Auslassöffnung gepumpt. Wichtig bei den Prozesspumpen ist stets die vertikale Pumprichtung. Dadurch kann der Raum in den Transportkanälen zwischen den einzelnen Stufen als Partikelfalle genutzt werden. Somit wird ein Verblocken der Pumpe bestmöglich vermieden.

Da im Schöpfraum keine Reibung auftritt, kann die Wälzkolbenpumpe mit hoher Drehzahl bis zu  $6.000 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$  betrieben werden. Die symmetrische Massenverteilung der Rotoren um die Wellenachse erlaubt zudem eine einwandfreie dynamische Auswuchtung, sodass die Pumpe trotz hoher Drehzahlen sehr ruhig läuft.

Zur Vermeidung der Kondensation von Chemikalien in Pumpe und Schalldämpfer können diese durch Regelung des Kühlwasserdurchflusses temperiert oder mit Heizmanschetten elektrisch beheizt werden. Ist der Auslassschalldämpfer getrennt aufgebaut, erfordert dies eine zusätzliche Heizmanschette. Die Integration des Auslassschalldämpfers direkt an den Pumpenblock reduziert nicht nur Energiekosten durch Vermeidung einer zusätzlichen Heizung, sondern macht auch die Installation einfacher.

#### 4.6.2 Anwendungshinweise

Vorteile der mehrstufigen Wälzkolbenpumpen in Korrosivgasausführung:

- Optimale Anpassung an den jeweiligen Vakuumprozess durch einstellbare Temperatur, Spülgasdurchsatz und Drehzahl
- Kein Schmiermittel im Bereich der Gasförderung
- Keine Entsorgungsprobleme in Bezug auf das Betriebsmittel
- Hohe Zuverlässigkeit und hohe Anlagenverfügbarkeit
- Lange Serviceintervalle, geringe Leistungsaufnahme und geringer Medienverbrauch von Kühlwasser und Spülgas, dadurch niedrige Betriebskosten
- Kleinste Stellfläche, dadurch gute Integration und Einsparungen bei Reinräumen und Pumpengesossen
- Umfangreiche Ansteuerungsmöglichkeiten, lokale oder Fernsteuerung, Integration in ein Überwachungsnetzwerk
- Niedrigste Leckagerate
- Ideale Vorpumpe für Turbo- und Wälzkolbenpumpen in korrosiven Prozessen
- Zertifiziert nach UL/CSA und SEMI S2

#### Stäube und Partikel

Die Prozesspumpen sind Partikeln ausgesetzt, die aus Prozesskammern und Vorvakuumleitungen zur Pumpe transportiert werden. Zusätzlich müssen Partikel und Ablagerungen toleriert werden, die durch Kondensation von Reaktionsnebenprodukten in den Pumpen selbst entstehen können. Im Idealfall wird die Bildung von Partikeln und Ablagerungen durch geregelte Heizung und kontrollierten Temperaturverlauf in den Pumpen vermieden. Durch vertikale Pumprichtung fallen eventuelle Partikel immer aus der Pumpstufe heraus und verbleiben im Transportkanal zur nächsten Stufe. Nach der nächsten Belüftung und dem folgenden Abpumpen werden die Partikel durch das geförderte Gas in die jeweils nächste Stufe transportiert. Durch diesen Transportmechanismus werden mehr als 98 % der erzeugten Partikel vom Einlass zum Auslass transportiert. Damit kann am Auslass der Pumpe ein Abgasreinigungssystem zentral eingesetzt werden. Hier werden dann nicht nur Prozesschemikalien, sondern auch Partikel aufgefangen und einer Entsorgung zugeführt. Einlassseitige Fallen und Filter werden als wartungsintensive Komponenten einer Vakuumlösung für korrosive, toxische und kondensierbare Medien vermieden, wann immer es möglich ist.

#### Korrosive Gase

Die mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der P- und H-Serien sind explizit für Korrosivgasprozesse der Halbleiter-, Solar- und Beschichtungstechnik für Flachbildschirme entwickelt worden. Sowohl die metallischen Rotoren und Statoren als auch die Elastomermaterialien der Pumpen sind aus hochkorrosionsbeständigen Materialien gefertigt.

#### Leckagerate

Die hohe Dichtigkeit und der Schutz vor zurückdiffundierenden Gasen aus der Umgebungsluft oder einem Abgasreinigungssystem bzw. Wäscher durch ein Rückschlagventil machen die mehrstufige Wälzkolbenpumpe zur perfekten Lösung für Korrosivgasanwendungen. Zum Dichtheitskonzept tragen gekapselte Motoren bei.

#### 4.6.3 Schleusen und nicht-korrosive Gase

Die ACP 120 bietet den Einstieg in die wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen. Die Pumpen der ACP-Reihe eignen sich nicht für das Abpumpen von großen Mengen korrosiver Gase. Mit der ACP 120 G können zumindest Spuren korrosiver Gase gefördert werden. Dazu wird Inertgasspülung eingesetzt, bei der die Lager durch einen Inertgasvorhang geschützt und Prozessgase durch Inertgaseinlass in den Pumpstufen verdünnt werden.

Die ACP 120 ist entweder als Einzelpumpe oder in Kombination mit einer Wälzkolbenpumpe als Pumpstand ACG 600 eine für industrielle Anwendungen optimierte Pumplösung, die vom Design der Korrosivgasversionen für die Halbleiterindustrie profitiert. Die ACP/ACG-Pumpen sind durch abriebfreies Design optimal für saubere Prozesse geeignet. Sie erreichen eine hervorragende Langzeitstabilität und lange Wartungsintervalle.



Abbildung 4.12: ACP 120

Schleusenpumpen für die Halbleiterindustrie ist in ihren Typenbezeichnungen ein „L“ für „Loadlock“ angefügt. Sie sind im Gegensatz zur oben beschriebenen ACP 120 mit einem Gehäuse und einer Steuerung ausgestattet. Ein Frequenzumwandler sorgt für weltweit reproduzierbare Leistungsparameter unabhängig von Netzspannung und Netzfrequenz.

Die Pumpen der L-Serie sind mit einem Betriebsstundenzähler, Statusleuchten sowie einer Umschaltung zwischen lokalem und Fernsteuerbetrieb ausgerüstet.

Ein- und Auslassflansche sind an der Rückseite der Pumpe angebracht wie auch eine Ein-/Ausgabe-Schnittstelle, die die Anbindung an die Steuerung einer Halbleiter-Produktionsmaschine erlaubt. Optional ist eine serielle Schnittstelle erhältlich, über die die Pumpe z. B. in ein Überwachungsnetzwerk eingebunden werden kann. Anschlüsse für die Wasserkühlung sowie eine optionale Energiesparoption sind ebenfalls an der Rückseite der Pumpe angeordnet (siehe Abbildung 4.13).

Die optionale, in das Pumpengehäuse integrierte Energiesparoption (Energy Saving, ES) reduziert die Leistungsaufnahme der Pumpe um bis zu 50 %. Damit werden die Betriebskosten für den Betreiber deutlich gesenkt. Neben der Energieeinsparung kann die A 100 L ES einen Enddruck von  $7 \cdot 10^{-4}$  hPa erreichen. Zudem verringert sich der Geräuschpegel um 3 dB(A).

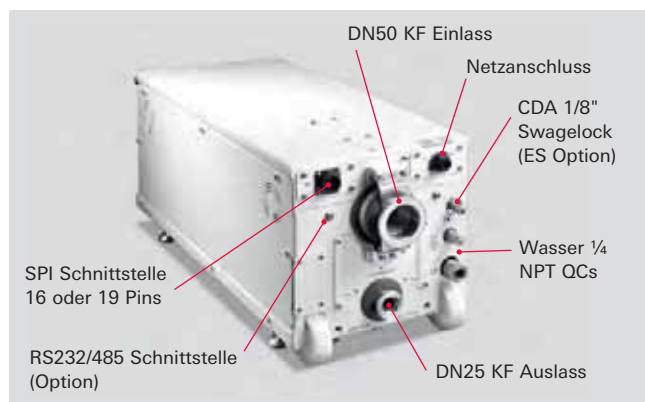


Abbildung 4.13: A 100 L Rückseite mit Anschlüssen

Durch das Freihalten der Pumpenoberfläche können die Aggregate auch gestapelt und damit der Platzbedarf in einer Halbleiterfabrik im Reinraum oder im Pumpengeschoss minimiert werden. Mit ihrer Kombination aus geringster Stellfläche, Stapelbarkeit, hohem Saugvermögen bereits ab Atmosphärendruck, Energiesparoption, niedrigem Enddruck sowie hoher Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität ist die L-Serie die optimale Lösung für alle Schleusenprozesse.

Der niedrige Enddruck und der reduzierte Geräuschpegel machen sie auch für Anwendungen in Analytik und F&E interessant.

#### 4.6.4 Prozesschemie

In beschichtenden Prozessen, speziell in der Produktion von Halbleitern, Flachbildschirmen und in der Solarindustrie, spielt, wie in der Einleitung zu diesem Kapitel aufgezeigt, die Korrosivgasbeständigkeit von Vakuumpumpen eine große Rolle. Neben der Prozessstauglichkeit sind vor allem geringer Platzbedarf und niedrige Betriebskosten wichtige Pumpenparameter. Die P-Serie kommt diesen Forderungen durch um bis zu 53% niedrigere Leistungsaufnahme im Vergleich zur Vorgängerversion sowie um deutlich reduzierte und innerhalb der Serie gleiche Stellfläche nach.

Grundlage dieser Pumpenserie ist der Prozesstrockenläufer A 103 P, der in zwei weiteren Modellen der Serie mit Wälzkolbenpumpen für erhöhtes Saugvermögen und Gasdurchsatz im Prozessdruckbereich ergänzt wird. Durch das sechsstufige Design der A 103 P und einen energieeffizienten Motor wird die Leistungsaufnahme niedrig gehalten. Der sechsstufige Aufbau der A 103 P reduziert die Differenzdrücke zwischen den einzelnen Stufen und damit die Leistungsaufnahme der Pumpe. Neben der sechsten Stufe erlauben die groß dimensionierte Einlassstufe und die hohe Drehzahl hohes Saugvermögen und niedrigen Enddruck.

Die Platzierung des auslassseitigen Schalldämpfers direkt an den Pumpenblock führt zu einem kompakten Aufbau der Pumpe und Energieeinsparung durch direkte Beheizung des Schalldämpfers über den Pumpenblock ohne zusätzlichen Heizmantel. Die temperaturgeregelte und permanent überwachte Heizung der gesamten Pumpe ist zur Vermeidung der Kondensation von Reaktionsnebenprodukten erforderlich.

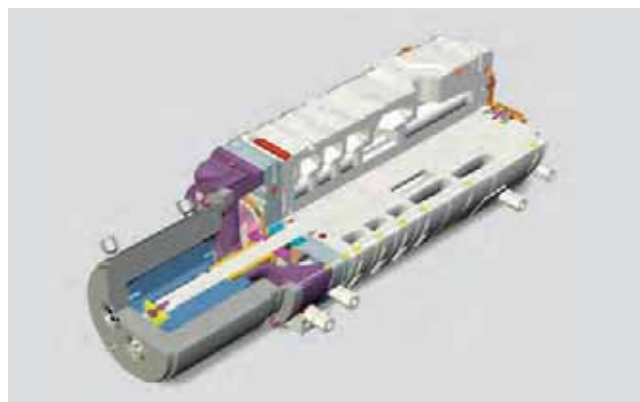


Abbildung 4.14: A 203 H Querschnitt

Neben dem niedrigen Kühlwasserverbrauch der P-Serie sorgt eine Standby-Option für reduzierten Spülgasverbrauch der Pumpe außerhalb des Prozessbetriebs und damit für Einsparung von Betriebskosten.

Umfassende Optionen zur Ansteuerung und Kontrolle erlauben neben dem Betrieb über eine manuelle Steuerung auch die Kontrolle über eine Anlagensteuerung sowie die Einbindung in ein Überwachungsnetzwerk. Wichtige Betriebsparameter können direkt abgelesen und zur statistischen Auswertung exportiert werden.

Die P-Reihe ist normenkonform nach CE und SEMI S2.

#### 4.6.5 Harte Prozesschemie

Die Weiterentwicklung von Prozessen speziell in der Halbleiter- und Solarindustrie stellt immer neue Anforderungen an die eingesetzten Vakuumpumpen. Basierend auf der bewährten Technologie der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe, bietet Pfeiffer Vacuum mit der H-Reihe die perfekte Lösung für die anspruchsvollsten Prozesse in den oben genannten Industriezweigen. Im Vergleich zu bisherigen Pumpenlösungen wurden Gasdurchsatz bei Prozessdruck, Partikeltoleranz und Kondensationsresistenz deutlich erhöht.

Wie die Pumpen der P-Serie (Process) sind die Pumpen der H-Serie (Harsh Process) mit Temperaturkontrolle und Inertgasspülung ausgestattet. Der Parameterbereich ist jedoch zur optimalen Prozessanpassung deutlich breiter gespannt als bei den Pumpen der P-Serie.

Grundlage der H-Serie ist der Prozesstrockenläufer A 203 H (siehe Abbildung 4.14), der in drei weiteren Modellen der Serie mit Wälzkolbenpumpen für erhöhtes Saugvermögen und Gasdurchsatz im Prozessdruckbereich ergänzt wird. Die Korrosivgasausrüstung der Pumpen erlaubt durch spezifische Materialien auch den Einsatz stärkster Oxidationsmittel wie  $\text{NF}_3$ . Der breite Temperaturbereich der Pumpen erlaubt die Anpassung an unterschiedlichste Verfahren wie z. B. Wolframabscheidung bei niedrigen Temperaturen oder Nitridabscheidung bei hohen Temperaturen. Ein hocheffizienter Motor führt zu Energieeinsparungen bei niedrigen Drücken und bietet durch das hohe Drehmoment gute Anlaufeigenschaften nach Pumpenstillstand.





Abbildung 4.15: A 1503 H Prozesspumpstand

Die Modelle der A3H-Serie bieten durch identische Schnittstellen und identische Medienanschlüsse eine optimale Kompatibilität zu den Pumpen der P-Serie. Auch bei Änderung eines Prozesses auf einer bestehenden Produktionsanlage können also optimale Pumpenlösungen mit minimalem Installationsaufwand beim Pumpentausch geliefert werden.

Durch Ergänzung des Modells A 1803 H mit einer dritten Roots-Stufe entsteht ein kompakter, extrem leistungsfähiger Pumpstand mit höchstem Saugvermögen für CVD-Prozesse. Der AD 73 KH setzt eine frequenzgeregeltere

Wälzkolbenpumpe mit einem nominellen Saugvermögen von  $4.500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  in einem eigenen Rahmen über den Prozesstrockenläufer. Durch den modularen Aufbau ist die Installation einfach und im Servicefall können die Pumpen des Pumpstands einzeln entfernt und gewartet werden. Die Frequenzregelung der saugseitigen Wälzkolbenpumpe erlaubt eine Anpassung an Prozessparameter in einem breiten Gasdurchsatzbereich und für verschiedenste Prozessgase.

Pfeiffer Vacuum wird die dynamische Entwicklung der Prozesse in unterschiedlichen Industriezweigen auch in Zukunft verfolgen und optimale Pumpenlösungen anbieten. Einen ersten Ausblick erhalten Sie in Kapitel 8, Lösungen zum Kontaminationsmanagement.

#### 4.6.6 Portfolioüberblick

##### 4.6.6.1 Prozesspumpen, wassergekühlt

Saugvermögen und Enddruck der ACP 120 / ACP 120 G können durch Kombination mit einer Wälzkolbenpumpe weiter gesteigert werden. Für größere Volumina stehen entsprechend optimierte Pumpenversionen zur Verfügung.

Die angegebenen technischen Daten beziehen sich auf eine Netzfrequenz von 50 Hz. Die Standardausführungen der H-Pumpen sind zum Abpumpen von Volumina mit maximal  $1 \text{ m}^3$  geeignet. Sonderausführungen von A 203 H und A 1803 H sind geeignet für Volumina bis zu  $50 \text{ m}^3$ .

Mehrstufige Wälzkolbenpumpen für nicht-korrosive Anwendungen

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck ohne/mit Spülgas	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
ACP 120	$95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$	Schleusen- und Transferkammern mit einem Volumen bis zu $1 \text{ m}^3$ , nicht-korrosive Gase, Edelgase, Regenerierung von Kryopumpen, Vorpumpen für Turbopumpen mit nicht-korrosiven Gasen
ACP 120 G	$95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$9 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ mit 35 slm Spülgas	
A100 L	$100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$	
A100 L ES	$100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$7 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$	

Tabelle 4.16: Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen für nicht-korrosive Anwendungen

Mehrstufige Wälzkolbenpumpen für korrosive Anwendungen

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck ohne/mit Spülgas	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
A 103 P	$120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ mit 20 slm Spülgas	Trockenätzen (Oxid und Poly) Veraschen Stripping RTP Implantation
A 603 P	$480 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$ $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ mit 20 slm Spülgas	
A 1003 P	$900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$ $1 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ mit 20 slm Spülgas	

Tabelle 4.17: Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der P-Serie für korrosive Anwendungen

Mehrstufige Wälzkolbenpumpen für harte korrosive Anwendungen

Typenbezeichnung	Saugvermögen	Enddruck ohne/mit Spülgas	Einsatzbereiche / Anwendungsgebiete
A 203 H	$130 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ $5 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}$ mit 50 slm Spülgas	Metal Etch CVD (PECVD, SACVD, LPCVD) ALD Epitaxie Trockenätzen
A 803 H	$600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ $1 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ mit 50 slm Spülgas	
A 1503 H	$1.100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ $9 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ mit 50 slm Spülgas	
A 1803 H	$1.650 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ $9 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ mit 50 slm Spülgas	
AD 73 KH	$4.700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$ $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ mit 50 slm Spülgas	

Tabelle 4.18: Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der H-Serie für harte korrosive Anwendungen

### 4.6.6.2 Zubehör

#### Erdbebensicherung

Eine Erdbebensicherung erlaubt die Fixierung der Pumpe am Einsatzort, verhindert eine Verschiebung durch Erdbeben und damit ein eventuelles Reißen der Vorvakuumeleitung.

#### Fernbedienung

Die Fernbedienung ermöglicht die Einstellung der Pumpenparameter und ihr Abspeichern in den in den in der Pumpe integrierten Speichern. Die Pumpenparameter können in Echtzeit angezeigt werden.

#### Schnittstellen

Zur Anbindung an die Steuerung einer Produktionsanlage können kundenspezifische Schnittstellen zwischen Pumpe und Anlagensteuerung geliefert werden.

#### Wasseranschlüsse

Die Wasseranschlüsse an den Pumpen und die dazugehörigen Schnellkupplungen zum Anschluss von Kühlwasserleitungen sind in Messing- und Edelstahlausführungen zur bestmöglichen Korrosionsstabilität verfügbar.

Das aufgeführte Zubehör ist nicht für alle in diesem Kapitel beschriebenen Pumpen sinnvoll und erhältlich. Weiteres Zubehör, z. B. für weitere Schnittstellen, elektrische Sicherheit, Anschlüsse oder sicheren Versand ist auf Anfrage erhältlich.

## 4.7 Wälzkolbenvakuumpumpen

### 4.7.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip einstufiger Wälzkolbenvakuumpumpen entspricht dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Funktionsprinzip mehrstufiger Pumpen. In der Wälzkolbenvakuumpumpe drehen sich zwei gegenläufig synchron laufende Rotoren (4) berührungslos in einem Gehäuse (Abbildung 4.16). Die Rotoren haben die Form einer „Acht“ und sind gegeneinander und vom Stator durch einen engen Spalt getrennt. Die Wirkungsweise entspricht einer Zahnpumpe mit je einem Zahnrad mit zwei Zähnen, die Gas von der Ansaugöffnung (3) zur Auslassöffnung (12) fördert. 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 Wälzkolbenvakuumpumpe mit hoher Drehzahl betrieben werden ( $1.500\text{--}3.000\text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Das Fehlen hin- und hergehender Massen erlaubt zudem eine einwandfreie dynamische Auswuchtung, sodass die Wälzkolbenvakuumpumpe 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, auf der anderen mit verschiebbarem Innenring 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 Zahnrädern gefördert wird. Die Durchführung der Antriebswelle nach außen wird bei den Standardausführungen mit durch Sperröl überlagerten Radialwellendichtringen aus FKM 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 Spaltrohr angetrieben werden. Man erreicht hiermit Leckageraten  $Q_l < 10^{-6}\text{ Pa m}^3\text{ s}^{-1}$ .

#### Pumpeigenschaften, Erwärmung

Da Wälzkolbenvakuumpumpen keine innere Verdichtung und kein Auslassventil haben, schlägt bei Öffnung des Schöpfraumes zum Auslass hin dessen Gasvolumen 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, die bei geringem Gasstrom, der nur geringe Wärmemengen transportiert, zu einer starken Erwärmung der Pumpe führt. Die rotierenden Wälzkolben können, verglichen mit dem Gehäuse, nur relativ schlecht gekühlt werden, da sie praktisch vakuumisoliert sind. 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 öffnet bei Überschreitung 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 Standard-Wälzkolbenvakuumpumpen nicht gegen Atmosphäre ausstoßen und benötigen eine Vorpumpe. Jedoch können Wälzkolbenvakuumpumpen mit Überströmventil schon bei Atmosphärendruck zusammen

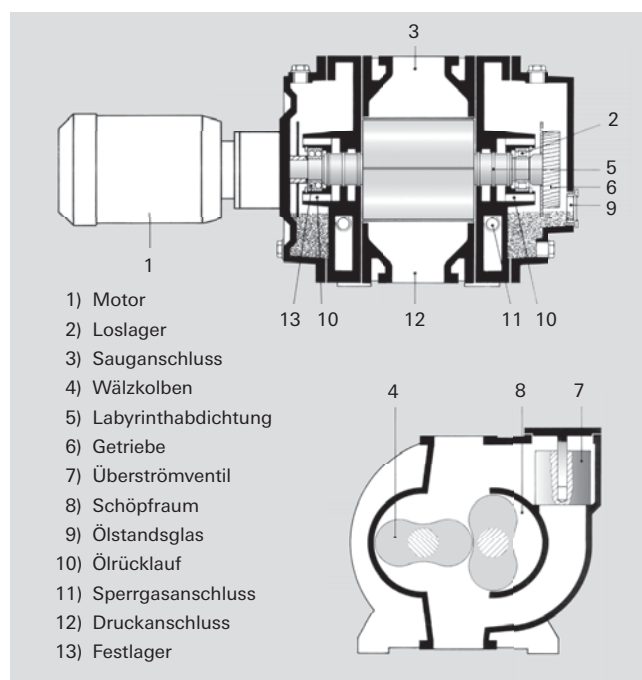


Abbildung 4.16: Funktionsprinzip einer Wälzkolbenvakuumpumpe



mit der Vorpumpe eingeschaltet werden und erhöhen von Anfang an deren Saugvermögen. Dadurch werden die Evakuierungszeiten verkürzt.

### Vorpumpen

Als ölgeschmierte Vorpumpen werden ein- oder zweistufige Drehschieber- oder Sperrschieberpumpen verwendet. Als trockene Vorpumpen können Schraubepumpen oder mehrstufige Wälzkolbenpumpen eingesetzt werden. Solche Pumpkombinationen sind einsetzbar für alle Anwendungen mit hohem Saugvermögen im Grob- und Feinvakuumbereich. Auch Flüssigkeitsringpumpen kann man als Vorpumpen verwenden.

### Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen

Um Wälzkolbenpumpen gegen Atmosphärendruck arbeiten zu lassen, gibt es Modelle ohne Überströmventil mit Gaskühlung (Abbildung 4.17). Hierbei wird Gas, das aus dem Auslassflansch (6) durch einen Kühler (7) strömt, in der Mitte des Schöpfraumes (4) wieder eingelassen. Der künstlich erzeugte Gasstrom kühlt die Pumpe so, 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.

Abbildung 4.17 zeigt eine gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen 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 hPa eingesetzt werden. Da sie kein Schmiermittel im Schöpfraum haben, stoßen sie keinen Ölnebel aus und verschmutzen das Förderme-

dium nicht. Durch Hintereinanderschalten zweier solcher Pumpen kann der Enddruck auf 20 bis 30 hPa gesenkt werden. In Kombination mit weiteren Wälzkolbenpumpen lässt sich der Enddruck bis in den Feinvakuumbereich verringern.

### Saugvermögen und Kompressionsverhältnis

Die charakteristischen Kenndaten von Wälzkolbenpumpen sind Saugvermögen und Kompressionsverhältnis. Das theoretische Saugvermögen  $S_{th} = S_0$  ist der Volumenstrom, den die Pumpe ohne Gegendruck fördert. Das Kompressionsverhältnis  $K_0$  beim Betrieb ohne Gasförderung (Saugflansch verschlossen) hängt vom Auslassdruck  $p_2$  ab. Die Saugvermögen liegen im Bereich von  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  bis zu mehreren  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Typische  $K_0$ -Werte liegen zwischen 10 und 75.

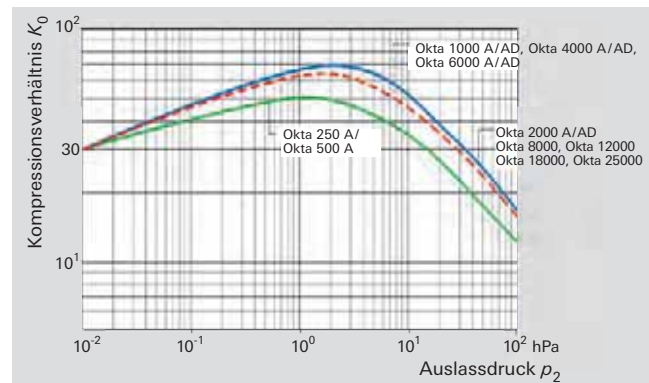


Abbildung 4.18: Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen

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 hPa herrscht in den Dichtspalten Molekularströmung, was wegen der niedrigen Leitwerte zu geringer Rückströmung führt. Die durch Adsorption zurückgeführte Gasmenge, die relativ hoch ist im Verhältnis zum gepumpten Gasstrom, reduziert jedoch das Kompressionsverhältnis.

Im Bereich 1 bis 10 hPa ist  $K_0$  am größten, da wegen des niedrigen Einlassdruckes in den Dichtspalten der Pumpe noch Molekularströmung herrscht und deshalb

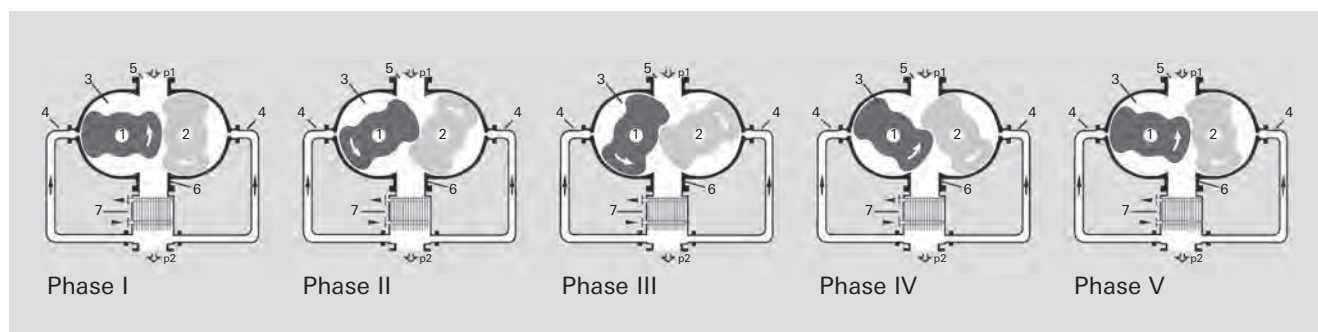


Abbildung 4.17: Funktionsprinzip der gasgekühlten Wälzkolbenpumpen

die Rückströmung 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 hPa stellt sich in den Spalten Laminarströmung ein und 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  $K_0 = 10$  erreichen.

Die Spaltweiten haben einen großen Einfluss auf das Kompressionsverhältnis. Sie dürfen aber wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung von Kolben und Gehäuse bestimmte Mindestwerte nicht unterschreiten, um ein Anlaufen der Kolben zu vermeiden.

#### 4.7.2 Anwendungshinweise

Wegen der geringen Kompressionsverhältnisse müssen Wälzkolbenpumpen zur Vakuumherzeugung immer als Pumpkombinationen betrieben werden. Die erreichbaren Enddrücke hängen vom Enddruck der gewählten Vorpumpe ab. Wegen des Gastransportes durch Adsorption ist der Einsatz von Wälzkolbenpumpen im Bereich unter  $10^{-4}$  hPa nicht mehr sinnvoll. Wie sich Saugvermögen und Enddruck von Pumpständen mit verschiedenen Vorpumpen verhalten, zeigt Abbildung 4.19. 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 verkleinert wird.

##### 4.7.2.1 Wahl der Vorpumpe

#### Drehschieberpumpen

Sofern vom Verfahren her kein störender Einfluss auf die Funktion zu befürchten ist, bietet sich die Drehschieberpumpen als wirtschaftlichste Vorpumpe für einen Wälzkolbenpumpstand an. Drehschieberpumpen haben einen Enddruck im Bereich  $p < 1$  hPa bei kon-

stantem Saugvermögen über einen breiten Druckbereich. Ein Wälzkolbenpumpstand erreicht mit einer einstufigen Vorpumpe bei geöffnetem Gasballastventil Enddrücke von etwa  $10^{-2}$  hPa. Wasserdampf sowie viele Lösungsmitteldämpfe und andere Dämpfe, die einen ausreichend hohen Dampfdruck haben und das Pumpenöl chemisch nicht zersetzen, können mit solchen Pumpständen abgesaugt werden. Beispiele sind Alkohole, halogenierte Kohlenwasserstoffe, leichte Normalparaffine und viele andere.

#### Flüssigkeitsringvakuumpumpen

Beim Absaugen von Dämpfen, die die 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 Flüssigkeitsringvakuumpumpe eine geeignete Lösung dar. Sie erreicht jedoch nur einen Enddruck, der durch den Dampfdruck der Betriebsflüssigkeit bestimmt ist. Wird Wasser von  $15^\circ\text{C}$  verwendet, kann man an der Flüssigkeitsringvakuumpumpe einen Enddruck von etwa 20 hPa erwarten, wobei sie dann schon im Kavitationsbereich arbeitet. Kavitation tritt nahe dem Enddruck der Pumpe auf. Dabei verdampft das Betriebsmittel auf der Saugseite und auf der Druckseite kollabieren die Dampfblasen schlagartig. Dies führt auf Dauer zur Zerstörung der Pumpe. Eine durch Luftzugabe kavitationsfrei arbeitende Flüssigkeitsringvakuumpumpe erreicht etwa 25 bis 30 hPa Enddruck und eine Kombination aus Wälzkolben- und Flüssigkeitsringvakuumpumpe etwa 1 hPa. Beim Absaugen umweltschädigender Stoffe darf die Flüssigkeitsringvakuumpumpe nicht mit Frischwasser betrieben werden. Es muss dann ein geschlossener Kreislauf vorgesehen werden, bei dem eine geeignete Betriebsflüssigkeit zum Entzug der Verdichtungs-wärme über einen gekühlten Wärmetauscher geleitet wird.

#### Flüssigkeitsringvakuumpumpe mit Gasstrahler

Die Kombination von Wälzkolbenvakuumpumpe, Gasstrahler und Flüssigkeitsringvakuumpumpe erreicht einen Enddruck von 0,2 hPa. Sollen kleinere Drücke erreicht werden, muss eine weitere Wälzkolbenvakuumpumpe vorgeschaltet werden.

#### Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenvakuumpumpen

Da Wälzkolbenvakuumpumpen technisch trocken arbeiten, bietet ihr ausschließlicher Einsatz eine Lösung, wenn Pumpen mit flüssigkeitsgedichtetem Schöpfraum ausscheiden.

Einsatzgebiete:

- Absaugen und Verdichten von Helium an Kryostaten
- Absaugen und Verdichten von  $\text{SF}_6$
- 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 gasumlaufgekühlten Wälzkolbenpumpen lassen sich mit sehr unterschiedlicher Saugcharakteristik ausbilden. Im Extremfall kann man

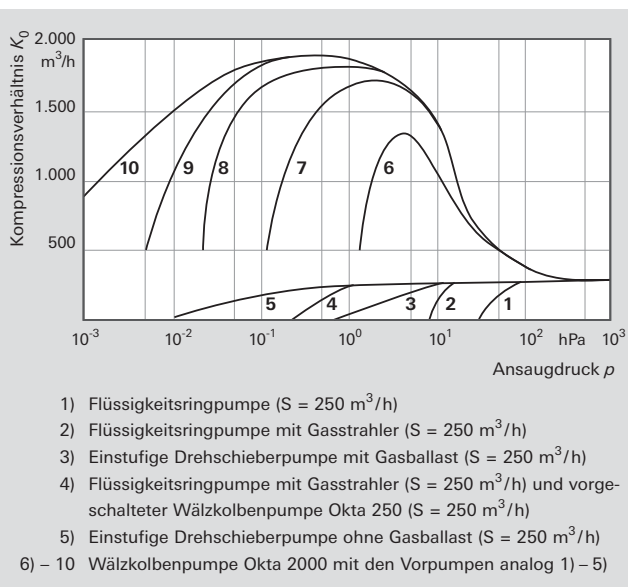


Abbildung 4.19: Saugvermögen von Pumpständen mit Okta 2000 und verschiedenen Vorpumpen

über den gesamten Druckbereich von 1.000 hPa bis  $10^{-3}$  hPa ein nahezu konstantes Saugvermögen erreichen, wobei die einzelnen Pumpenstufen im Verhältnis 2:1 bis 3:1 abgestuft sein können. Dazu müssen allerdings die Wälzkolbenvakuumpumpen mit entsprechend starken Motoren ausgerüstet werden. Anstelle der Überströmventile sind zur Atmosphäre hin Auslassventile vorzusehen.

### Schraubepumpen

Mit den Schraubepumpen HeptaDry steht eine komplette Baureihe von technisch trockenen Pumpen mit einem Saugvermögen von 100 bis  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  zur Verfügung. Als Einzelpumpe (siehe auch Kapitel 4.4) 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 hPa arbeiten. In Kombination mit den OktaLine Wälzkolbenpumpen lassen sich sogar Enddrücke von  $5 \cdot 10^{-3}$  hPa erreichen.

### Mehrstufige Wälzkolbenpumpen

Mit den mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der ACP-Reihe stehen kompakte Pumpstände mit einem Saugvermögen bis zu  $285 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  zur Verfügung. Die Kombination aus ACP-Vorpumpe und Wälzkolbenpumpe erreicht Enddrücke bis zu  $5 \cdot 10^{-3}$ .

Wälzkolbenpumpstände in Korrosivgasausführung sind in Kapitel 4.6 beschrieben.

### 4.7.3 Portfolioüberblick

Wälzkolbenpumpen werden in mehreren Varianten angeboten:

- Standardpumpen mit Wellendichtringen und Graugussgehäuse
- Hermetisch dichte Standardpumpen mit Magnetkupplung und Graugussgehäuse (M-Reihe)
- Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen mit Wellendichtringen (G-Reihe) oder mit Magnetkupplung
- Wälzkolbenpumpen für explosionsgefährdete Umgebungen und zum Fördern explosiver Gase (ATEX-Reihe)

#### 4.7.3.1 Standardpumpen

Die Kennwerte der Standardpumpen sind in Tabelle 4.19 angegeben. Sie gelten auch für alle anderen Baureihen. Die maximalen Differenzdrücke werden durch die Überströmventile bestimmt. Sie sind bei der ATEX-Reihe kleiner als bei den anderen Baureihen, um die Temperaturanforderungen der ATEX-Richtlinie zu erfüllen. Ihr

Gehäuse wird aus Grauguss GG gefertigt und ist mit 100 kPa 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.

#### 4.7.3.2 Standardpumpen mit Magnetkupplung

Die M-Reihe ist für Prozesse einsetzbar, die höchste Ansprüche an Dichtheit und längste Serviceintervalle stellen. Sie entspricht weitestgehend der Standard-Reihe, zeichnet sich jedoch zusätzlich durch eine hermetisch dichte Magnetkupplung anstelle von Radialwellendichtringen aus. Sie arbeitet somit praktisch verschleißfrei. Die integrale Leckrate der Pumpe ist kleiner als  $1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ölaustritt kann somit ausgeschlossen werden und es findet auch kein Austausch zwischen Prozessgas und Umgebung statt. Standardpumpen der M-Reihe sind für alle in Tabelle 4.19 angegebenen Anwendungen geeignet, darüber hinaus aber auch einsetzbar in der Industrie/Chemie zum Pumpen toxischer Gase sowie bei Reinstgasanwendungen: z. B. für CVD- und PVD-Prozesse in der Beschichtung, zum Evakuieren von Schleusen- oder Transferkammern und bei der Herstellung von Flachbildschirmen. Erhältlich ist die M-Reihe in den Größen  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  bis  $6.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

#### 4.7.3.3 Pumpen in ATEX-Ausführung

Für Prozesse in explosionsgefährdeter Umgebung oder zum Evakuieren von explosiven Gasen steht die Baureihe ATEX zur Verfügung.

Pumpen der ATEX-Reihe sind mit Saugvermögen von  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  bis  $4.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  erhältlich. Sie sind PTFE-gedichtet und aus Sphäroguss GGG 40.3 gefertigt. Sie erfüllen die Explosionsschutzanforderungen nach der Richtlinie 94/9/EG, Gerätekategorie 3G, Gerätegruppe IIB, Temperaturklasse T3 X.

Zum sicheren Betrieb der Pumpen sind grundsätzlich zusätzliche Maßnahmen oder Komponenten vorgeschrieben, z. B.: An- und Abfahrvorschriften, spezielle Vorvakuumpumpen, Flammendurchschlagsicherungen und Drucksensoren. Die gesamte Anlage muss nach den entsprechenden Ex-Schutz-Vorschriften ausgelegt und betrieben werden.

Wälzkolbenpumpen OktaLine				
Typenbezeichnung	Nennsaugvermögen bei 50 Hz	Max. Differenzdruck	Max. Kompressionsverhältnis	Einsatzbereich / Anwendungsgebiet
Okta 250	$290 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	75 hPa	50	Industrie/Chemie: z. B. Ölaufbereitung, Trafortrocknung, Stahlgasung, Gefriertrocknung, Lecksuchanlagen, Metallurgie, Verpackungsindustrie, Elektronenstrahlschweißen.
Okta 500	$560 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	75 hPa	50	
Okta 1000	$1.180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	45 hPa	63	
Okta 2000	$2.155 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	35 hPa	70	
Okta 4000	$4.325 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	25 hPa	63	Großflächenbeschichtung: z. B. Fotovoltaik, Verschleißschutz, optische Beschichtungen.
Okta 6000	$6.485 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	20 hPa	63	
Okta 8000	$8.370 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	27 hPa	70	Forschung & Entwicklung: z. B. Beschleuniger, Simulationskammern.
Okta 18000	$18.270 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	10 hPa	70	

Tabelle 4-19: Kenndaten OktaLine

#### 4.7.3.4 Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen

Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen können ohne Vorpumpe betrieben werden. Große Druckbereiche und sehr hohe Differenzdrücke sind der ideale Einsatzfall für diesen Pumpentyp. Der kontinuierliche Einsatz bei hohen Druckdifferenzen ist möglich, da das durch Verdichtung aufgeheizte Gas druckseitig gekühlt und teilweise wieder in den Schöpfraum zurückgeführt wird. Damit können in Kombination mit Gaskühlern Anwendungen bis Atmosphärendruck realisiert werden. Gasumlaufgekühlte Wälzkolbenpumpen sind in den Größen  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (18,5 kW Antriebsleistung) bis  $8.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (200 kW Antriebsleistung) verfügbar.

#### 4.7.4 Zubehör

Für alle Wälzkolbenpumpen der Baureihe OktaLine werden als Zubehör Splitterschutzsätze angeboten.

Als Schmiermittel stehen folgende Öle zur Schmierung des Getriebes und der Lager zur Verfügung (Tabelle 4.11):

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

Vorsicht: Die Öle dürfen untereinander nicht vermischt werden. Die Pumpen sind bei Auslieferung mit einer 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 Wälzkolbenvakuumpumpen 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 ( $\text{N}_2$ ), verwendet.

#### Getrieberaumabsaugung

Bei allen Prozessen, bei denen große Wälzkolbenvakuumpumpstände in kurzen Taktzeiten bestimmte Drücke erreichen sollen (Schnellevakuierung), ist es zweckmäßig, die Getrieberäume der Wälzkolbenvakuumpumpe 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 mit dem Kunden individuell je nach Anforderung abgestimmt. Die Spülung bei Standardpumpen erfordert den Einsatz von Sperrgas, sodass 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 Plasmapolymere Dünnschichtsystem besteht aus einer Haftvermittlerschicht, einer Korrosionsschutzschicht und einer Antihaftbeschichtung. Die Schichtdicke beträgt weniger als  $1 \mu\text{m}$ . Als kurzfristiger Oberflächenschutz, z. B. für Lagerhaltung und Transport, kann der Schöpfraum auf Wunsch phosphatiert, mit Stickstoff geflutet und vakuumdicht verschlossen werden.

#### Dichtungen

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

#### 4.7.5 Pumpstände

Pfeiffer Vacuum bietet Standardwälzkolbenpumpstände mit ölgeschmierten einstufigen und zweistufigen Drehschieberpumpen sowie mit einer Auswahl an ölfreien Pumpen an. Für weitergehende Informationen beachten Sie bitte Kapitel 3.1, Seite 242.

Zusätzlich zu den Standardpumpständen legt die Pfeiffer Vacuumsystemgruppe kundenspezifische Pumpstände (Wälzkolbenpumpstände und Turbopumpstände) aus und fertigt diese.



OnTool Booster				
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Basisdruck	Kompressionsverhältnis	Anwendungsgebiete
OnTool Booster 150	130 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	1 · 10 <sup>-5</sup> hPa	10 <sup>8</sup>	Schleusen, Vorpumpen für Turbopumpen

Tabelle 4.20: Kenndaten OnTool Booster

## 4.8 Seitenkanalhochvakuumumpen

### 4.8.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Die Seitenkanalhochvakuumpumpe ist eine Vakuumpumpe, die von Atmosphäre bis in den Hochvakuumbereich arbeitet. Die Pumpe ist eine Kombination aus Seitenkanalpumpe (Druckbereich 1.000 bis 5 hPa, Laminarströmung) und Holweckstufen (Druckbereich 5 bis 10<sup>-5</sup> hPa, Übergangs- und Molekularströmung).

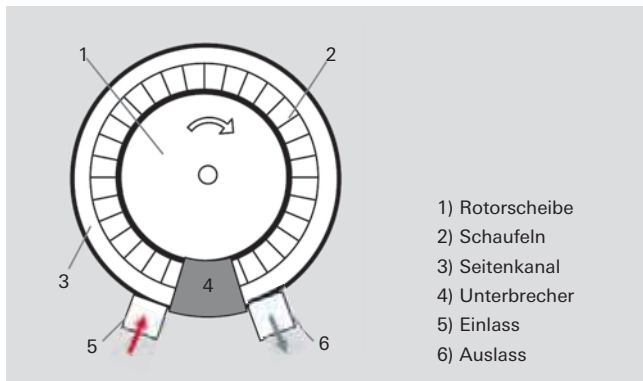


Abbildung 4.20: Funktionsprinzip der Seitenkanalvakuumpumpe

Das Pumpsystem der Seitenkanalvakuumpumpe (Abbildung 4.20) 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 hPa verlässt man den laminaren Strömungsbereich. Dort übernehmen Holweckstufen 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.

### 4.8.2 Anwendungshinweise

Eine Seitenkanalvakuumpumpe eignet sich besonders gut zur Erzeugung eines sauberen Hochvakuums. Die Pumpe arbeitet völlig trocken, da sie nur auf der Atmosphärenseite ein mit Öl geschmiertes Lager aufweist. Sie ist ideal geeignet zum schnellen Auspumpen von Schleusen oder Transferkammern, 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.

### 4.8.3 Portfolioüberblick

Pfeiffer Vacuum bietet mit dem OnTool Booster 150 eine trockene Seitenkanalhochvakuumpumpe an.

## 4.9 Turbomolekularpumpen

### 4.9.1 Aufbau/Funktionsprinzip

Die Turbomolekularpumpe wurde 1958 von Dr. W. Becker im Hause Pfeiffer Vacuum entwickelt und patentiert. Turbomolekularpumpen gehören zu den kinetischen Vakuumpumpen. Der Aufbau ist dem einer Turbine ähnlich. In einem Gehäuse rotiert ein mehrstufiger, turbinenartiger Rotor mit beschauften Scheiben. Als Beschauflung wird die Gesamtheit der Schaufeln einer Turbine oder eines Verdichters bezeichnet. Zwischen den Rotorscheiben sind ebenfalls beschauflte Statorscheiben mit ähnlicher Geometrie spiegelverkehrt angeordnet.

### Lagerung

Bei einer Lagerung der Rotoren mit zwei Kugellagern müssen wegen der Schmierstoffe beide Lager auf der Vorvakuumseite angeordnet werden. Dies bedeutet eine lediglich einseitige (fliegende) Lagerung des Rotors mit seiner großen Masse.

Demgegenüber hat die Hybridlagerung Vorteile bezüglich der Rotordynamik. Hybridlagerung bedeutet den Einsatz zweier Lagerungskonzepte in einer einzigen Pumpe. Ein mit Öl geschmiertes Kugellager sitzt am Wellenende auf der Vorvakuumseite und auf der Hochvakuumseite ein wartungs- und verschleißfreies Permanentmagnetlager, das den Rotor radial zentriert. Das Öl zur Schmierung des vorvakuumseitigen Lagers ist dabei in einem Betriebsmittelspeicher gebunden. Ein kleines trockenes Fanglager ist innerhalb des Magnetlagerstators angeordnet. Ein Wellenzapfen dreht sich bei normalem Betrieb frei innerhalb dieses Lagers. Bei starken radialen Stößen stabilisiert das Fanglager den Rotor und dreht sich dabei nur kurzzeitig. Bei Unwucht des Rotors erzeugt die Lagerung an beiden Wellenenden wesentlich geringere Vibrationskräfte als bei fliegender Lagerung. Die Belastung der Lager ist bei einer Hybridlagerung also deutlich geringer. Außerdem entfällt bei einer Hybridlagerung das größere der beiden Lager auf der Antriebswelle, das aufgrund seiner Baugröße nur begrenzte Rotordrehzahlen zuließe.

In großen Pumpen ab einem Flanschdurchmesser von 100 mm werden alternativ sogenannte 5-Achsen-Magnetlagerungen verwendet [24]. Der Rotor wird durch



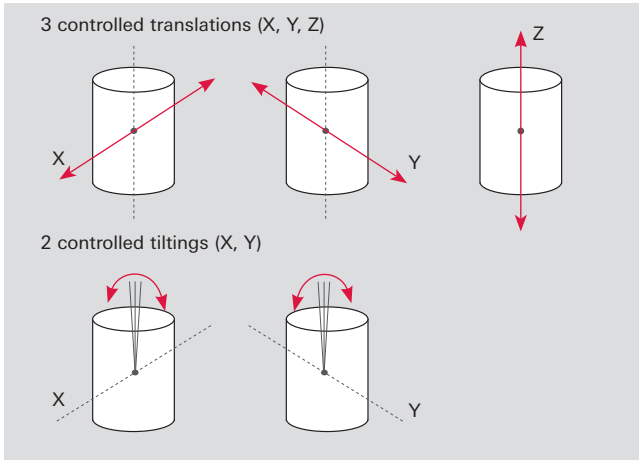


Abbildung 4.21: Freiheitsgrade eines Turborotors

eine digitale elektronische Regelung über Wegsensoren und Elektromagnete in der Schwebe gehalten. Dazu werden die oben gezeigten Freiheitsgrade der Bewegung eines Turborotors permanent überwacht und in Echtzeit nachgeregelt. Wegen des fehlenden mechanischen Kontaktes zwischen Rotor und Gehäuse sind die von der Pumpe erzeugten Vibrationen sehr gering. Der Rotor dreht sich um seine eigene Trägheitsachse. Dadurch wird eine eventuelle Unwucht durch einseitige Beschichtung oder Erosion (z. B. durch Plasmaätzen) innerhalb weiter Grenzen ausgeglichen.

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 Ausfällen der Spannungsversorgung kommt der Rotor erst bei sehr niedriger Drehzahl über den Einsatz eingebauter Fanglager sicher zum Stillstand. Auch bei Betriebsstörungen 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<sup>-1</sup>) ermöglichen. Damit werden die zum Pumpen der Gase erforderlichen Schaufelgeschwindigkeiten erreicht.

Die Antriebsgeräte sind heute oft direkt an die Pumpen angebaut. Die Stromversorgung erfolgt mit 24, 48 oder 72 Volt Gleichspannung, erzeugt von externen oder in die Pumpenelektronik integrierten Netzteilen.

#### 4.9.1.1 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 Geschwindig-

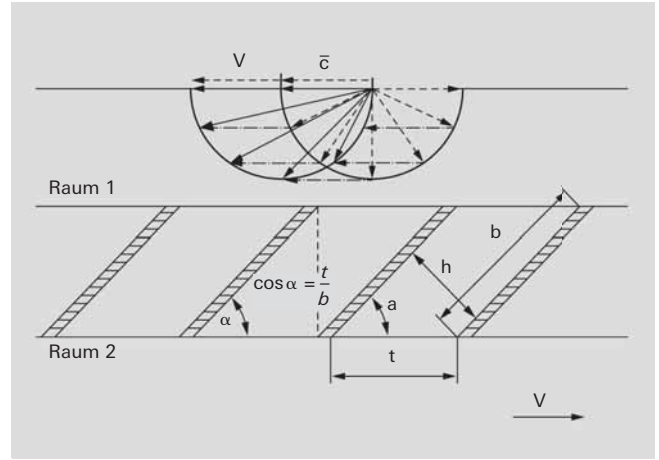


Abbildung 4.22: Funktionsprinzip der Turbomolekularpumpe

keitskomponente nicht durch Stöße mit anderen Molekülen verloren geht, muss Molekularströmung in der Pumpe herrschen, d. h., die mittlere freie Weglänge muss größer sein als der Schaufelabstand.

Bei kinetischen Pumpen stellt sich beim Fördern von Gas 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 Gaede [25] abgeschätzt werden. Für optisch dichte Schaufelstruktur (Abbildung 4.22) gilt:

$$K_0 = \exp \left[ \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{v}{\bar{c}} \right]$$

Formel 4-8: Kompressionsverhältnis Turbopumpe

$\bar{c}$  mittlere Molekülgeschwindigkeit [m · s<sup>-1</sup>]  
 $v$  Umfangsgeschwindigkeit [m · s<sup>-1</sup>]

Die geometrischen Verhältnisse sind Abbildung 4.22 entnommen. Der Faktor  $g$  liegt zwischen 1 und 3 [26]. Man sieht aus dieser Gleichung, dass  $K_0$  exponentiell mit der Schaufelgeschwindigkeit  $v$  ansteigt und ebenso mit  $\sqrt{M}$  wegen

$$\bar{c}_{\text{quer}} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad (\text{Formel 1-10})$$

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

### Saugvermögen

Das Saugvermögen  $S_0$  ist proportional der Ansaugfläche  $A$  und der mittleren Umlaufgeschwindigkeit der Schaufeln  $v$ , also der Drehzahl. Unter Berücksichtigung des Schaufelwinkels  $\alpha$  erhält man:

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{4} \cdot A \cdot v \cdot \sin 2\alpha$$

Formel 4-9: Saugvermögen Turbopumpe

Berücksichtigt man den Eintrittsleitwert des Flansches

$$L_{Bm} = \frac{c}{4} \cdot A \quad (\text{Formel 1-24})$$

sowie den optimalen Schaufelwinkel von 45°, erhält man das effektive Saugvermögen  $S_{eff}$  einer Turbopumpe für schwere Gase (Molekulargewicht > 20) näherungsweise nach der folgenden Formel:

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

Formel 4-10: Effektives Saugvermögen Turbopumpe

Dividiert man das effektive Saugvermögen durch die beschauelte Eintrittsfläche der obersten Scheibe und berücksichtigt noch den durch die Schaufeldicke versperrten Bereich durch den Faktor  $d_f \approx 0,9$ , erhält man das maximale spezifische Saugvermögen einer Turbopumpe für z. B. Stickstoff (Kurve in Abbildung 4.23):

$$S_A = \frac{S_{eff}}{A} = \frac{d_f \cdot v}{4 \cdot \left[ \frac{v}{c} + 1 \right]}$$

Formel 4-11: Spezifisches Saugvermögen

In Abbildung 4.23 ist auf der Y-Achse das spezifische Saugvermögen in  $l \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$  und auf der X-Achse die mittlere Schaufelgeschwindigkeit  $v = \pi \cdot f \cdot (R_a + R_i)$  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:  $A = (R_a^2 - R_i^2) \cdot \pi$ , erhält man das Saugvermögen der Pumpe und kann dies mit den Katalogangaben vergleichen.

Die in Abbildung 4.23 eingetragenen Punkte sind aus Messwerten der angegebenen Pumpen von Pfeiffer Vacuum ermittelt. Punkte weit oberhalb der Kurve sind physikalisch nicht möglich.

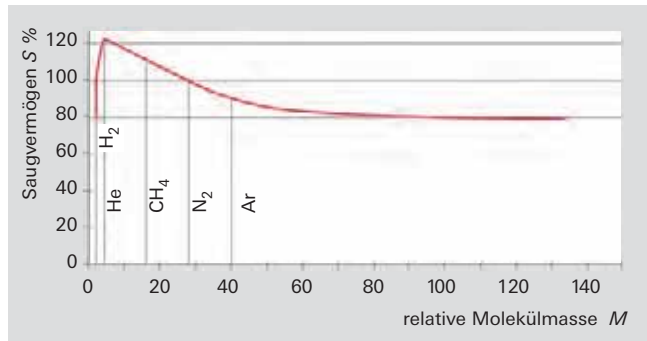


Abbildung 4.24: Saugvermögen als Funktion der relativen Molekülmasse

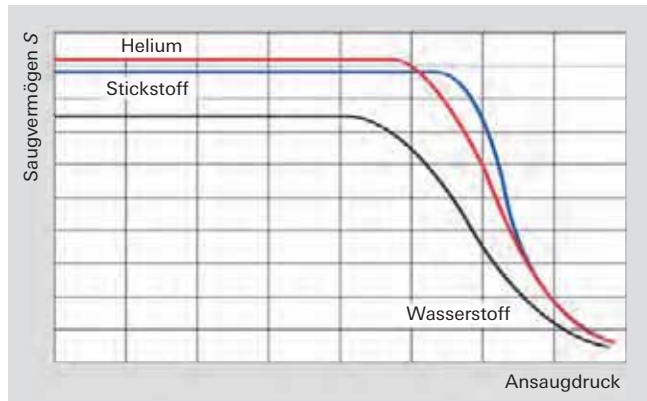


Abbildung 4.25: Saugvermögen als Funktion des Ansaugdrucks

Die so ermittelten Saugvermögen sagen noch nichts über die Werte für leichte Gase aus, z. B. für Wasserstoff. Wird eine Turbopumpe auf niedrigen Enddruck ausgelegt, werden 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. Wegen des hohen Partialdrucks von Stickstoff in der Luft sollte das Kompressionsverhältnis rund  $10^9$  betragen. Bei reinen Turbomolekularpumpen braucht man wegen der Molekularströmung Vorvakuumdrücke von etwa  $10^{-2}$  mbar.

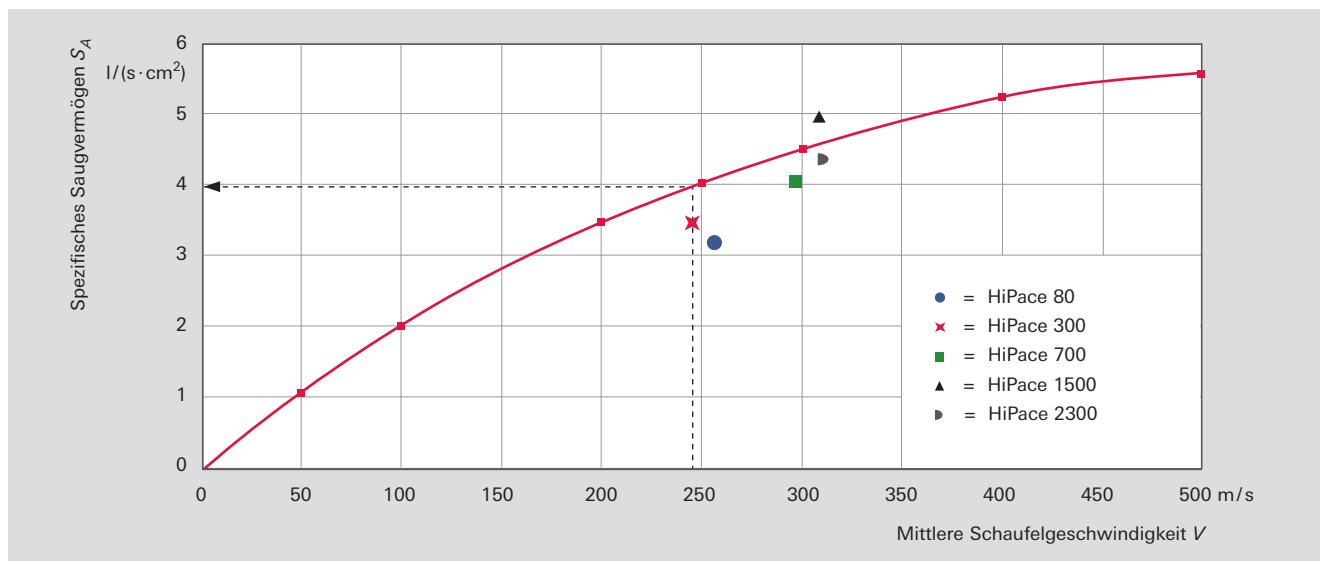


Abbildung 4.23: Spezifisches Saugvermögen von Turbopumpen

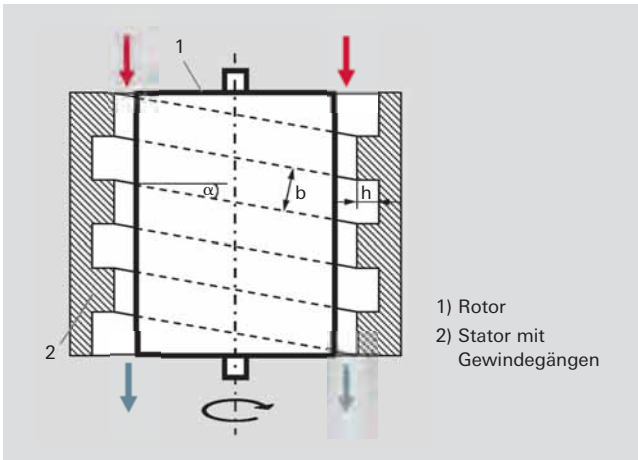


Abbildung 4.26: Funktionsprinzip der Holweckstufe

#### 4.9.1.2 Funktionsprinzip Holweckstufe

Die Holweckstufe (Abbildung 4.26) ist eine mehrstufige Gaede'sche Molekularpumpe 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 Spalten zwischen den Stegen, die die Holweckkanäle voneinander trennen, und dem Rotor. Die Spaltweiten müssen klein gehalten werden, um die Rückströmung zu minimieren. Als Rotor einer Holweckstufe benutzt man zylindrische Hülsen (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. Dies bedeutet, dass die geförderten Gasteilchen außen am Rotor durch die Statorkanäle und anschließend innen am Rotor durch weitere Statorkanäle wieder nach oben transportiert werden, von wo sie dann in einem Sammelkanal zur Vorpumpe gelangen. Moderne Turbopumpen weisen teilweise mehrere dieser „gefalteten“ Holweckstufen auf.

Das Saugvermögen  $S_0$  der Holweckstufen ist gleich:

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

Formel 4-12: Saugvermögen Holweckstufe

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

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

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

Formel 4-13: Kompressionsverhältnis Holweckstufe

Die nach dieser Formel ermittelten Werte werden in realen Holweckstufen nicht erreicht, da die Rückströmung aus dem Nachbarkanal über den Steg das Kompressionsverhältnis drastisch mindert und dieser Einfluss in der Formel 4-13 nicht berücksichtigt wird.

Zum Aufbau eines Turbopumpstands mit Membranpumpen mit einem Enddruck zwischen 0,5 und 5 hPa werden Turbopumpen heute mit Holweckstufen ausgerüstet. Man nennt solche Pumpen Turbodragpumpen. Da man zur Erzeugung niedriger Basisdrücke 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 hPa erhalten. Gleichzeitig werden die Kompressionsverhältnisse für Stickstoff um den erforderlichen Faktor  $10^3$  erhöht. Man erkennt in Abbildung 4.27 die Verschiebung der Kompressionsverhältniskurven um etwa zwei Zehnerpotenzen hin zu höherem Druck.

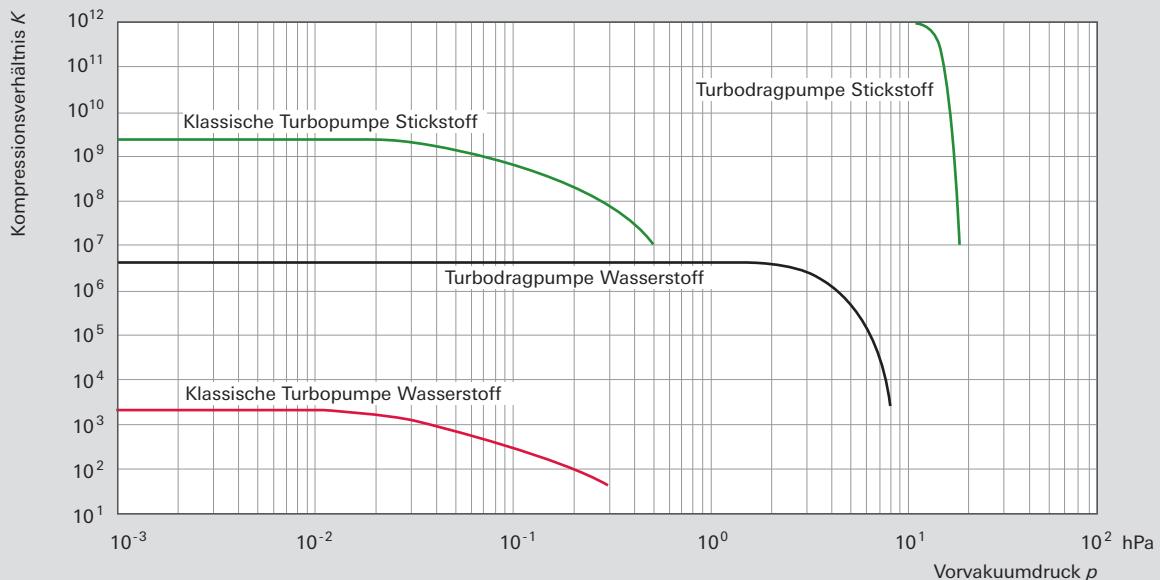


Abbildung 4.27: Kompressionsverhältnisse von reinen Turbo- und Turbodragpumpen

Bei Turbopumpen, die auf hohen Gasdurchsatz ausgelegt sind, wird ein Kompromiss aus Gasdurchsatz, Vorvakuumverträglichkeit und Partikeltoleranz eingegangen und die Spaltabstände in den Holweckstufen etwas größer dimensioniert.

#### 4.9.1.3 Pumpeigenschaften von Turbopumpen

##### Gaslasten

Die Gaslasten,  $q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$  (Formel 1-16),

die man mit einer Turbomolekularpumpe fördern kann, steigen im Bereich konstanten Saugvermögens proportional zum Druck an. Im abfallenden Ast des Saugvermögens können die maximal geförderten Gaslasten weiter ansteigen, erreichen jedoch thermisch bedingte Grenzen, die auch von der Größe der Vorpumpe abhängen. Die maximal zulässigen Gaslasten sind weiter abhängig von der Pumpentemperatur (Kühlung bzw. auch beheizte Pumpen) 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 herstellerseitige Messung der Rotortemperatur können gasartabhängige Prozessfenster zum sicheren Betrieb der Turbopumpen empfohlen werden. In den technischen Daten der Turbopumpen sind die maximal zulässigen Gaslasten bei Nenndrehzahl für die Gasarten Wasserstoff, Helium, Stickstoff, Argon und  $CF_4$  angegeben. Eine Reduzierung der Drehzahl erlaubt höhere Gasdurchsätze.

Die Pumpen der HiPace-Serie mit Saugvermögen  $> 1.000 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$  sind mit einer Rotortemperaturüberwachung ausgestattet und schützen sich selbst vor Überhitzung.

##### 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 21360-1:2012 durch Erhöhung des Vorvakuumdrucks 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 Abschnitt 4.1.3). 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 FKM-Dichtungen erreicht wird.

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

Der Enddruck ergibt sich durch Division des Vorvakuumdrucks durch das Kompressionsverhältnis.

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

Formel 4-14: Enddruck

Ob er erreicht wird, hängt von der Größe und Sauberkeit der Apparatur und der Pumpe sowie von den Ausheizbedingungen ab. Nach extremem Ausheizen (bis über  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) findet man im Restgas nur noch  $H_2$ ,  $CO$  und  $CO_2$ . Diese Gase sind im Metall des Rezipienten gelöst und treten permanent aus. Ein typisches Restgasspektrum einer sauberen, ausgeheizten Apparatur zeigt Abbildung 4.28.

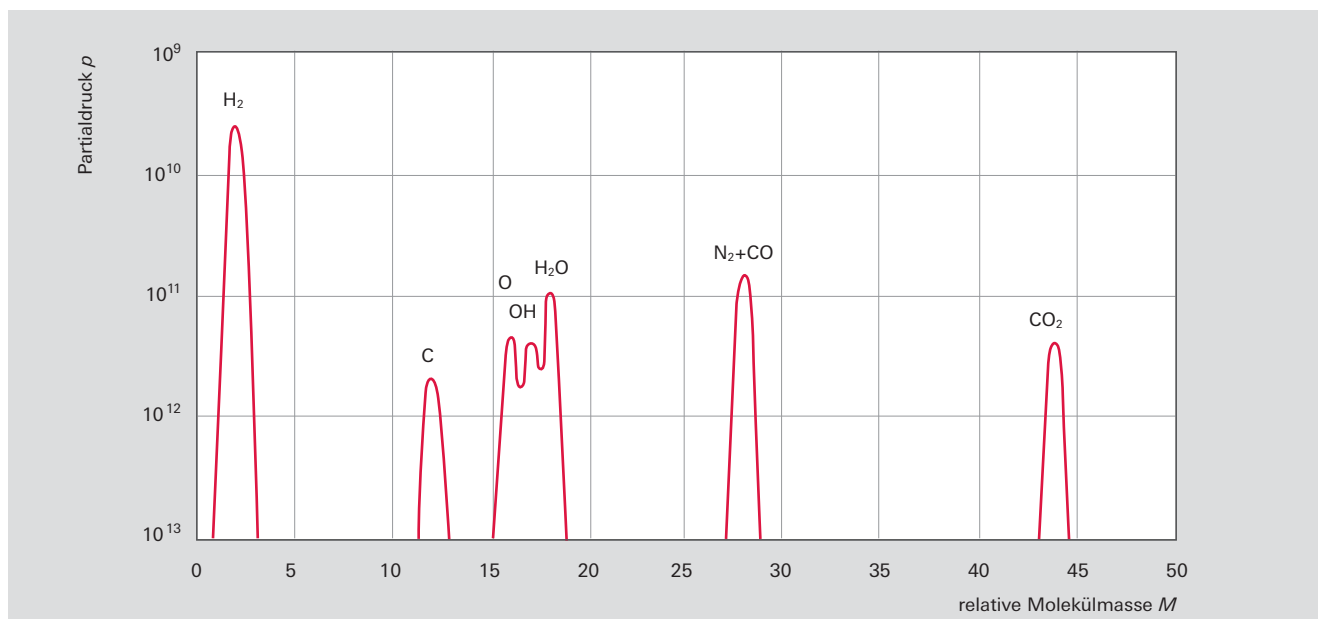


Abbildung 4.28: Typisches UHV-Restgasspektrum (Turbopumpe)

Bei der verwendeten Vorpumpe sollte in regelmäßigen Abständen der Gasballast eingeschaltet werden, um eine Anreicherung 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.

#### 4.9.2 Anwendungshinweise

##### Erzeugung sauberer Vakuums

Turbopumpen sind zur Erzeugung sauberer Vakuums im Bereich  $10^{-3}$  bis  $10^{-10}$  hPa geeignet. Durch ihr hohes Kompressionsverhältnis sperren sie möglicherweise zurückdiffundierendes Drehschieberpumpenöl aus der Vorvakuumleitung zuverlässig vom Rezipienten ab. Die Modelle mit Edelstahlgehäusen und CF-Flanschen sind ausheizbar. Damit sind diese Pumpen ideal für Anwendungen in Forschung & Entwicklung geeignet, in denen Ultrahochvakuum erreicht werden muss.

Turbopumpen können zum Evakuieren großer Behälter mit Drehschieberpumpen als Vorpumpen betrieben werden. Für Turbodragumpen reichen schon zweistufige Membranpumpen als Vorpumpen zur Vakuumherzeugung aus. Wegen ihres geringen Saugvermögens benötigen Membranpumpen jedoch lange Zeit, um größere Behälter auszupumpen. Auch ist der Gasdurchsatz dieser Pumpenkombination durch die Membranpumpe stark eingeschränkt. Eine derartige Kombination ist jedoch eine sehr kostengünstige Lösung für einen trockenen Pumpstand. Er findet oft Anwendung bei differenziell gepumpten Massenspektrometern und weiteren Aufgabenstellungen aus Analytik, Forschung & Entwicklung. Werden im Vorpumpenbereich größere Saugvermögen benötigt, empfehlen sich die mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der ACP-Serie, bzw. bei chemischen Vakuumprozessen der Halbleiter- oder Solartechnik die prozesstauglichen Vorpumpen.

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 Nenndrehzahl und evakuiert mit ihrem hohen Saugvermögen den Behälter in kurzer Zeit auf einen Druck  $p < 10^{-4}$  hPa. 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, sind in Kapitel 2 beschrieben, ebenso Fragen der Dimensionierung sowie die Berechnung von Auspumpzeiten.

##### Auspumpen von Schleusenkammern

Das Auspumpen von Schleusenkammern 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 Drucks 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 Vorpumpen und Turbopumpen die Gasströme über Anzapfungen an der Turbopumpe zusammenzuführen. Für Serienanwendungen werden speziell modifizierte Turbopumpen mit Anzapfungen verwendet. Neben der in Kapitel 4.9.3 beschriebenen SpitFlow 50 sind kundenspezifische Sonderlösungen erhältlich.

Auch Helium-Lecksucher werden mit Turbopumpen ausgerüstet. Man verwendet hier oft das Gegenstromprinzip (siehe Kapitel 7.2.1), 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 Filter für Helium.

##### Pumpen hoher Gaslasten in Vakuumprozessen

Beim Pumpen hoher Gaslasten bei Vakuumprozessen hat die Turbopumpe zwei Vorteile: Sie erzeugt zu Beginn eines Prozessschrittes ein sauberes Vakuum und kann anschließend Prozessgas ohne schädliche Rückströmung abpumpen. Beim zweiten Schritt steht die Aufrechterhaltung eines bestimmten Drucks, bei dem der gewünschte Vakuumprozess ablaufen soll, im Vordergrund. Dabei werden die Gasdurchsätze und der Arbeitsdruck durch die Anwendung bestimmt, d. h., dass ein bestimmtes Saugvermögen bei einem bestimmten Gasdurchsatz gefordert wird. Außerdem soll ein sauberes Zwischenvakuum beim Wechsel des Objektes in kurzer Zeit 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. Schmetterlingsventil) geregelt. Ein Beispiel für die Dimensionierung eines solchen Pumpstandes finden Sie in Kapitel 2. 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 und der Vorvakuumdruck entsprechend unterhalb der maximalen Vorvakuumverträglichkeit abgestimmt ist.

##### Pumpen korrosiver und abrasiver Stoffe

Für das Pumpen von korrosiven Gasen müssen Maßnahmen getroffen werden, die insbesondere den Motor- bzw. Lagerbereich und 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 Korrosiv-



gas und wird zusammen mit diesem von der Vorpumpe abgepumpt. Bei Pumpen mit Glockenrotor (z. B. ATH M-Serie) kann das Sperrgas auf der innenliegenden Seite der Holweckstufe zusätzlich eine Konvektionskühlung darstellen und durch Temperatursenkung das nutzbare Prozessfenster erweitern. Auch bei nicht-korrosiven, aber staubbelasteten Prozessen stellt Sperrgas einen wirksamen Schutz von Lager- und Motorregion dar.

Bei Staubanfall können sich die Schaufeln des Turbo-rotors mechanisch abnutzen, was im Reparaturfall zum Austausch des Rotors führen kann. Ebenso ist mit Ablagerungen in der Pumpe zu rechnen, die kürzere Serviceintervalle an der Pumpe zur Folge haben. Besonders ist darauf zu achten, dass Ablagerungen in der Pumpe nicht mit Luftfeuchtigkeit auf aggressive Stoffe 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 entweder klassische Turbopumpen ohne Holweckstufe oder Turbopumpen mit einer Holweckstufe, die einen Kompromiss aus Vorvakuumverträglichkeit und Partikeltoleranz darstellt. Staubablagerungen in der Holweckstufe und nachfolgendes Blockieren des Rotors können durch eine Vergrößerung der Spaltabstände zwischen Rotor und Stator in der Holweckstufe vermindert werden. Bei einer Turbopumpe der ATH M-Serie etwa werden nach Langzeitbetrieb in einer Sputteranwendung mit Partikelbelastung nicht-haftende Stäube in erster Linie im Sammelkanal nahe des Vorvakuumflanschs beobachtet. Die Holweckstufe ist noch sauber und die Pumpe noch funktionsfähig.

#### 4.9.3 Portfolioüberblick

Als führender Hersteller von Turbomolekularpumpen bietet Pfeiffer Vacuum mechanisch gelagerte und aktiv magnetisch gelagerte Baureihen an. Im Portfolio findet der Anwender Modelle, die auf hohen Gasdurchsatz oder niedrigen Enddruck ausgelegt sind, Pumpen mit minimalen Vibrationen sowie Pumpen mit zusätzlichen Anzapfungen (SplitFlow).



Abbildung 4.29: Standard-Turbopumpe HiPace

#### 4.9.3.1 Mechanisch gelagerte Turbopumpen

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

- HiPace® mit ISO-K-Flanschen: Turbodragpumpen mit Holweckstufen zur Hochvakuumherzeugung für Standardanwendungen
- HiPace® mit CF-Flanschen: Turbodragpumpen mit Holweckstufen, ausheizbar, zur Ultrahochvakuumherzeugung
- HiPace® Plus: Turbodragpumpen mit Holweckstufen mit reduziertem Magnetstreufeld und extra niedrigem Vibrationspegel
- HiPace® P: klassische Turbopumpen für Anwendungen mit Staubanfall
- HiPace® C: klassische Turbopumpen mit Beschichtung und Sperrgassystem für Korrosivgasanwendungen

Die Tabelle 4.21 enthält die Kenndaten der Standardpumpen mit Hybridlagerung. Alle anderen Baureihen sind Modifikationen dieser Standardmodelle und haben im Wesentlichen die gleichen Kenndaten.

Turbomolekularpumpen HiPace				
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Kompressionsverhältnis	Gasdurchsatz*	Anwendungsgebiete
HiPace 10	11,5 l · s <sup>-1</sup>	3,0 · 10 <sup>7</sup>	0,37 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Analytik, Lecksucher, Gasführungssysteme, Lampen- und Röhrenfertigung
SplitFlow 50	53 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>8</sup>	1,8 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 60 P	64 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>6</sup>	9,2 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 80	67 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>11</sup>	1,3 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Analytik, Forschung & Entwicklung; Beschichtung, Halbleiterfertigung
HiPace 300	260 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>11</sup>	5,0 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 400	355 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>11</sup>	6,5 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 700	685 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>11</sup>	6,5 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 800	790 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>11</sup>	6,5 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Glasbeschichtung, Solarzellenfertigung, Oberflächenveredlung, CVD, PVD/Sputtern, Ionenimplantation, Plasmaphysik, Weltraumsimulation
HiPace 1200	1.250 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>8</sup>	20 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 1500	1.450 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>8</sup>	20 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 1800	1.450 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>8</sup>	20 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
HiPace 2300	1.900 l · s <sup>-1</sup>	>1,0 · 10 <sup>8</sup>	20 hPa · l · s <sup>-1</sup>	

\*) Der Gasdurchsatz ist abhängig vom Antriebsgerät.

Tabelle 4.21: Ausgewählte Kenndaten HiPace® für Stickstoff

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

#### 4.9.3.2 Aktiv magnetgelagerte Turbopumpen

Die Tabelle 4.22 enthält die Kenndaten der Turbopumpen mit aktiver Magnetlagerung.

Es gibt auch bei diesen Pumpen:

- HiPace® M mit ISO-K- oder ISO-F-Flanschen: Turbodragpumpen mit Holweckstufen zur Hochvakuumherzeugung für Standardanwendungen
- HiPace® M mit CF-Flanschen: Turbodragpumpen mit Holweckstufen, ausheizbar, zur Ultrahochvakuumherzeugung
- ATP M: klassische Turbopumpen ohne Holweckstufe mit hohem Kompressionsverhältnis für leichte Gase und hoher Partikelverträglichkeit
- ATH M und MT: Turbodragpumpen mit Holweckstufen, Sperrgassystem und Heizung für Korrosivgasanwendungen

#### 4.9.3.3 Antriebsgeräte und Zubehör

Zum Betrieb der Turbopumpen stehen für unterschiedliche Anwendungen vielfältige Bedienungs-, Anzeige- und Antriebsgeräte sowie umfangreiches Zubehör zur Verfügung.

Die im folgenden Text verwendete Nummerierung bezieht sich auf Abbildung 4.31.

Die Turbopumpen (1a) sind in der Regel mit einem angebauten Antriebsgerät versehen (1b), die Gleichspannungsspeisung erfolgt beispielsweise über ein Einschubnetzteil (2a) mit Bedien- und Anzeigegerät (2b). Daneben stehen auch Einbaunetzteile zur Verfügung. Mit einem USB-Konverter (5b) kann man auch einen PC (5a) an die Schnittstelle RS-485 anschließen und Programmier- sowie Schaltfunktionen ausführen sowie Statusanzeigen übertragen. Profibus-DP- und DeviceNet-Konverter ermöglichen die Einbindung der Pumpen in Anlagensteuerungen. Die wichtigsten Schaltfunktionen können auch



Abbildung 4.30: Magnetgelagerte Turbopumpe ATH M

über einen Fernbedienungsstecker durch externe Signale erfolgen, daneben können einige Statusanzeigen über Relaisausgänge abgenommen werden.

Neben den Betriebsgeräten stehen auch unterschiedliche Zubehörteile für besondere Einsatzzwecke zur Verfügung.

An einige Netzgeräte DCU kann man eine Vakuummessröhre anschließen und so neben den Informationen über die Turbopumpe auch den Druck anzeigen.

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 ein Ventilator (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 geschlos-

Magnetgelagerte Turbopumpen				
Typenbezeichnung	Saugvermögen	Kompressionsverhältnis	Gasdurchsatz*	Anwendungsgebiete
HiPace 300 M	255 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>11</sup>	28 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Analytik, Beschichtung, F&E
ATH 500 M / MT	520 l · s <sup>-1</sup>	> 2 · 10 <sup>7</sup>	67 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Halbleiter, Beschichtung, F&E
HiPace 700 M	685 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>11</sup>	13 hPa · l · s <sup>-1</sup>	Analytik, Beschichtung, F&E  Halbleiter, Beschichtung, F&E: Glasbeschichtung, Solarzellenfertigung, Oberflächenveredlung, CVD, Trockenätzen, PVD/Sputtern, Ionenimplantation, Plasmaphysik
HiPace 800 M	790 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>11</sup>	13 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 1603 M	1.370 l · s <sup>-1</sup>	> 6 · 10 <sup>8</sup>	67 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 1600 MT	1.370 l · s <sup>-1</sup>	> 5 · 10 <sup>8</sup>	67 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 2303 M	1.950 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	67 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 2300 MT	1.950 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	67 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATP 2300 M	1.850 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	37 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 2800 M	2.150 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	84 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 2800 MT	2.150 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	84 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 3200 M	2.700 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	84 hPa · l · s <sup>-1</sup>	
ATH 3200 MT	2.700 l · s <sup>-1</sup>	> 1 · 10 <sup>8</sup>	84 hPa · l · s <sup>-1</sup>	

\* Der Gasdurchsatz ist abhängig vom Antriebsgerät.

Tabelle 4.22: Kenndaten magnetgelagerter Turbopumpen für Stickstoff



1a) Turbopumpe

1b) Antriebsgerät TC 400

2a) Netzteil DCU

2b) DCU 002

3) Wasserkühlung

4) Luftkühlung

5a) PC

5b) USB-Konverter

6) Relaisbox „Vorpumpe“

7a) Sperrgasdrossel

7b) Sperrgasventil

8) Flutventil

9) Heizung

**Abbildung 4.31:** Zubehör für Turbopumpen am Beispiel der HiPace 300

sen und das Vakuum erhalten. Der Pumpstand startet sofort wieder bei Wiederkehr 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.

Weitere Details siehe Produktkatalog 3.1 Turbopumpen.

# 5 Vakuummessgeräte

## 5.1 Grundlagen der Totaldruckmessung

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:  $1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$  und  $1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa}$ . Wird der Druck über die Kraft gemessen, die das Gas auf eine Fläche ausgeübt, so ist die Druckmessung von der Gasart unabhängig. Ein Umrechner für die Konvertierung von allen in der Vakuumtechnik üblichen Druckeinheiten findet sich in der Pfeiffer Vacuum App für Smartphones (siehe [www.pfeiffer-vacuum.de](http://www.pfeiffer-vacuum.de)).

Die Druckmessung über die Kraft erfordert bei Drücken unter  $1 \text{ hPa}$  mit abnehmendem Druck einen zunehmenden technischen Aufwand, da die ausgeübten Kräfte sehr klein werden. Man muss daher andere Verfahren anwenden, z. B. nutzt man die Wärmeleitung des eingeschlossenen Gases aus oder man ionisiert die Gasmoleküle und misst zwischen Elektroden fließende Ionenströme. Diese indirekten Messungen, die den Druck über eine Gaseigenschaft ermitteln, liefern naturgemäß ein Messergebnis, das von der Gasart abhängig ist.

In der Vakuumtechnik gibt es kein Messverfahren, das den gesamten technisch zugänglichen Druckbereich abdeckt. Es ist notwendig, verschiedene Messprinzipien zu verwenden. Die Kriterien für die Auswahl eines Vakuummeters richten sich nach den unterschiedlichen Rahmenbedingungen:

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

### 5.1.1 Direkte, gasartunabhängige Druckmessung

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; im einfachsten Fall wird die Auslenkung über eine Mechanik auf einen Zeiger übertragen, der sich über einer Druckskala bewegt. Piezo-resistive oder kapazitive Sensoren nehmen das Drucksignal auf und wandeln es in ein elektrisches Signal um.

### Piezo-Membranvakuummeter

Eine einfache und sehr robuste Methode ist die Verwendung eines piezo-resistiven Aufnehmers. Den Aufbau zeigt Abbildung 5.1. Über einem evakuierten Volumen mit 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 Sensor zeichnet sich durch seine Unempfindlichkeit gegen abrupte Druckerhöhungen und durch eine hohe Genauigkeit aus.

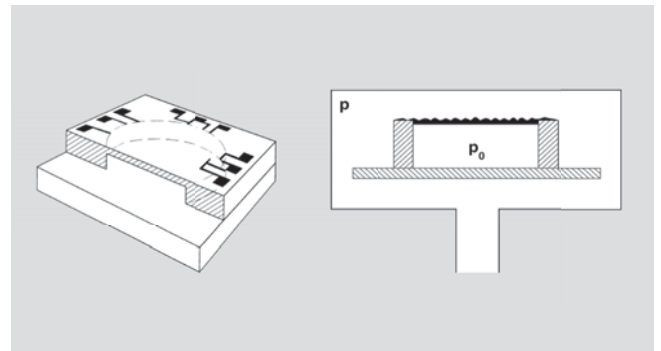


Abbildung 5.1 Aufbau eines Membranvakuummeters

### Kapazitives Membranvakuummeter

Bei einem kapazitiven Membranvakuummeter (Abbildung 5.2) wird die Auslenkung der Membran als Kapazitätsänderung eines Plattenkondensators gemessen, der von der Membran und einer festen Gegenelektrode in einem 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 (durch verschiedene Dicken) lässt sich jeweils über bis zu vier Dekaden messen. Die untere Messgrenze liegt bei  $10^{-5} \text{ hPa}$ .

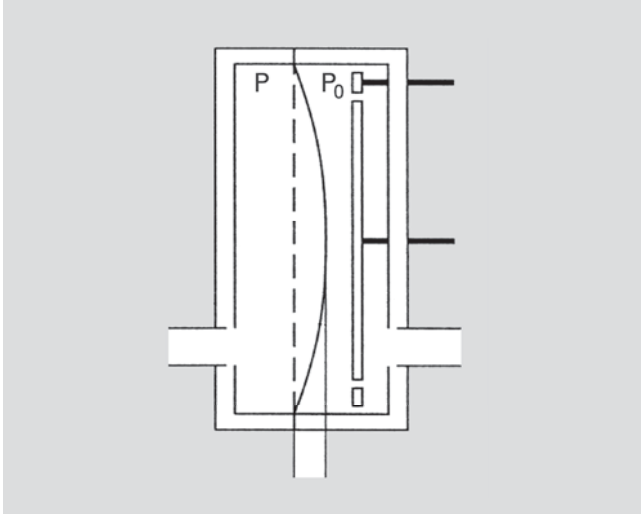


Abbildung 5.2 Aufbau eines kapazitiven Membranvakuummeters

Die limitierenden Effekte sind:

- Durch Temperatureinfluss bedingte Abstandsänderung der Kondensatorplatten
- Mit niedrigen Drücken kleiner werdende Kräfte auf die Membran

Der Temperatureinfluss lässt sich minimieren durch elektronische Kompensation einer bekannten Temperaturdrift oder durch eine eingebaute Heizung, die den Sensor auf konstanter Temperatur hält. Durch Verwendung von keramischem Membranmaterial wird der Temperatureinfluss weiter reduziert, außerdem verleihen keramische Membrane kapazitiven Vakuummetern eine hervorragende Beständigkeit gegen korrosive Gase.

### Kugelreibungsvakuummeter

Für Kalibrierzwecke verwendet man Kugelreibungsvakuummeter (SRG, Spinning Rotor Gauge). 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  $p > 10^{-7}$  hPa. Die Kalibrierung des Gerätes hängt dabei nur von der Kugel ab, daher kann man kalibrierte Kugeln als Transferstandard benutzen. Für Vakuumprozesse sind diese Vakuummeter weniger geeignet, da der Messvorgang mit abnehmendem Druck immer länger dauert.

### 5.1.2 Indirekte, gasartabhängige Druckmessung

Mit abnehmendem Druck steigt der erforderliche apparative Aufwand, um die kleiner werdenden Kräfte auf eine Membran zu messen. Andere Messprinzipien, die eine Druckinformation indirekt über die Messung einer Gaseigenschaft liefern, erlauben die Realisierung von Vakuummetern für den Feinvakuumbereich mit geringerem Aufwand. Für den Hoch- und Ultrahochvakuumbereich sind direkt nach der Druckdefinition arbeitende Vakuummeter nicht realisierbar, da die Kräfte auf eine Membran zu gering sind.

Für die Betrachtung der indirekten Druckmessung im Vakuum ist es von Vorteil, von der Vorstellung der Teilchendichtedichte auszugehen. Diese ist nach der

Zustandsgleichung für ein ideales Gas  $p = n \cdot k \cdot T$  (Formel 1-8) bei konstanter Temperatur dem Druck proportional. Die beiden in der Vakuumtechnik für die Druckmessung genutzten Phänomene sind die Leitung von Wärme und von elektrischem Strom durch das im Messraum des Vakuummeters vorhandene Gas. Jedes Gasteilchen übernimmt einen Teil des Transportes und es ist somit leicht vorstellbar, dass die Dichte und damit der Druck (in gewissen Grenzen) Einfluss auf den Transport haben. Da die Atome bzw. Moleküle der Gase unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, insbesondere verschiedene Massen, liefert die auf diesen Transportphänomenen basierende Druckmessung gasartabhängige Messergebnisse.

### Pirani-Vakuummeter (Wärmeleitvakuummeter)

Beim Pirani-Vakuummeter macht man sich die Wärmeleitfähigkeit von Gasen bei Drücken kleiner ca. 10 bis 100 hPa zunutze. Man heizt einen in einem Rohr zentrisch aufgespannten Draht (meist aus Wolfram) elektrisch durch Stromdurchgang auf eine konstante Temperatur zwischen 110 °C und 130 °C auf. Durch das umgebende Gas wird Wärme vom Heizdraht an die Rohrwand abgeleitet. Der Wärmetransport ist im molekularen Strömungsbereich der Teilchendichtedichte und damit dem Druck proportional. Hält man die Temperatur des Drahtes konstant, so ist dessen Heizleistung druckabhängig. Sie hängt jedoch nicht in allen Bereichen linear vom Druck ab, da Wärmeleitung über die Aufhängung des Drahtes und Wärmestrahlung ebenfalls die Heizleistung beeinflussen.

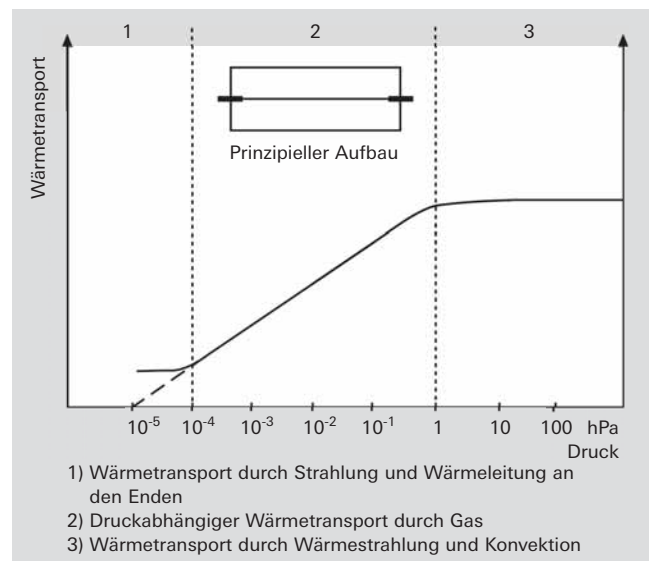


Abbildung 5.3 Funktionsweise des Pirani-Vakuummeters.

Die limitierenden Effekte sind:

- Im Bereich ab ca. 10 hPa bis Atmosphärendruck (laminarer Strömungsbereich) ist die Wärmeleitung druckunabhängig (die Grenze hängt von der Gasart ab).
- Bei Drücken unter  $10^{-4}$  hPa 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  $10^{-4}$  hPa.
- Wärmestrahlung überträgt ebenfalls einen Teil der Heizleistung auf die Rohrwand.



Die Abbildung 5.4 zeigt die unterschiedlichen Kennlinien für verschiedene Gase zwischen  $10^{-4}$  hPa 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. Für Pirani-Vakuummeter werden in den Betriebsanleitungen Korrekturfaktoren angegeben, um den angezeigten Stickstoffäquivalentdruck in den korrekten Druck für das gemessene Gas umzurechnen. Diese Faktoren können in die Steuer- und Anzeigergeräte eingegeben werden, die dann automatisch den korrigierten Druck anzeigen. Diese Korrektur ist nur gültig für den in Abbildung 5.4 linearen Bereich der Kennlinie.

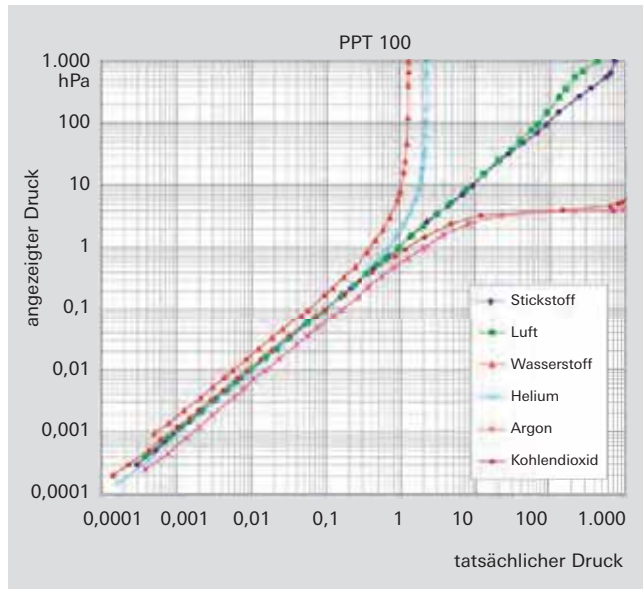


Abbildung 5.4 Kennlinien des Pirani-Vakuummeters

### Kalkathoden-Ionisationsvakuummeter

Kalkathoden-Ionisationsvakuummeter 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 Feldemission und bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit von der Kathode in Richtung der Anode. Auf diesem Weg ionisieren sie neutrale Gaspartikel. Damit wird eine Gasentladung gezündet. Der gemessene Gasentladungsstrom (Abbildung 5.5) ist ein Maß für den Druck. Bei gradliniger Bewegung der Elek-

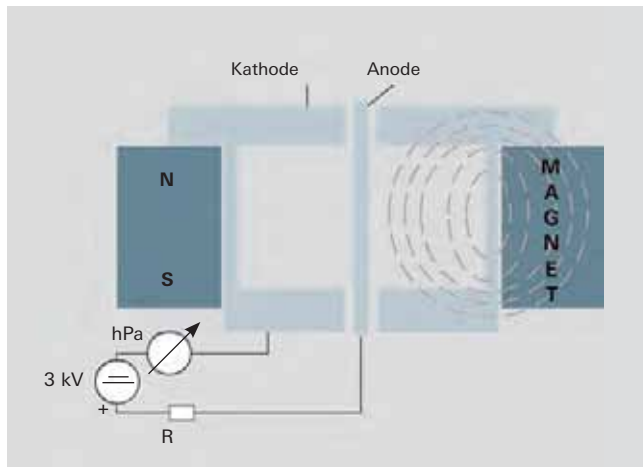


Abbildung 5.5 Aufbau eines invertierenden Magnetrons

tronen werden jedoch nur wenig Teilchen ionisiert, was zu einer geringen Empfindlichkeit und einem Abbruch der Gasentladung bei etwa 1 hPa führt. Ein Aufbau, der diesen Nachteil vermeidet, ist das invertierte Magnetron nach Hobson und Redhead [28]. Ein Metallstift (Anode) wird von einer rotationssymmetrischen Messkammer (Kathode) umschlossen (Abbildung 5.5). Außen auf die Messkammer ist ein axial magnetisierter zylindrischer Permanentmagnetring aufgesetzt, der im Inneren ein Magnetfeld erzeugt.

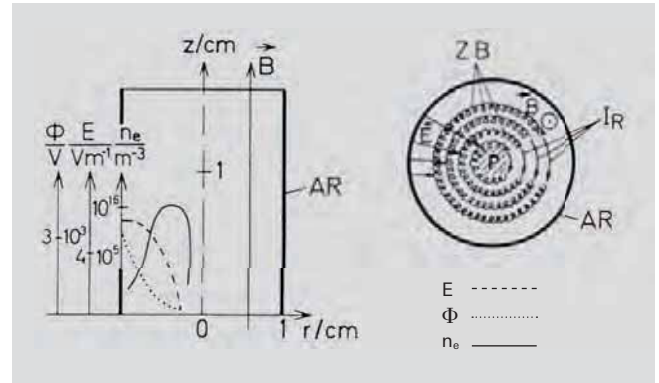


Abbildung 5.6 Funktionsweise des invertierenden Magnetrons

Durch das Magnetfeld bewegen sich die Elektronen auf Spiralbahnen (Abbildung 5.6). Die auf diese Weise verlängerten Wege der Elektronen erhöhen die Stoßwahrscheinlichkeit mit den Gasmolekülen und sorgen dafür, dass auch bei Drücken unter 1 hPa noch genügend Ionen erzeugt werden, um die Gasentladung aufrecht zu erhalten. Durch unterschiedliche Ionisationswahrscheinlichkeiten der Gase ist die Druckanzeige von der Gasart abhängig. So wird zum Beispiel bei Helium ein niedrigerer Druck angezeigt als bei Luft.

Kalkathodenvakuummeter können unter folgenden Bedingungen leicht verschmutzen:

- Wenn das Gerät bei Drücken  $p > 0,1$  hPa eingeschaltet wird.
- Wenn die Messröhre regelmäßig an einer Argonatmosphäre im Feinvakuumbereich betrieben wird. Bei Anwendungen in Sputteranlagen wird oft Argon verwendet. Dies führt durch Ionenbeschuss zur Zerstäubung der Kathode und kann zu Kurzschlüssen und damit zu Ausfällen der Messröhre führen.
- Bei Betrieb in Restgasatmosphären, die Kohlenwasserstoffe enthalten.

Es werden auch Gasteilchen an der Kathodenoberfläche festgehalten (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, insbesondere solche mit Elektronen- oder Ionenoptiken.

### Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter

Bei Heißkathoden-Ionisationsvakuummetern werden die Elektronen mithilfe einer beheizten Kathode erzeugt. Abbildung 5.7 zeigt den Aufbau einer Messröhre nach Bayard-Alpert [27]. 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 Ionenstrom dem Emissionsstrom proportional ist, kann man über letzteren die Empfindlichkeit der Messröhre einstellen.

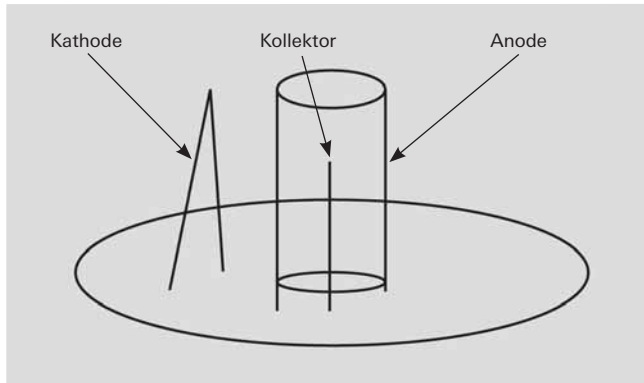


Abbildung 5.7 Aufbau einer Bayard-Alpert Messröhre

Mit Bayard-Alpert Vakuummetern können Drücke mit guter Genauigkeit bis  $1 \cdot 10^{-10}$  hPa 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. Die untere Messgrenze bezeichnet man daher auch als Röntgengrenze.
- **EID-Ionen:** EID (Electron Impact Desorption, auch ESD, Electron Stimulated Desorption) bedeutet, dass durch Elektronen am Anodenkäfig angelagerte Gasteilchen desorbiert und ionisiert werden. Diese Ionen erhöhen ebenfalls den druckproportionalen Ionenstrom.

Das Heißkathodenvakuummeter misst ebenfalls gasartabhängig. Die Messergebnisse sind aber wesentlich genauer (typischerweise  $\pm 10\%$ ) als die des Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeters (typischerweise  $\pm 25\%$ ). Bayard-Alpert Vakuummeter werden daher auch gerne als Referenz für Kalibrierungen herangezogen.

## 5.2 Anwendungshinweise

Bei Auswahl, Einbau und Betrieb von Vakuummetern sind deren Eigenschaften und die Besonderheiten der Vakuummessung zu beachten.

- In Vakuumrezipienten können Druckgradienten auftreten, daher ist der Einbauort mit Bedacht zu wählen.
- Oberflächen und Dichtmaterialien weisen eine Ausgasung auf. Das Vakuummeter kann daher einen gegenüber dem Druck in der Vakuumkammer höheren Druck messen. Die Anschlussflansche sollten daher möglichst kurz und die Zahl der Dichtungen minimiert sein.
- Ionisationsvakuummeter können eine Pumpwirkung besitzen und dadurch einen niedrigeren Druck ausweisen als dem tatsächlichen Druck der Vakuumkammer entspricht.
- Kaltkathodenvakuummeter besitzen eine Eigensputterwirkung, die besonders ausgeprägt ist beim Betrieb mit schweren Gasen (z. B. Argon) im Feinvakuumbereich. Dies kann zu instabilen und ungenauen Messwerten führen.
- In Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen verschmutzen Ionisationsvakuummeter durch Abbauprodukte der organischen Moleküle. Wie beim Sputtereffekt kann dadurch der Messwert verfälscht oder instabil werden.
- Die Einschaltpunkte für Ionisationsvakuummeter sind so zu wählen, dass eine Verschmutzung infolge der vorstehenden Phänomene weitgehend verhindert wird.
- Starke Magnetfelder und elektrische Felder können die Funktion von Vakuummetern beeinträchtigen. Dies gilt insbesondere für Ionisationsvakuummeter.
- Um Ultrahochvakuum zu erreichen, muss die Vakuumapparatur ausgeheizt werden, einschließlich der Messröhren. Dabei sind die maximalen Ausheiztemperaturen und die in den technischen Daten genannten Bedingungen zu beachten.

Bei Verschmutzung können Kaltkathodenvakuummeter leicht demontiert und gereinigt werden. Bei anderen Messprinzipien ist meist ein Austausch des Sensors möglich. Generell ist zu beachten, dass Vakuummeter einem gewissen Verschleiß durch Abnutzung und Verschmutzung unterliegen und daher von Zeit zu Zeit ausgetauscht werden sollten. Die große Breite der Einsatzbedingungen lässt es dabei leider nicht zu, eine generelle Empfehlung für das Austauschintervall zu geben.

### 5.2.1 Messbereiche

Im Druckbereich von 1.000 hPa – 1 hPa benutzt man gelegentlich rein mechanische Zeigervakuummeter (Druckfeder- oder Bourdonrohr-Manometer), die jedoch nur eine beschränkte Genauigkeit aufweisen und nur direkt am Einbauort abgelesen werden können. Für genauere Messungen und Fernanzeige verwendet man elektrische Membranvakuummeter (Piezo-Sensoren oder kapazitive Sensoren).

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

Bei Drücken unter  $10^{-3}$  hPa verwendet man entweder Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter oder bei sauberen Bedingungen und hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit Ionisationsvakuummeter nach Bayard-Alpert. Sinnvoll ist immer die Kombination von zwei oder mehr Sensoren, die den gesamten genutzten Druckbereich abdeckt.

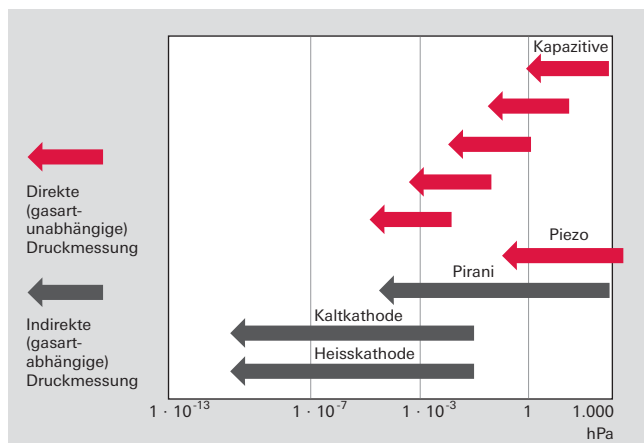


Abbildung 5.8 Druckmessbereiche und Messprinzipien

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

### 5.2.2 Aktive Messröhren (Transmitter)

Aktive Messröhren vereinen den eigentlichen Sensor, der die Wandlung der mechanischen Größe Druck in eine elektrische Größe vornimmt, mit einer kompakten Steuer- und Auswerteelektronik. Sie geben den gemessenen Druck als analoges Messsignal (0 – 10 Volt) oder als numerischen Wert über eine (genormte) digitale Schnittstelle aus. Sie müssen mit einer Gleichspannung (typischerweise 24 Volt) versorgt werden. Zu den aktiven Messröhren werden auch Versorgungsgeräte mit Messwertanzeige angeboten.

Aufbau	Bezeichnung
Vakuumsensor, der über ein Kabel mit der notwendigen Speise- und Auswerteelektronik verbunden ist; sensorspezifische Signal- und Versorgungsleitungen zwischen Sensor und Elektronik	<b>Messröhre</b> Passive Messröhre Sensor
Vakuumsensor und Elektronik in einem Gehäuse integriert, Speisung mit standardisierter Versorgungsspannung (typischerweise 24 VDC); Druckinformation als analoges Ausgangssignal (typischerweise 0 – 10 Volt) oder digitale Standardschnittstellen (RS-485, Profibus, DeviceNet)	<b>Transmitter</b> Aktive Messröhre Messwandler

Tabelle 5.1 Aktive und passive Messröhren

### 5.2.3 Passive Messröhren (Sensoren)

Passive Messröhren besitzen keine eingebaute Elektronik. Sie werden über Kabel mit Steuergeräten verbunden, welche die Energieversorgung, Messdatenauswertung und Anzeige übernehmen. Die Steuergeräte stellen dann gewöhnlich auch analoge Spannungsausgänge, digitale Schnittstellen und Relaiskontakte für Schaltpunkte bereit.

### 5.2.4 Kombinationsmessröhren

Kombinationsmessröhren (Kombisensoren) vereinigen zwei Sensoren in einer Messröhre und bieten folgende Vorteile:

- Erweiterung des Messbereichs gegenüber einem einzelnen Sensor
- Nur ein Messwertausgang für beide Sensoren
- Integrierter Schutz empfindlicher Hochvakuummessröhren vor Einschalten bei zu hohem Druck
- Nur ein Anschlussflansch erforderlich

Die verschiedenen Kombinationen sind bei den einzelnen Baureihen beschrieben.

## 5.3 Portfolioüberblick

### Baureihen

Pfeiffer Vacuum bietet Transmitter mit Einzel- oder Kombisensoren sowie Messröhren als Einzelsensoren in drei verschiedenen Baureihen an, die sich durch die elektrischen Schnittstellen und die Art der Sensor-Elektronikanordnung unterscheiden.

### 5.3.1 DigiLine

Die Transmitter der DigiLine-Baureihe geben ihr Drucksignal über eine serielle RS-485 oder Feldbus Schnittstelle aus. Sie werden mit 24 Volt Gleichspannung versorgt. In Abbildung 5.9 sind die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

Mit dem Versorgungsgerät DPG 202 können bis zu zwei Transmitter betrieben und deren Druckwerte angezeigt werden. Das DPG 202 besitzt eine USB-Schnittstelle zum Anschluss an einen PC. Die Signale der aktiven DigiLine Messröhren können auch direkt in einen PC oder eine SPS eingelesen und mithilfe der Software DokuStar Plus dargestellt und verarbeitet werden.

Optional sind Versionen der DigiLine Transmitter mit Schnittstellen für die Feldbusstandards Profibus-DP und DeviceNet erhältlich. Dies ermöglicht die einfache und problemlose Integration dieser Vakuummeter in die Feldbussysteme von Anlagensteuerungen mit allen bekannten Vorteilen der sparsamen Verkabelung und schnellen Inbetriebnahme.

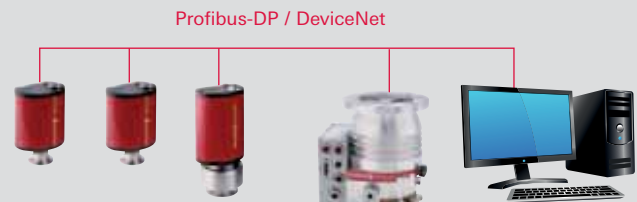
Vakuummeter	Vakuum hPa	Modell	Druckbereich													
			Ultrahoch				Hoch				Fein			Grob		
			10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>
<b>DigiLine</b>																
Piezo-respektiver Transmitter	CPT 200															
Piezo/Pirani-Transmitter	RPT 200															
Pirani-Transmitter	PPT 200															
Pirani/Kaltkathoden-Transmitter	MPT 200															
Pirani/Bayard-Alpert-Transmitter	HPT 200															
<b>ActiveLine</b>																
Piezo-Transmitter	APR 250															
	APR 260															
	APR 262															
	APR 265															
	APR 266															
	APR 267															
Kapazitive Transmitter temperaturkompensiert	CMR 361															
	CMR 362															
	CMR 363															
	CMR 364															
	CMR 365															
Kapazitive Transmitter temperaturgeregelt	CMR 371															
	CMR 372															
	CMR 373															
	CMR 374															
	CMR 375															
Pirani/Kapazitiv-Transmitter	PCR 280															
Pirani-Transmitter	TPR 280															
	TPR 281															
	TPR 281															
Kaltkathoden-Transmitter	IKR 251															
	IKR 261															
	IKR 270															
Pirani/Kaltkathoden-Transmitter	PKR 251															
	PKR 261															
Heißkathoden-Transmitter	IMR 265															
Pirani/Bayard-Alpert-Transmitter	PBR 260															
<b>Modulline</b>																
Pirani-Messröhre	TPR 010															
	TPR 017															
	TPR 018															
Kaltkathoden-Transmitter	IKR 050															
	IKR 060															
	IKR 070															

Tabelle 5.2 Auswahlhilfe Vakuummeter

Je nach Messprinzip nimmt die Messgenauigkeit an den Bereichsgrenzen ab.

### ■ Feldbuslösung

Bussystem für einheitliches Anlagensteuerungskonzept. Transmitter mit Profibus- oder DeviceNet-Schnittstelle. Bis zu 126 Teilnehmer.



### ■ Kundenspezifische Lösung digital

Daten werden direkt in SPS oder PC (Software DokuStar Plus) eingelesen. Bis zu 32 Teilnehmer; bis zu 16 Transmitter adressierbar.



### ■ Kundenspezifische Lösung digital/analog

Zentrale digitale Datenerfassung und zusätzlich lokale Anzeige über analoge Schnittstelle mit TPG 261, TPG 262 oder TPG 256 A



### ■ Kombinationslösung

Betrieb von ein oder zwei Transmittern mit Anzeigegerät DPG 202.

Daten können in SPS oder PC eingelesen werden.



Abbildung 5.9 Anwendungskonzepte DigiLine

Eine weitere Option stellen die DigiLine Transmitter mit zusätzlichem Analogausgang und Schaltpunkten dar. Über den Analogausgang kann zum Beispiel eine lokale Druckanzeige für einen Transmitter realisiert werden, der in eine zentrale Steuerung eingebunden ist. Die Schaltpunkte ermöglichen fest verdrahtete Sicherheitsfunktionen unabhängig von der Software des Steuerrechners.

Die aktiven DigiLine Messröhren bieten folgende Vorteile:

- Druckbereich  $5 \cdot 10^{-10}$  bis 2.000 hPa deckt den gesamten Vakuumbereich ab
- Komponenten sind frei kombinierbar
- Sichere Datenübertragung durch digitale Signale
- Übertragung numerischer Druckwerte erspart Kennlinien und Umrechnungen
- Feldbusschnittstellen Profibus-DP und DeviceNet
- Daten mit Software DokuStar Plus direkt im PC auswertbar
- Fernsteuerung für einfache Justierung
- Schutzart IP54 und DIN M12 Steckverbinder für zuverlässigen Betrieb in rauen Umgebungen

Aktive DigiLine Transmitter mit Einzelsensoren gibt es als **Piezo-Membran System CPT 200** (2.000 – 1 hPa) und als **Pirani System PPT 200** ( $1.000 \cdot 10^{-4}$  hPa).

Folgende Transmitter mit Kombisensoren sind in der DigiLine Baureihe verfügbar:

#### ■ Piezo/Pirani-Kombination RPT 200.

Bedingt durch die Druckunabhängigkeit des Wärmeleitungseffektes beim Pirani-Vakuummeter wird bei Drücken  $p > 10$  hPa mit einem Membran-Vakuummeter gemessen. So erhält man eine gute Genauigkeit im gesamten Messbereich von 1.200 bis  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa und kann Prozesse wie die Kammerbelüftung damit exakt steuern.

#### ■ Pirani/Kaltkathoden-Kombination MPT 200.

Diese Kombination deckt den Druckbereich 1.000 bis  $5 \cdot 10^{-9}$  hPa ab. Über den mit dem Pirani-Sensor gemessenen Druck wird die Gasentladung des Kaltkathodensensors gestartet. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird versehentliches Einschalten der Kaltkathode bei zu hohem Druck und damit Verschmutzung vermieden.

#### ■ Pirani/Bayard-Alpert-Kombination HPT 200.

Es wird ein Druckbereich von 1.000 bis  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa abgedeckt. Die Drucküberwachung durch den Pirani-Sensor schützt den Heißkathodensensor vor Betrieb bei zu hohem Druck und verhindert ein Durchbrennen der Heißkathode. Damit werden sehr lange Standzeiten der Kathode erreicht.



### 5.3.2 ActiveLine

Die Familie der ActiveLine umfasst drei Steuergeräte und acht aktive Messröhren mit analogem Spannungsausgang 0–10 Volt. Alle Transmitter verfügen über den gleichen Steckverbinder und können daher mit demselben Messkabel an den Steuergeräten betrieben werden. Messkabel in Standardlängen von 1 m bis 50 m sind verfügbar.

Die aktiven Piezo-Messröhren **APR** decken mit sechs Typen fünf Messbereiche von 5,5 MPa (55 bar) bis 10 Pa (0,1 mbar) ab.

Die kapazitiven **Membran-Vakuummeter CMR** gibt es sowohl als temperaturkompensierte als auch als temperaturgeregelter Variante in jeweils fünf Bereichen von 1100 hPa –  $10^{-5}$  hPa. Mit den verschiedenen Nennwerten (Full Scale = F.S.) ergeben sich folgende Abstufungen:

- 1.000 hPa F.S. Druckbereich 1.100 bis  $10^{-1}$  hPa
- 100 hPa F.S. Druckbereich 110 bis  $10^{-2}$  hPa
- 10 hPa F.S. Druckbereich 11 bis  $10^{-3}$  hPa
- 1 hPa F.S. Druckbereich 1,1 bis  $10^{-4}$  hPa
- 0,1 hPa F.S. Druckbereich 0,11 bis  $10^{-5}$  hPa

Diese Transmitter von Pfeiffer Vacuum mit Keramikttechnologie haben sich in vielen, insbesondere auch korrosiven Anwendungen bewährt.

Speziell für den Einsatz in der Mikrotechnologie mit den dort gebräuchlichen Einheiten Torr und mTorr werden die kapazitiven **Membran-Vakuummeter CCR** mit Nennwerten in Torr angeboten:

- 1.000 Torr F.S. Druckbereich 1.332 bis  $10^{-1}$  hPa
- 100 Torr F.S. Druckbereich 133 bis  $10^{-2}$  hPa
- 10 Torr F.S. Druckbereich 13,3 bis  $10^{-3}$  hPa
- 1 Torr F.S. Druckbereich 1,33 bis  $10^{-4}$  hPa
- 0,1 Torr F.S. Druckbereich 0,13 bis  $10^{-5}$  hPa

Die CCR Baureihe besitzt D-Sub Steckverbinder und ist bezüglich der Versorgungs- und Ausgangsspannungen mit anderen marktüblichen kapazitiven Transmittern kompatibel. Durch diese Besonderheiten können sie jedoch nicht mit den ActiveLine Steuergeräten betrieben werden.

Zwei aktive **Pirani-Messröhren TPR** für den Feinvakuumbereich 1.000 hPa bis  $5 \cdot 10^{-5}$  hPa und drei aktive **Kaltkathodenmessröhren IKR** mit Messbereichen von  $10^{-2}$  bis  $5 \cdot 10^{-11}$  hPa runden die Modellpalette der ActiveLine Transmitter mit Einzelsensor ab.

Die Pirani-Transmitter TPR können auch an Pumpstandsteuergeräte DCU von Turbopumpständen angeschlossen werden und ermöglichen so ohne zusätzliches Steuergerät eine Druckanzeige.

Im Sensor der aktiven **Heißkathoden-Messröhre IMR** 265 sind die Elektroden (Anode, Kathode, Kollektor) mit sehr kleinen Abständen zueinander aufgebaut. So hat man schon bei Drücken  $p < 10^{-2}$  hPa Molekularströmung und kann dort Ionenströme messen. Ein weiterer Vorteil liegt in der im Vergleich zum Bayard-Alpert-Aufbau geringeren Verschmutzungsempfindlichkeit dieses Transmitters, der daher sehr gut für die Steuerung von Vakuumprozessen geeignet ist, die vorwiegend im unteren Feinvakuumbereich ablaufen.

Die folgenden aktiven Messröhren mit Kombisensoren stehen zur Verfügung:

- **Kapazitiver Membran/Pirani-Transmitter PCR 280** für den Druckbereich von 1.500 bis  $5 \cdot 10^{-4}$  hPa; eine Verbindung des effizienten Pirani-Sensors mit einem im Grobvakuum akkuraten Membransensors
- **Pirani/Kaltkathoden-Transmitter PKR 251 und 261** für den Druckbereich 1.000 bis  $5 \cdot 10^{-9}$  hPa; die ideale Kombination robuster Sensoren für eine breite Palette von Vakuumanwendungen
- **Pirani/Bayard-Alpert-Transmitter PBR 260** für den Druckbereich von 1.000 bis  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa; die bestmögliche Druckmessung im Hoch- und Ultrahochvakuumbereich verbunden mit der Sicherheit der Glühkathode durch den Pirani-Sensor

Die Transmitter der ActiveLine bieten folgende Vorteile: Abdeckung des gesamten Vakuumbereichs

- Drei Steuergeräte **TPG 261**, **TPG 262** und **TPG 256 A** mit 1, 2 oder 6 Messkanälen für alle Anforderungsprofile
- Steuergeräte mit automatischer Transmittererkennung vermeiden Installationsfehler
- Jede Messröhre kann mit jedem Steuergerät betrieben werden
- Leichte Verkabelung infolge des für alle Transmitter gleichen Standardkabels

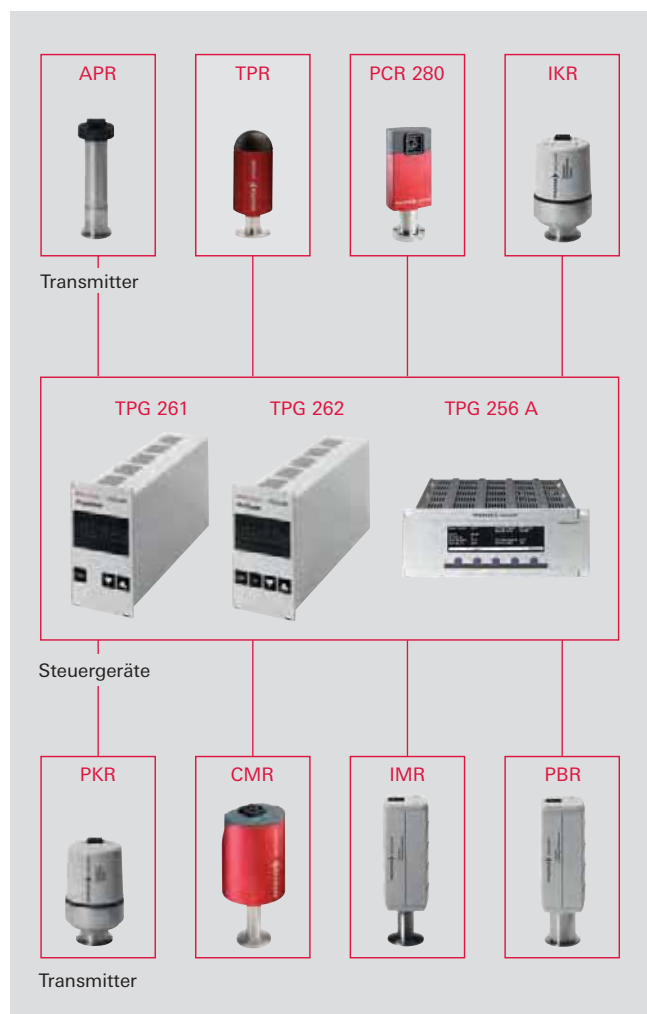


Abbildung 5.10 Anwendungskonzepte ActiveLine.

### 5.3.3 ModulLine

Die ModulLine Baureihe umfasst drei passive **Pirani-Messröhren TPR** für den Druckbereich von 1.000 bis  $8 \cdot 10^{-4}$  hPa und drei **Kaltkathodenmessröhren IKR** für den Druckbereich von  $5 \cdot 10^{-3}$  bis  $10^{-11}$  hPa. Da die Messröhren keine Elektronik enthalten, sind sie zum Einsatz an Orten mit ionisierender Strahlung geeignet. Dafür steht eine große Auswahl an Kabeln zur Verfügung, die es ermöglichen das Steuergerät in großer Entfernung vom Einsatzort der Messröhre aufzustellen.

Als Steuergerät dient das TPG 300 mit folgenden Merkmalen:

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

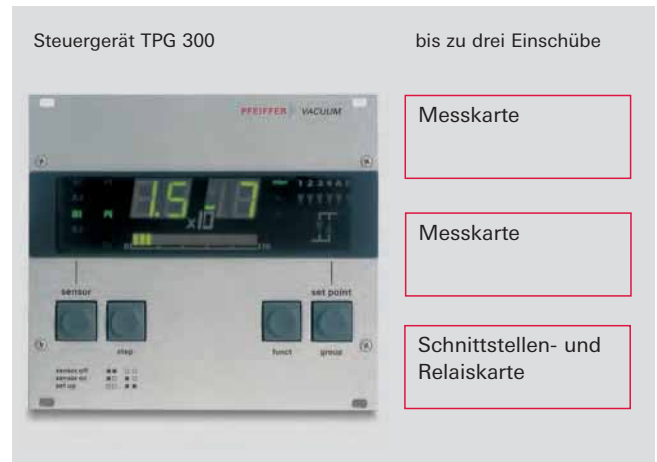


Abbildung 5.11 Steuergerät TPG 300 für ModulLine Sensoren





# 6 Massenspektrometer und Restgasanalyse

## 6.1 Einleitung, Funktionsprinzip

Die Massenspektrometrie ist eines der meistverbreiteten Analyseverfahren. Ein Massenspektrometer analysiert die Zusammensetzung chemische Substanzen mithilfe einer Partialdruckmessung im Vakuum.

### Masse und Ladung

- Totaldruck ist die Summe aller Partialdrücke eines gegebenen Gasmisches
- 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:  $m/e$

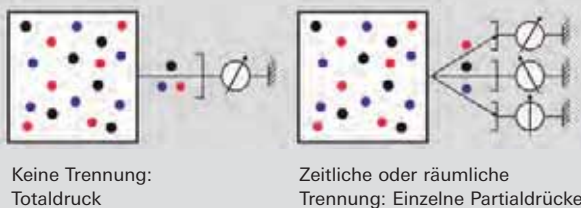


Abbildung 6.1 Total- und Partialdruckmessung

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

- Forschung & Entwicklung
  - Katalysatorforschung
  - Medikamententwicklung
  - Entwicklung neuer Materialien
- Überwachung von Produktionsprozessen
  - in der Metallurgie
  - bei der chemischen Synthese
  - bei der Halbleiterherstellung
  - in der Oberflächentechnologie
- Spuren- und Umweltanalyse
  - Aerosol- und Schadstoffüberwachung
  - Dopingkontrolle
  - Forensische Analytik
  - Isotopenanalyse zur Herkunftsbestimmung

- Analyse von Produkten
  - der chemischen Industrie
  - der Reinstgasherstellung
  - der Pharmazie
  - der Automobil(zuliefer)industrie (Lecksuche)
  - Qualitätssicherung von Lebensmitteln

In einem Massenspektrometer werden Gase analysiert. Feste oder flüssige Substanzen lassen sich ebenfalls analysieren, wenn sie in einem vorgeschalteten Einlasssystem verdampft werden. Das Gas wird durch Abpumpen in einer Vakuumkammer auf einen niedrigen Druck (molekularer Strömungsbereich) verdünnt und durch Elektronenbeschuss ionisiert. Die so erzeugten Ionen werden in einem Massenfilter nach dem Verhältnis Masse zu Ladung getrennt.

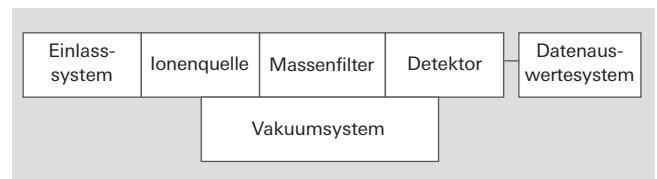


Abbildung 6.2 Komponenten eines Massenspektrometers

Abbildung 6.2 stellt die typischen Komponenten 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** 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  $m/e$  separiert werden.
- Mit Hilfe eines Faraday-**Detektors** oder eines Sekundärelektronenvervielfachers SEV (engl. SEM = Secondary Electron Multiplier), wird der Ionenstrom gemessen, nachdem die Ionen das Trennsystem verlassen haben. Der gemessene Strom ist ein Maß für den Partialdruck der jeweiligen Gaskomponente oder von eventuell in der Ionenquelle erzeugten Bruchstücken.

- Ein **Datenauswertesystem** verarbeitet die mit Hilfe des Detektors gemessenen Ionenströme und stellt sie in verschiedenen Formen dar. Softwareprogramme zur Datenauswertung unterstützen den Anwender bei der Interpretation der Massenspektren.

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

- **Sektorfeldgeräte** nutzen die Ablenkungswirkung eines Magnetfeldes auf bewegte Ladungsträger.
- Beim **Flugzeit-Massenspektrometer** (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 **Quadrupol-Massenspektrometern** wird die Resonanz bewegter Ionen in einem Hochfrequenzfeld ausgenutzt (ähnlich wie bei Ionenfallen).

Wir wollen uns im Folgenden auf die Sektorfeld- und Quadrupol-Massenspektrometer beschränken, da sie in der Vakuumtechnik die am meisten genutzten Geräte sind.

## 6.2 Sektorfeld-Massenspektrometer

Sektorfeld-Massenspektrometer werden in der Vakuumtechnik wegen ihrer einfachen und robusten Bauart für Heliumlecktestgeräte verwendet. Hier ist der Massenbereich auf die Massen 2 u (Wasserstoffmolekül) bis 4 u (Heliumatom) beschränkt. Dies ermöglicht die Konstruktion kleiner, kompakter jedoch sehr leistungsfähiger Massenspektrometer.

### 6.2.1 Funktionsweise

Die Funktionsweise des Sektorfeld-Massenspektrometers ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

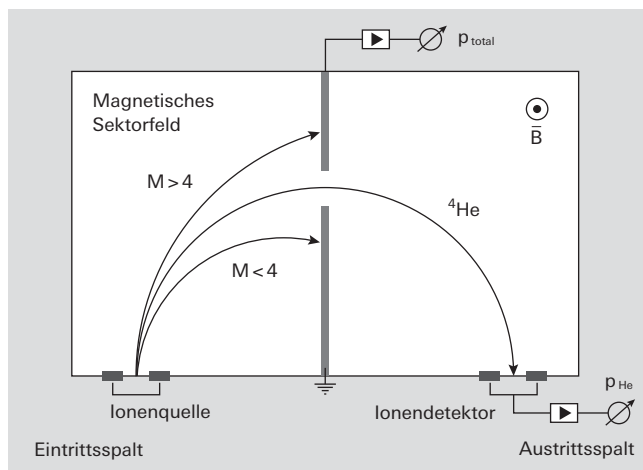


Abbildung 6.3 Funktion des 180° Sektorfeld-Massenspektrometers

Neutrale Gastteilchen werden in einer Ionenquelle durch Elektronenbeschuss ionisiert (Abbildung 6.4 a). Die so erzeugten Ionen der Masse  $m$  mit der Ladung  $q$  durchlaufen ein Potentialgefälle  $U$  in Richtung des magnetischen Sektorfeldes und nehmen damit die kinetische Energie

$$E_{kin} = q \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Formel 6-1 kinetische Energie

auf, d. h. sie durchlaufen das Sektorfeld mit der

Geschwindigkeit  $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ . Bei gleicher Ladung hängt

die Geschwindigkeit und damit die Zeit, um eine gegebene Strecke zu passieren, von der Masse ab. Dies wird im Flugzeit-Massenspektrometer direkt zur Massentrennung genutzt. Im Sektorfeld-Massenspektrometer beschreiben die Ionen im homogenen Magnetfeld eine Kreisbahn, hervorgerufen durch die Lorentzkraft, die auf die bewegten Ionen senkrecht zur Geschwindigkeit und senkrecht zum Magnetfeld wirkt:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

Formel 6-2 Lorentzkraft

Auf der Kreisbahn mit dem Radius  $r$  ist die Lorentzkraft gleich der Zentripetalkraft:

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$$

Formel 6-3 Käftegleichheit

Hieraus berechnet man den Bahnradius zu

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad \text{und mit der Formel 6.1} \quad r = \sqrt{\frac{2mU}{qB^2}}$$

Formel 6-4 Bahnradius

Die für Lecktestgeräte verwendeten Sektorfeld-Massenspektrometer sind mit einem Dauermagneten bestückt, der ein konstantes Magnetfeld liefert, in Abbildung 6.3 senkrecht zur Bildebene. Die Spektrometer sind so abgestimmt, dass die Flugbahn von einfach geladenen Heliumionen zunächst durch eine Blende und dann durch den Austrittsspalt auf den Detektor trifft. Alle anderen Teilchen können das Blendensystem nicht passieren und werden wieder neutralisiert. Der vom Detektor gemessene Ionenstrom für Helium ist proportional zum Heliumpartialdruck. Wie aus Formel 6-4 ersichtlich, kann der Bahnradius über die Beschleunigungsspannung  $U$  variiert werden. In der Praxis beschränkt man sich darauf, außer  $^4\text{He}$  noch Ionen mit dem  $m/e$ -Verhältnis 2 und 3 auf den Austrittsspalt zu lenken und damit die Gase Wasserstoff und  $^3\text{He}$  nachzuweisen.

Um eine hohe Nachweisempfindlichkeit des Prüfgases Helium bei der Lecksuche zu erzielen, muss das Sektorfeld-Massenspektrometer mit einem empfindlichen Detektor ausgestattet sein. Ein einfacher metallischer Auffänger (Faraday-Cub) genügt heutigen Anforderungen nicht mehr, daher werden in modernen Lecktestgeräten Mikrokanalplatten (Micro Channel Plates) eingesetzt, die bei hohen Verstärkungen und geringem Rauschen eine äußerst kompakte Bauform aufweisen. Die beidseitig metallisierten, aus Glas gefertigten Mikrokanalplatten weisen eine große Zahl feiner Kanäle auf, die gegenüber den Stirnflächen leicht geneigt sind (Abbildung 6.4b) und



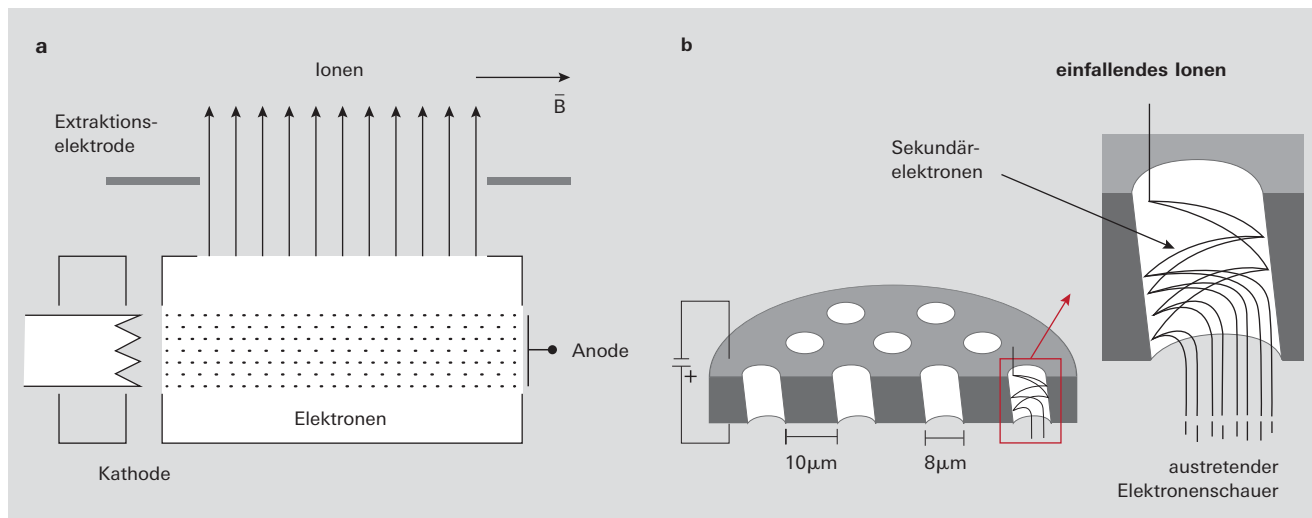


Abbildung 6.4 Sektorfeldmassenspektrometer: (a) Ionenquelle, (b) Detektor

auf ihrer Innenfläche eine Beschichtung aufweisen. Trifft ein Ion auf diese Fläche auf, so wird eine Kaskade von Sekundärelektronen ausgelöst, die infolge der über der Platte anliegenden Spannung zum Detektor beschleunigt werden.

Nach Formel 6-4 ist der Bahnradius umgekehrt proportional zum Magnetfeld. Die verfügbaren Materialien für Permanentmagnete setzen der Magnetfeldstärke eine Grenze. Das führt bei den Helium-Spektrometern zu typischen Bahnradien in der Größenordnung 10 cm. Damit die Flugbahnen der Ionen nicht durch Stöße gestört werden, muss die mittlere freie Weglänge von etwa gleicher Größe sein. Daher beträgt der maximale dauerhafte Betriebsdruck für Helium-Sektorfeld-Massenspektrometer etwa  $10^{-5}$  hPa.

### 6.2.2 Anwendungshinweise

Sektorfeld-Massenspektrometer für den Nachweis von Helium sind heute in Lecktestgeräte mit automatisch gesteuertem Vakuumsystem integriert. Dies nimmt dem Betreiber die Hauptsorge um die Funktionsfähigkeit des Spektrometers ab. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Sauberkeit der Inneren Oberflächen für den Erhalt der hohen Nachweisempfindlichkeit von großer Bedeutung ist.

- Ablagerungen führen durch den Beschuss mit gestreuten Ionen zu lokalen Raumladungen, welche die Bahn der Heliumionen ablenken und damit weniger Ionen zum Detektor gelangen lassen.
- Ablagerungen auf der Mikrokanalplatte vermindern die Ausbeute an Sekundärelektronen und verringern so den Verstärkungsfaktor.

Während die inneren Wandungen des Spektrometers gereinigt werden können, muss eine verschmutzte Mikrokanalplatte ersetzt werden. Saubere Prüfobjekte und -vorrichtungen sind daher sehr wichtig, um die hohe Nachweisempfindlichkeit der Geräte zu erhalten.

## 6.3 Quadrupol-Massenspektrometer QMS

### 6.3.1 Quadrupol-Massenfilter

Vier parallele, in einem Quadrat angeordnete Stäbe bilden das Filtersystem eines Quadrupol-Massenspektrometers. Je zwei gegenüberliegende Stäbe, in Abbildung 6.5 mit (+) oder (-) gekennzeichnet, sind verbunden. Zwischen beiden Stabpaaren ist eine elektrische Spannung angelegt, die sich aus einem Gleichspannungsanteil  $U$  und einem Wechselspannungsanteil mit der Amplitude  $V$  und der Frequenz  $f = \omega / 2\pi$  zusammensetzt:

$$U_{\text{quad}} = U + V \cdot \cos\omega t$$

Formel 6-5 Quadrupol-Ablenkspannung

Es soll hier nur eine phänomenologische Kurzbeschreibung der Funktionsweise gegeben werden. Für eine ausführliche Darstellung wird auf die Literatur [29, 30, 31] verwiesen.

Ideale Quadrupolfelder benötigen Stäbe mit hyperbolischem Profil. Es werden in der Praxis jedoch runde Stäbe verwendet, bei denen der Stabradius gleich dem

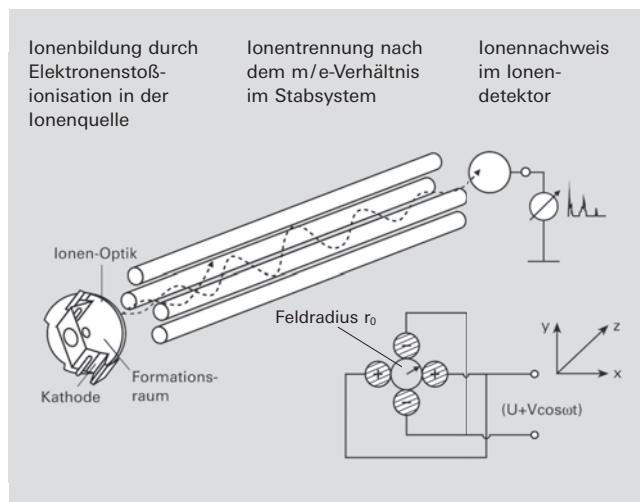


Abbildung 6-5 Prinzip des Quadrupol-Massenspektrometers

1,144-fachen des Feldradius  $r_0$  ist (zur Definition des Feldradius' siehe Abbildung 6.5). 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 um die Z-Achse durch das Massenfilter beschreiben. Sofern die Amplitude der Bahnschwingung kleiner als der Feldradius  $r_0$  ist, erreichen die Ionen den Detektor; wächst die Amplitude darüber hinaus, werden die Ionen an den Stäben oder umgebenden Oberflächen entladen und passieren das Filter nicht.

Zur Lösung der Bewegungsgleichungen führt man zwei dimensionslose Variablen  $a$  und  $q$  ein, welche die Parameter des Quadrupols (Gleichspannung  $U$ , Wechselspannungsamplitude  $V$ , Feldradius  $r_0$ , Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$ ) und die des Ions (Ladung  $Q = z \cdot e$ , Masse  $m = M \cdot m_u$ ) zusammenfassen.

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

Formel 6-2 Stabilitätsparameter  $a$

und

$$q = \frac{4 \cdot Q \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

Formel 6-3 Stabilitätsparameter  $q$

Mit dieser Vereinfachung erhält man die Mathieschen Differentialgleichungen, deren Lösungen in der Mathematik bekannt sind; sie ergeben den Bereich der stabilen Flugbahnen mit Schwingungsamplituden  $r_{max} < r_0$  für Paarungen der Stabilitätsparameter  $a$  und  $q$ , die sich unter dem Dreieck der beiden Grenzkurven in Abbildung 6.6 befinden. 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  $a/q = 2U/V$ . Das ist die Steigung der so genannten Arbeitsgeraden des Massenfilters.

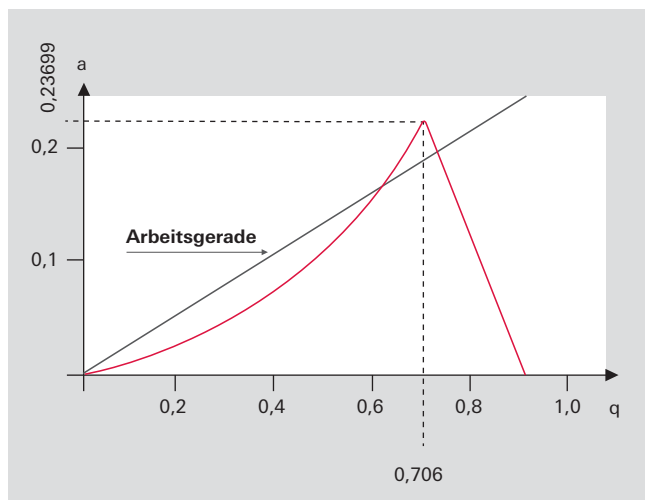


Abbildung 6-6 Stabilitätsdiagramm eines Quadrupolfilters

Im Grenzfall geht die Arbeitsgerade durch den Pik mit den Werten:  $a_p = 0,237$  und  $q_p = 0,706$ .

Nur für Spannungsverhältnisse  $\frac{U}{V} = \frac{a_p}{2 \cdot q_p} < 0,1678$

ist der Quadrupolfilter transparent, d. h. die Arbeitsgerade schneidet den Stabilitätsbereich. Alle Ionen, deren Parameter  $a$  und  $q$  in das Dreieck oberhalb der Arbeitsgeraden fallen, erreichen den Detektor.

Führt man das Verhältnis  $m_u/e$  der atomaren Masseneinheit  $m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27}$  kg zur Elementarladung  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  A · s ein ( $m_u/e = 1,0365 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) und multipliziert dies mit der dimensionslosen Massenzahl  $M$  des entsprechenden Ions, so erhält man für die Spitze des Stabilitätsdreiecks die folgenden Bedingungen für die Spannungen  $U_p$  und  $V_p$  (mit den Konstanten  $k_u = 1,2122 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> und  $k_v = 7,2226 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>):

$$U_p = k_u \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Formel 6-8 Stabilitätsbedingung für U

$$V_p = k_v \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

Formel 6-9 Stabilitätsbedingung für V

Die Stabilitätsbedingungen zeigen, dass man am Quadrupolfilter bei fester Frequenz eine direkte Proportionalität zwischen Spannungen und Masse hat und damit bei Variation der Spannungsamplituden eine lineare Massenskala erhält.

Bei abgeschalteter Gleichspannung  $U = 0$  sind alle Bahnen der Ionen mit  $q < 0,905$  stabil, das sind nach Formel 6-3 alle Massen mit

$$M > \frac{k_H \cdot V}{r_0^2 \cdot f^2}$$

Formel 6-10 Hochpassbedingung

Dabei ist  $k_H = 1,0801 \cdot 10^7$  A s kg<sup>-1</sup> eine Konstante. Das Filter arbeitet in diesem Betriebsmodus 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 und kann so eine Totaldruckmessung vornehmen.

Entscheidend für die Transmission von Ionen durch das Filter sind die Einschussbedingungen. Die Ionen müssen in einem möglichst engen Bereich um die Mitte des Stabsystems in den Quadrupol eintreten und sich dabei möglichst parallel zur Stabachse bewegen.

Diese Forderungen lassen sich umso leichter erfüllen, je größer der Felddurchmesser (Stababstand) und je länger der Quadrupol (Stablänge) ist. Außerdem lassen sich mit größeren Abmessungen der Stäbe die Anforderungen an die geometrische Genauigkeit (Fertigungstoleranzen) einfacher einhalten.

Durch die in 6.1.4.1 beschriebenen Vorteile der Pfeiffer Vacuum Ionenquellen wird eine hohe Transparenz und damit eine hohe Empfindlichkeit erreicht.

Im praktischen Betrieb wird nicht die Frequenz zum Durchstimmen des Quadrupolfilters variiert, sondern das Verhältnis  $U/V$  in Abhängigkeit von der Massenzahl so angesteuert, dass nicht das eigentliche Auflösungsvermögen  $M/\Delta M$ , sondern die Linienbreite  $\Delta M$  konstant bleibt. Dies bedeutet eine Zunahme des Auflösungsvermögens proportional zur Massenzahl. Wegen Formel 6-9 ( $V$  proportional  $M$ ) erzielt man beim Quadrupol im Gegensatz zum Sektorfeld-Massenspektrometer eine lineare Massenskala.

Ein Punkt von wesentlicher Bedeutung für ein QMS 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

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

Formel 6-11 HF-Leistung

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 an sich günstig,  $f_0$  und  $r_0$  so groß wie möglich zu wählen. Wegen der damit verbundenen Zunahme der HF-Leistung nach Formel 6-11 sind dem jedoch Grenzen gesetzt. Eine Verlängerung des Stabsystems erlaubt 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.

Hier noch eine kurzer Exkurs zum Zusammenhang zwischen Auflösung und mechanischer Präzision. Betrachten wir ein Quadrupol-Massenfilter, welches in der Spitze des Stabilitäts-Diagramms, also mit einer hohen Auflösung arbeitet. Es gilt Formel 6-8

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

für die Gleichspannung und Formel 6-9

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

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

$$\text{Daraus folgt: } M = c_k \cdot \frac{1}{r_0^2}$$

( $c_k$  ist eine Konstante) und nach Differentiation, Division durch  $M$  und Betragsbildung die Streuung des Filters verursacht durch  $r_0$ :

$$\frac{dM}{M} = \frac{2 \cdot \Delta r_0}{r_0}$$

Formel 6-12 Streuung

Nehmen wir an, dass sich der Feldradius  $r_0$  über die Länge des Massenfilters um  $dr_0 = 0,03$  mm ändert. Nun betrachten wir die Auswirkung dieser Änderung auf die Streuung bei zwei verschiedenen 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. Bei einem Filter mit dem Feldradius 3 mm ergibt sich  $dM/M = 2 \cdot 0,03 \text{ mm} / 3 \text{ mm} = 0,02$ , d.h. die Streuung durch die nicht perfekte Geometrie steht der gewünschten Auflösung entgegen. Für ein anderes Filter mit dem größeren Feldradius 12 mm ergibt sich  $dM/M = 2 \cdot 0,03 \text{ mm} / 12 \text{ mm} = 0,005$ , die Geometrie steht also der gewünschten Auflösung nicht im Wege. Mit anderen Worten: Hat man bei beiden Filtern eine Auflösung von  $\Delta M/M = 0,01$  eingestellt, so werden im ersten Fall die meisten Ionen das Filter nicht passieren können. Beim großen Filter des zweiten Quadrupols können dagegen alle Ionen das Filter passieren.

Diese vereinfachte Fehlerrechnung berücksichtigt bei weitem nicht alle Effekte, die zur Transmission beitragen, sie lehrt 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 in dem man benachbarte Massen noch unterscheiden will, desto strenger werden die Anforderungen an die relative Genauigkeit des Massenfilters.

### Zusammenfassung

Das Quadrupol-Massenfilter 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 seiner geringen Abmessungen und seines geringen Gewichtes eignen sich Quadrupol-Massenspektrometer sowohl als reine Restgasanalysatoren, als auch in einer qualitativ höherwertigen Ausführung als Sensoren für die Gasanalyse.



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

Tabella 6.1 Filamentmaterialien und deren Anwendungen

(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir) ausgestattet werden können. Die W-Kathoden werden bevorzugt im UHV-Bereich eingesetzt, bzw. dort, wo der Dampfdruck von Re schon störend wirken kann. Zu beachten ist jedoch die Versprödung von Wolfram-Kathoden durch den Wolfram-Kohlenstoff-Sauerstoff-Zyklus, das heißt durch die Bildung von W<sub>2</sub>C. Zunehmend wird anstelle der früheren Reinmetallkathoden 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 von temperaturempfindlichen Substanzen, z. B. metallorganische Verbindungen, oder die Analyse von Verunreinigungen in Gasgemischen mit hohem Sauerstoffanteil.

Die unterschiedlichen Ionenquellen werden im Folgenden an Hand Ihrer Eigenschaften und Anwendungsgebiete beschrieben. Allen Ionenquellen ist gemeinsam, dass sie auf ein Potential bis zu 150 V gelegt werden können. So wird ein Signaluntergrund durch EID-Ionen vermieden (EID = Electron Impact Desorption, auch: ESD = Electron Stimulated Desorption). 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 6.6. 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

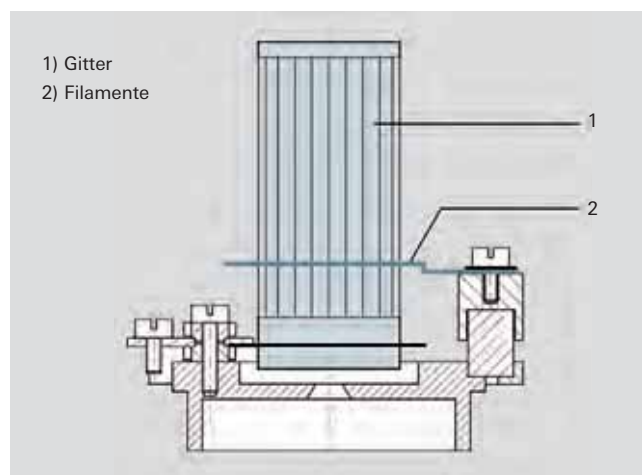


Abbildung 6.9 Gitterionenquelle

Zur Restgasuntersuchung in UHV- oder gar XHV-Anwendungen benutzt man die Gitterionenquelle. Die extrem offene Bauweise und die Materialwahl sorgen für eine sehr geringe Eigengasabgabe. Diese Ionenquelle ist mit zwei Wolfram-Filamenten ausgerüstet, die zur Entgasung gleichzeitig beheizt werden können. Soll bei Drücken unterhalb 10<sup>-11</sup> hPa gearbeitet werden, so benutzt man extra für diesen Zweck hoch entgaste Stabsysteme. Messungen im Druckbereich kleiner 10<sup>-10</sup> hPa können durch sogenannte EID-Ionen verfälscht werden [32]. Diese (H<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, F<sup>+</sup>, Cl<sup>+</sup>) Ionen werden durch Elektronenbeschuss 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 Feldachspannung zur Unterdrückung der EID-Ionen gegenüber Ionen aus der Gasphase mit einer Energie von ca. 100 eV genutzt, (Abbildung 6.10).



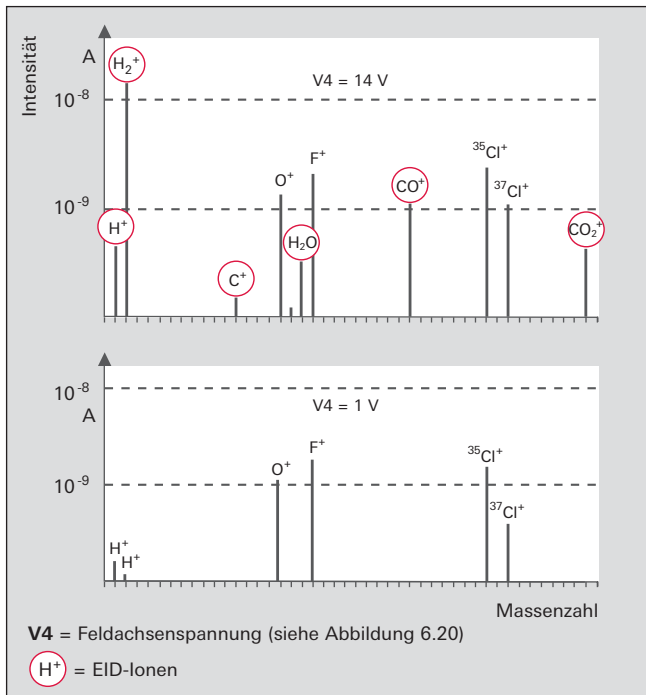


Abbildung 6.10 Diskriminierung von EID-Ionen

### Cross-Beam-Ionenquelle

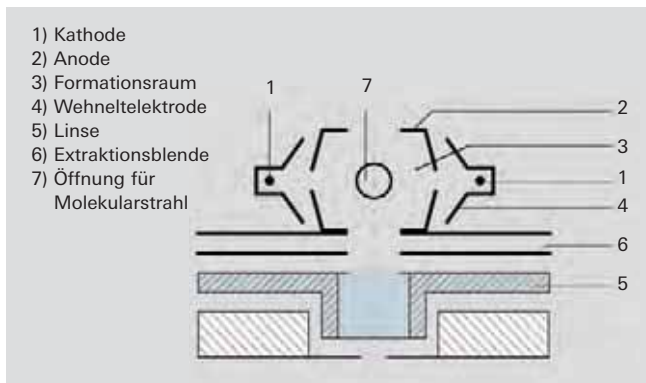


Abbildung 6.11 Cross-Beam-Ionenquelle

Die Cross-Beam-Ionenquelle Abbildung 6.11 gestattet den direkten Durchtritt von Molekularstrahlen 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 Filamentpotential verhindert Streuung der Elektronen in die Umgebung. Wegen der in weiten Grenzen einstellbaren Elektronenenergie kann diese Ionenquelle zur Bestimmung des Appearance-Potentials 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 (Abbildung 6.11) in den Formationsraum ein. Neutrale Gasmoleküle die nicht ionisiert wurden, werden nach Durchgang durch die Ionenquelle (7) entweder in eine Pumpe oder in eine Kühlfalle zwecks Kondensation eingeleitet. Massenspektrometer mit dieser Ionenquelle werden auch als „Rate-Meter“ in der Molekularstrahlpitaxie verwendet.

### Gasdichte Ionenquelle

Einige der zuvor beschriebenen Ionenquellen sind auch in gasdichten Versionen erhältlich. Gasdichte Ionenquellen werden eingesetzt, wenn nur geringe Mengen Proben gas 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.

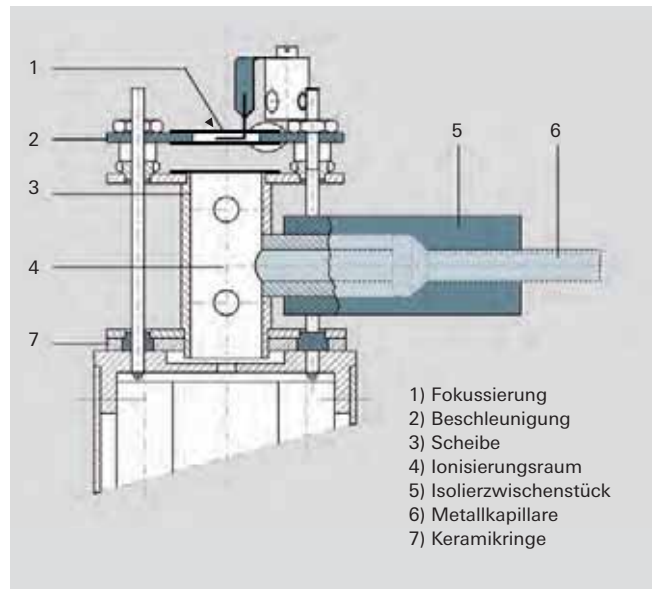


Abbildung 6.12 Gasdichte Axialionenquelle

Das zu analysierende Gas wird über eine auf Erdpotential liegende Metallkapillare (6) und ein Isolierzwischenstück (5) direkt in den Formationsraum (4) der Ionenquelle eingeleitet. Die Abdichtung erfolgt durch die Scheibe (7). Der Leitwert zum Vakuumraum hin beträgt etwa 1 l/s.

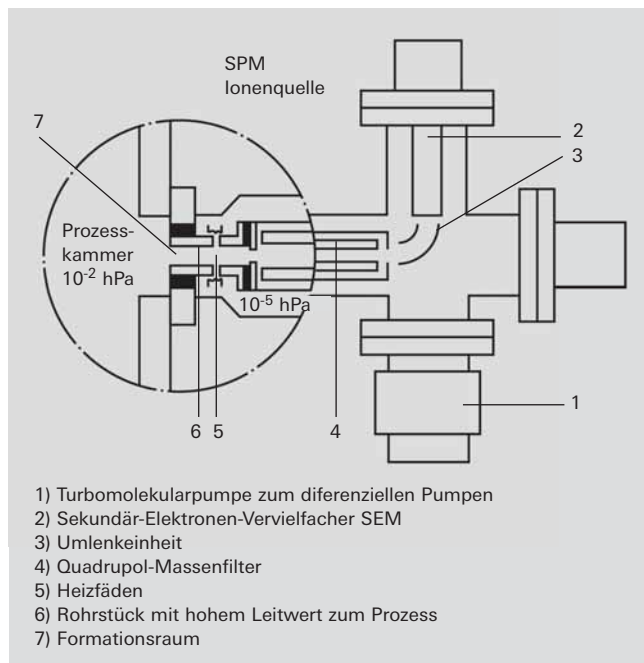


Abbildung 6.13 SPM- Ionenquelle

### 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) auf etwa  $10^{-5}$  hPa evakuiert. Von der Niederdruckseite werden durch kleine Löcher Elektronen zur Ionisierung in den Formationsraum (7) eingeschossen. 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 Kontamination durch die heiße Kathode vermieden.

### Standard-Ionenquelle PrismaPlus

Das PrismaPlus Massenspektrometer von Pfeiffer Vacuum ist mit dieser robusten und hochempfindlichen Ionenquelle ausgestattet, die speziell für Restgasanaly-



offene Ausführung

gasdichte Ausführung

Abbildung 6.14 PrismaPlus-Ionenquellen

sen geeignet ist. In ihrem Aufbau ist sie vergleichbar mit einer Gitterionenquelle. Sie verfügt wie diese über zwei Kathoden und gewährleistet damit einen besonders sicheren Betrieb. Es gibt eine offene und eine gasdichte Ausführung mit Gaseinlass in Achsrichtung.

Alle hier beschriebenen Ionenquellen ionisieren durch Elektronenstoß, man kann sie in zwei Typen aufteilen:

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

Letztere werden zusammen mit einem differentiell gepumpten System benutzt (Abbildung 6.13), um Gase höherer Drücke zu analysieren.

### 6.3.3 Detektor

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

- Faraday-Cup zur direkten Messung des Ionenstromes mit Hilfe eines Elektrometerversärkers
  - Sekundärelektronenvervielfacher, diskret aufgebaut mit einzelnen Dynoden
  - kontinuierlicher Sekundärelektronenvervielfacher
- Die Auswahl des Detektors richtet sich primär nach den Anforderungen an die Nachweisempfindlichkeit, die Messgeschwindigkeit und das Signal/Rausch-Verhältnis. Sie wird aber auch durch andere applikationsspezifische Forderungen an die Stabilität, die thermische und chemische Beständigkeit und den Platzbedarf bestimmt.

### Faraday-Cup

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

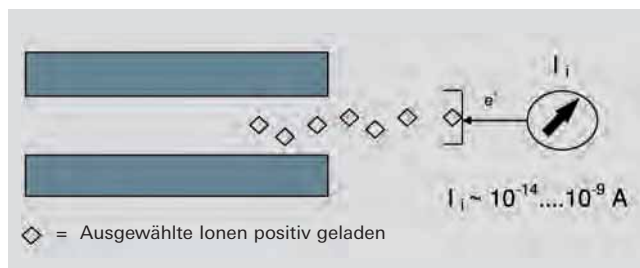


Abbildung 6.15 Funktionsweise des Faraday-Cup

Der daraus resultierende Strom wird mit einem empfindlichen Strom-Spannungs-Wandler (Elektrometerversärker) in eine dem Ionenstrom proportionale Spannung überführt. Die Empfindlichkeit des Elektrometerversärkers mit Faraday-Cup liegt typischerweise in der Größenordnung  $K = 10^{-4}$  A/hPa. 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  $1 \cdot 10^{-16}$  bis  $1 \cdot 10^{-14}$  A, es können daher minimale Partialdrücke der Größenordnung  $p_{min} = 10^{-10}$  hPa nachgewiesen werden. Für UHV-Systeme mit Totaldrücken unter  $10^{-8}$  hPa ist das in der Regel nicht ausreichend.

Neben der einfachen, robusten Bauweise zeichnet sich ein Faraday-Detektor durch seine Langzeitstabilität und hohe Temperaturbelastbarkeit aus. Um die Zeitkonstanten klein zu halten und andere störende Einflüsse zu vermeiden, wird der Elektrometerverstärker 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, sogenannte Sekundärelektronenvervielfacher.

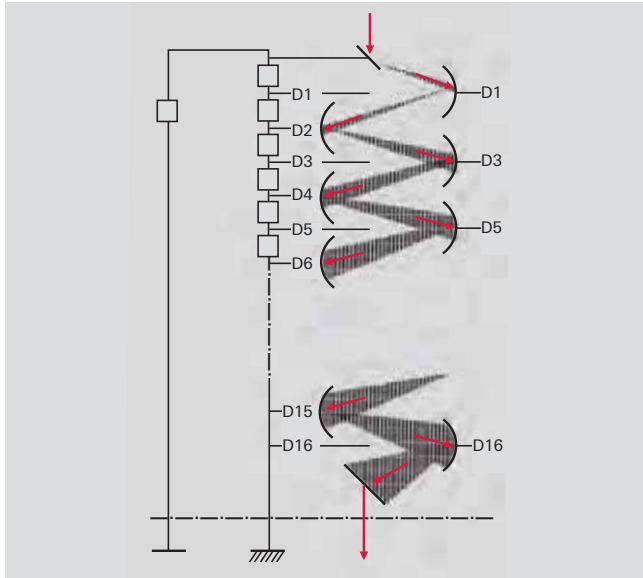


Abbildung 6.16 Sekundärelektronenvervielfacher SEV

### Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)

Abbildung 6.16 zeigt den Aufbau eines solchen Verstärkers (engl. SEM = Secondary Electron Multiplier). Zylindrisch geformte Bleche (Dynoden) sind mit 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 zwi-

schen den Dynoden an. Technisch wird diese Anordnung durch eine mit einer Hochspannung (ca. 1.000 – 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 Erdpotential 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  $K = 10 \text{ A/hPa}$  sind möglich.
- Hierdurch können niedrigere Partialdrücke mit dem nachgeschalteten Elektrometerverstärker in kürzeren Zeitintervallen gemessen 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 nützt wenig.

Ein SEM hat aber auch Nachteile:

- Die Verstärkung kann sich ändern durch Verschmutzung oder chemische Veränderung der aktiven Schicht.
- 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, welche die Energie der verschiedenen Ionen angleicht.

Mit Hilfe von Sekundärelektronenvervielfachern sind sehr schnelle Messungen möglich. Wie aus der Tabelle 6.2 ersichtlich ist, sind die Messgeschwindigkeiten im Vergleich zu Faraday-Cups wesentlich höher.

Diskret aufgebaute SEM eignen sich neben dem Betrieb als Stromverstärker 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.

	PrismaPlus	HiQuad mit SEM 217	HiQuad mit SEM 218
<b>Detektoren</b>	<b>Faraday / C-SEM</b>	<b>Faraday / SEM</b>	<b>Faraday / SEM mit Konversionsdynode</b>
Höchstmöglicher Druck Faraday-Cup	$10^{-3}$ hPa	$10^{-4}$ hPa	$10^{-4}$ hPa
Höchstmöglicher Druck SEM, C-SEM	$10^{-5}$ hPa	$10^{-5}$ hPa	$10^{-5}$ hPa
Höchste Messgeschwindigkeit / amu	2 ms	125 $\mu$ s	125 $\mu$ s
Ausheiztemperatur (max)	300 °C	400 °C	400 °C
Zählbetrieb	Nein	Ja (optional)	Ja (optional)
Detektion positiver Ionen	Ja	Ja	Ja
Detektion negativer Ionen	Nein	Ja	Nein

Tabelle 6.2 Detektoren und deren Eigenschaften

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  $< 10^{-5}$  hPa. Höhere Drücke führen beim Betrieb zur Pyrolyse der Wasserschicht auf den Dynoden und damit zu vorzeitiger Alterung. Die hohen Spannungen können bei  $p > 10^{-5}$  hPa Gasentladungen bewirken, die den SEM zerstören.

### Kontinuierlicher Sekundärelektronenvervielfacher

Ein kontinuierlicher Sekundärelektronenvervielfacher (C-SEM = Continuous Secondary Electron Multiplier) besteht aus einem Glasrohr, das innen mit einer leitfähigen Schicht mit hohem Widerstand und kleiner Austrittsarbeit belegt ist (Abbildung 6.17). 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 2.500 V Verstärkungsspannung erreicht.

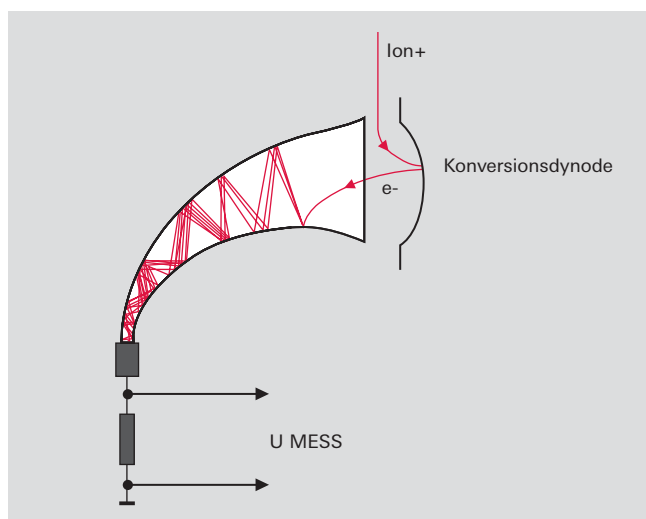


Abbildung 6.17 Funktionsweise des kontinuierlichen C-SEM

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 Faraday-Cup als auch C-SEM nebeneinander im Analysator benutzen und sogar bei Bedarf von einem Detektor auf den anderen umschalten.

### 6.3.4 Vakuumsysteme

Die Ionen müssen das Quadrupolfilter durchlaufen können, ohne mit Neutralgasteilchen zusammenzustoßen. Dies erfordert für den Betrieb von Quadrupol-Massenspektrometern mittlere freie Weglängen die bei Drücken  $p < 10^{-4}$  hPa erreicht werden. Dazu ist ein entsprechender Pumpstand mit Drucküberwachung erforderlich. Damit eine Gasanalyse mit optimaler Empfindlichkeit durchgeführt werden kann, ist nicht nur ein geringer Basisdruck erforderlich, sondern das Restgas sollte nur unvermeidliche Partialdruckanteile der Desorption von den Wänden der Apparatur beinhalten. Restgasspektren dieser Art und niedrige Basisdrücke erreicht man am besten mit Turbodrumpumpständen (Abbildung 4.27). Eine zusätzliche Totaldruckmessröhre schützt das Massenspektrometer vor dem Einschalten bei zu hohem Druck. Beim Aufbau eines solchen Systems ist auf die sinnvolle Anordnung von Gaseinlass, Ventilen, Pumpen und Messgeräten zu achten, um Verfälschungen durch ungünstige Strömungsverhältnisse zu vermeiden. Bei Vakuumprozessen, die bei hohem Druck ablaufen, ist oft ein getrennter Pumpstand erforderlich, der das Messsystem evakuiert. Zu diesem Zweck benutzt man kleine Pumpstände mit Turbodrumpumpen und Membranpumpen.

### 6.3.5 Einlasssysteme

In der Gasanalyse müssen die zu untersuchenden Gasgemische meist von Atmosphärendruck auf den Arbeitsdruck des Massenspektrometers (MS) entspannt werden. Viele vakuumtechnische Prozesse, die mit Massenspektrometern überwacht werden sollen, finden in Druckbereichen  $p > 10^{-4}$  hPa statt. Eine wesentliche Komponente eines Quadrupol-Massenspektrometers ist daher ein für die Anwendung geeignetes Gaseinlasssystem. Je nach Druckgradient werden unterschiedliche Verfahren zur Druckreduktion eingesetzt.

Gasgemische müssen möglichst ohne Entmischung in das Massenspektrometer eingelassen werden:

- Bei Drücken  $p > 10$  hPa 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  $p < 10$  hPa reduziert man den Druck über eine Blende und ein mit einer Turbomolekularpumpe differentiell gepumptes Massenspektrometer.
- Bei Drücken  $p < 10^{-4}$  hPa kann das Massenspektrometer mit einer offenen Ionenquelle direkt in die Prozesskammer eingebaut werden.

Bei Verwendung einer Blende zur Druckreduzierung wird deren gasartabhängiger Leitwert durch den ebenfalls gasartabhängigen Leitwert des Strömungsweges zur Pumpe hin wieder aufgehoben, sodass die Konzentrationen im QMS der wahren Gaszusammensetzung entsprechen.



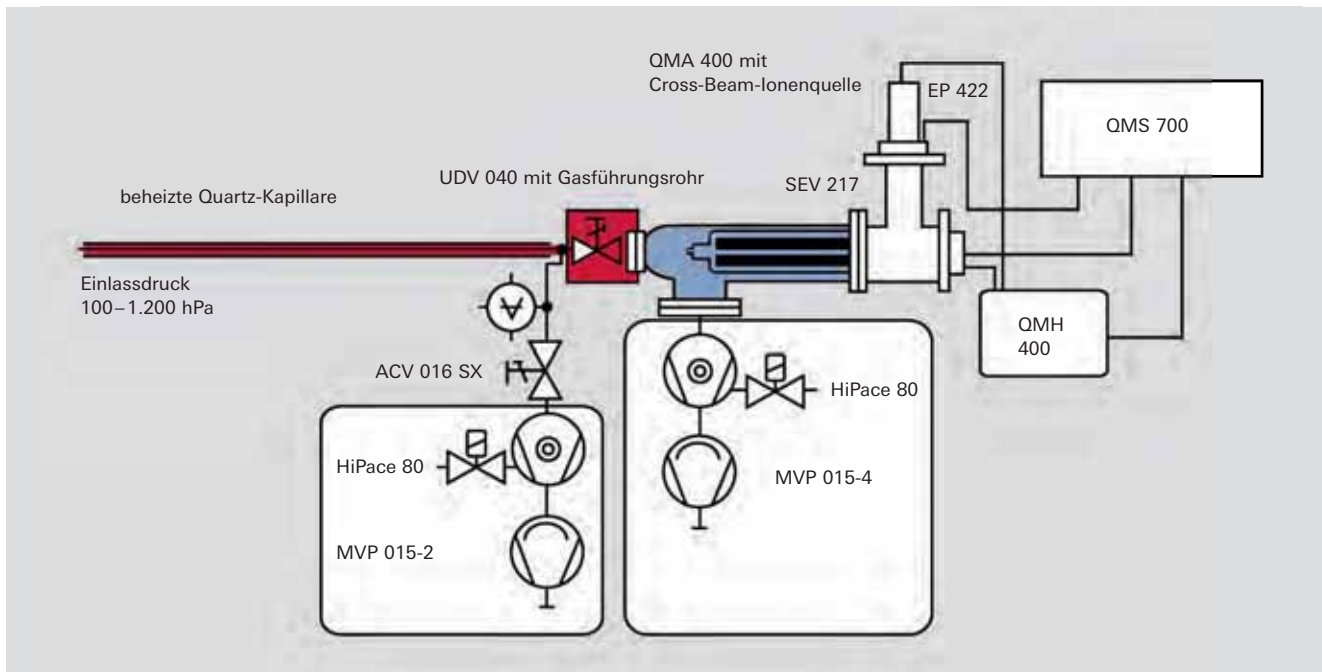
Einlasssystem	Druckbereich	Produktbeispiel	Charakteristik
Ohne Druckreduktion	10 <sup>-12</sup> bis 10 <sup>-4</sup> hPa	PrismaPlus QMG 220, HiQuad QMG 700	Mit verschiedenen Ionenquellen kann ein weiter Druckbereich abgedeckt werden
SPM-Ionenquelle	10 <sup>-9</sup> bis 10 hPa	PrismaPlus SPM 220, HiQuad 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 hPa, 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
Blendeneinlas	0,1 bis 10 hPa, 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
Dosierventi	0,1 bis 1.000 hPa	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
Druckgeregelter Gaseinlass	10 <sup>-3</sup> bis 1.000 hPa	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

**Table 6.3** Verschiedene Gaseinlasssysteme und deren Eigenschaften

**6.3.6 Anwendungshinweise**

Die Analysemöglichkeiten mit Massenspektrometern sind ebenso vielfältig wie die Anwendungen des Vakuums. Bei der Gasanalyse im Druckbereich bis Atmosphärendruck setzt man die oben beschriebenen Gaseinlass-

systeme 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 direkt in eine Vakuumpumpe einfallen.



**Abbildung 6.18** QMS mit Gaseinlasssystem und Cross-Beam-Ionenquelle



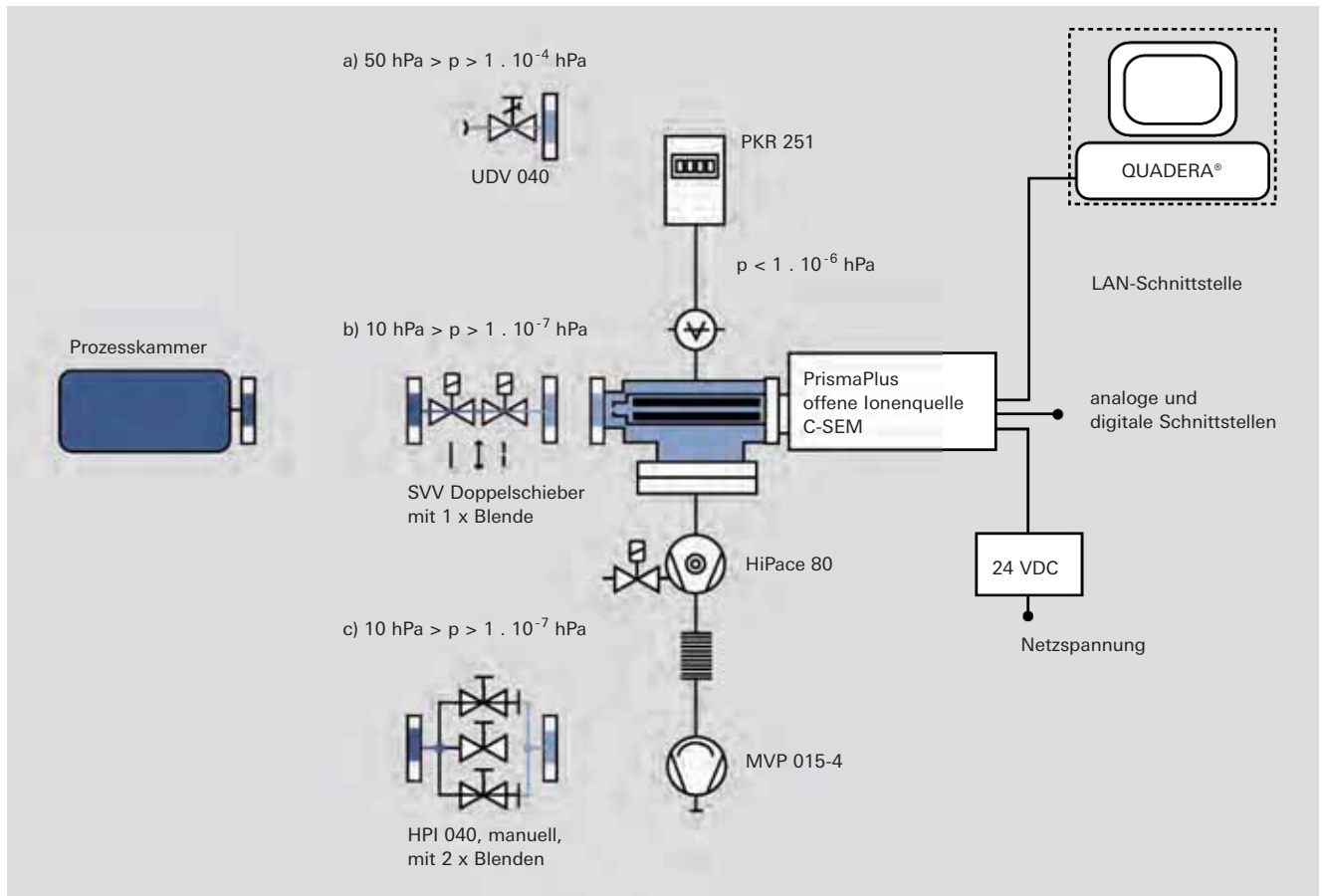


Abbildung 6.19 Differenziell gepumptes QMS mit verschiedenen Gaseinlässen

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

Bei sehr niedrigen Drücken, besonders im UHV Bereich, benutzt man offene Ionenquellen, die sich durch eine besonders geringe Oberfläche auszeichnen und damit niedrige Ausgasraten aufweisen (Gitterionenquelle). 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 Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) dar. Hierbei werden Ionen auf Oberflächen geschossen, die ihrerseits positiv oder negativ geladene Sekundärionen freisetzen. Diese werden direkt von einem QMS ohne Ionenquelle nachgewiesen. Auch hier benutzt man die im vorigen Abschnitt beschriebene Messanordnung.

## 6.4 Portfolio

Pfeiffer Vacuum bietet zwei Grundmodelle von Massenspektrometern an:

- Das kompakte PrismaPlus mit  $\varnothing$  6 mm Stabsystem und 100 mm Länge und
- das hoch auflösende HiQuad mit Massenfiltern von  $\varnothing$  8 oder  $\varnothing$  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 u, 200 u und 300 u
- 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 u, 1-128 u, 1-340 u, 1-300 u, 1-512 u, 1-1.024 u und 1-2.048 u werden von unterschiedlichen Modellen abgedeckt.
- Es gibt verschiedene Massenfilter mit 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 Neutral-Teilchen und positiven sowie negativen Ionen (SIMS).
- Alle Arten von Detektoren, Faraday-Cup, Faraday-Cup und SEM, Faraday-Cup und C-SEM sowie Ionenzähler sind in unterschiedlichen Anordnungen verfügbar.
- Diese Massenspektrometer können mit Hilfe von Ein/Ausgabe-Modulen in Analysensysteme integriert werden.

### Module

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

- Der HPA 220 High Pressure Analyzer basiert auf dem PrismaPlus. Prozessdruck bis 50 hPa, manuelle und automatische Gaseinlasssysteme stehen zur Verfügung
- Der SPM 220 Sputter Process Monitor basiert auf dem PrismaPlus. Prozessdruck bis  $10^{-2}$  hPa oder 10 hPa durch verschiedene Gaseinlassoptionen
- 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  $10^{-2}$  hPa

### Benchtop-Massenspektrometer

Pfeiffer Vacuum bietet komplette Systeme für die Analyse von Gasen bei Atmosphärendruck, basierend auf dem PrismaPlus. Die optimierten Gaseinlasssysteme verwenden geschlossene Ionenquellen zur Erzielung höchster Nachweisempfindlichkeiten.

- Der **OmniStar** GSD 320 O dient zur quantitativen Gasanalyse bei Atmosphärendruck mit beheiztem und temperaturgeregelten Gaseinlasssystemen.
- Der **ThermoStar** GSD 320 T ist für die Kopplung mit Thermowaagen vorgesehen. Mittels einer Quarzkapillare können Gasproben mit hoher Temperatur eingelassen werden. Die inerte Quarzoberfläche verhindert Oberflächenreaktionen und vermeidet dadurch eine Verfälschung der Messergebnisse.

Diese Geräte oder Teile davon werden von OEM-Kunden in Komplettergeräten eingebaut, die eine Vielzahl weiterer Funktionen aufweisen können, wie eine vorgeschaltete Aufbereitung der zu analysierenden Substanzen (z. B. Verdampfung von Aerosolen) oder die Bereitstellung von Kalibriergasgemischen für eine automatische Kalibrierung.

#### 6.4.1 Vorteile der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer

Der Potentialverlauf in einer Pfeiffer Vacuum Ionenquelle ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Die Elektronen emittierende Heißkathode liegt auf einem Potential 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 Potential  $V_5 = -150$  V beschleunigt und von der Fokussierungs-

elektrode wieder auf  $V_3 = 80$  V abgebremst. Die Einschussblende beschleunigt die Ionen nochmals, bevor sie dann vom Feldachsenpotential  $V_4 = 85$  V abgebremst mit einer Energie von etwa 15 eV (Differenz zwischen Formationsraum und Feldachse) ins Massenfilter eintreten.

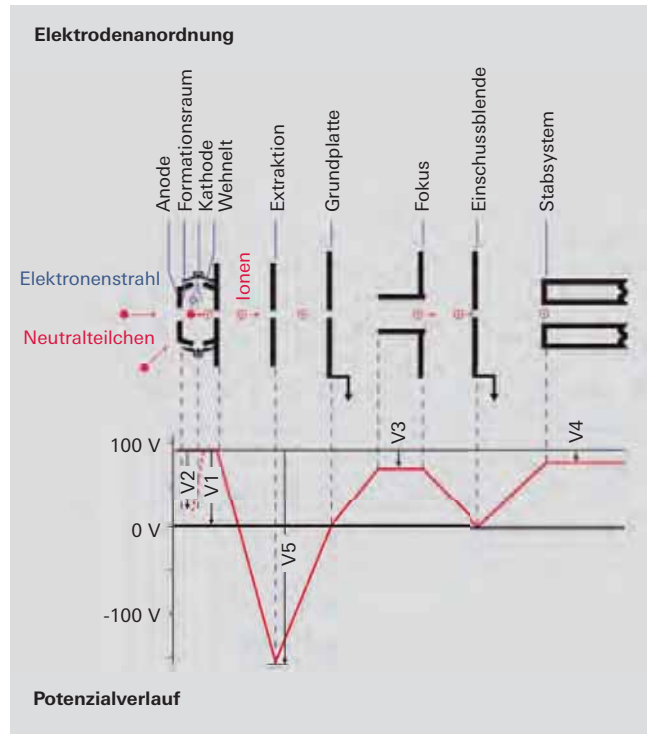


Abbildung 6.20 Potentialverlauf in einer elektrisch hochgelegten Ionenquelle

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

#### Elektrisch hochgelegte Ionenquelle

Bei vielen Quadrupol Massenspektrometern liegt die Kathode auf Erd- oder gar negativem Potential. 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 (Electron Impact Desorption) 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 Potential (ca. 100 – 150 V). Von dort emittierte Elektronen werden von allen Oberflächen mit negativem Potential abgestoßen und so von diesen ferngehalten, sodass keine störenden EID-Ionen ausgelöst werden.

#### Feldachsenteknologie

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 zu bewegen. So erreicht man optimale Einschussbedingungen in das Quadrupolfeld auch ohne Vorfilter, wie sie bei anderen Massenspektrometern verwendet werden müssen. 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 Gesamt-Systems erreicht.

### Rechtwinklige Anordnung des Sekundärelektronenvervielfachers

Ein weiterer Vorteil der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer ist die Anordnung der Sekundärelektronenvervielfacher SEV um 90° abgewinkelt zu Filterachse (90 degrees off axis SEM, Abbildung 6.21).

Ordnet man den SEM in Achsrichtung hinter dem Massenfilter an, so erzeugen alle auftreffenden Teilchen (Neutralteilchen, Ionen, Elektronen, Photonen) Sekundärelektronen und tragen damit zum Untergrundsignal bei. Um dies zu vermeiden werden die aus dem Filter austretenden Ionen um 90 Grad 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 dieser Technologie 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 von den unerwünschten Teilchen getrennt.

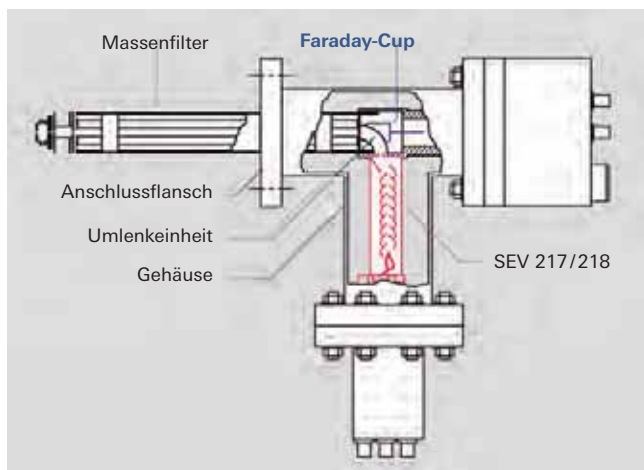


Abbildung 6.21 90° off axis SEM

### Massendiskriminierung

Die Zahl der Sekundärelektronen, die für jedes auf der Konversionsdynode eintreffende Ion gebildet werden, hängt von der Ionenmasse, der Art des Ions (Atom- oder Molekulation) und der Ionenenergie ab. Die Konversionsrate ist also 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 hoch gelegte Ionenquelle mit geeignet gewählter Feldachstechnologie sowie die 90°-Anordnung des SEM verbessern das Signal/Rausch-Verhältnis erheblich. Die Massendiskriminierung an einem SEV oder einem C-SEM kann mit Hilfe einer auf hohe Spannung gelegten Konversionsdynode reduziert werden.

Quadrupol-Massenspektrometer zeichnen sich gegenüber anderen Aufbauten aus durch:

- Kleine Baugröße und geringes Gewicht
- Linearen Zusammenhang zwischen Masse und HF-Spannungsamplitude
- Hohe Empfindlichkeit
- Großen Signal/Rausch-Verhältnis
- Hohe Messgeschwindigkeit und Wiederholrate
- Großen dynamischer Bereich (bis zu 10 Dekaden)
- Beliebige Einbaulage
- Keine störenden Magnetfelder

Mit diesen Vorteilen hat sich das Quadrupol-Massenspektrometer zum meist verwendeten Massenspektrometer entwickelt.

### 6.4.2 Datenauswertesystem

Ein Quadrupol-Massenspektrometer liefert in kurzer Zeit eine große Menge an Informationen, für deren Darstellung und Speicherung ein PC das geeignete Gerät ist. Daher weisen die elektrischen Betriebsgeräte der Pfeiffer Vacuum Massenspektrometer nur rudimentäre Bedien- oder Anzeigeelemente auf. Die Bedienung, Datenanzeige, -auswertung und -speicherung erfolgen mit der Software QUADERA® am PC.

Die Pfeiffer Vacuum Massenspektrometersoftware QUADERA® ist ein modulares System für die Geräte PrismaPlus und HiQuad. Der PC kann über Ethernet mit den Massenspektrometern kommunizieren, sodass die Leitungslänge zwischen Spektrometer und Rechner keine Rolle spielt.

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

Typische Anzeigeformate sind:

- Massenspektren mit einstellbarem Massenbereich und linearer oder logarithmisch eingeteilter Achse für die Konzentration
- Darstellung des zeitlichen Verlaufs von Partialdrücken
- Balkendiagramm-Darstellung (Bargraph) zur Reduzierung der Datenmenge

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

Sollen quantitative Analysen durchgeführt werden, so ist das Massenspektrometer vorher zu kalibrieren. Handelt es sich um wiederkehrende Abläufe wie z. B. Kalibrierung mit anschließender quantitativer Analyse, so lassen sich diese mittels VSTA (Visual Studio Tools for Applications) programmieren. Da dafür vorgefertigte Module benutzt werden können, sind keine speziellen 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 Überlappungen 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 diverser Anteile von Bruchstückionen verschiedener Gaskomponenten bestimmt. Je nach Zusammensetzung und Konzentrationsverhältnissen im zu analysierenden Gasgemisch sind also jeweils geeignete Algorithmen und Kalibrierverfahren für die vorliegende Messaufgabe zu formulieren. So sind vor der Ausführung quantitativer Gasanalysen durch die Aufschaltung geeigneter Kalibrierungsmischungen mit jeweils nicht überlappenden Komponenten, die jeweiligen Kalibrierfaktoren für jede einzelne Gaskomponente auf allen überlappenden Massenzahlen zu bestimmen. Danach kann im Rahmen einer Matrixrechnung die Konzentration bzw. der Partialdruck für diese Gase ermittelt werden. Die Massenspektrometersoftware QUADERA® unterstützt solche Matrixrechnungen und stellt die notwendigen gasspezifischen Kalibrierroutinen zur Verfügung.

# 7 Lecksuche

## 7.1 Allgemeines

### 7.1.1 Lecks und deren Nachweis

In der zerstörungsfreien Prüfung wird ein Leck definiert als ein Loch, ein poröser Bereich, ein gasdurchlässiger Bereich oder eine andere Struktur in der Wand eines Prüfobjektes, durch welche aufgrund einer Druck- oder Konzentrationsdifferenz Gas von einer Seite der Wand auf die andere gelangen kann [33]. 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. Die Geometrie der Löcher ist dabei unbekannt. Der Prüfer weiß also nicht, ob es sich beim Leck um ein kreisrundes Rohr mit glatten Wänden handelt oder ob der Leckkanal z. B. die Form eines Risses oder Spalts aufweist. Nur für ideale Geometrien können Annahmen getroffen und Berechnungen durchgeführt werden. Nachdem die reale Geometrie eines Leckkanals meist unbekannt ist, können hier berechnete Werte nur als Obergrenze für eine Leckrate angenommen werden. HINWEIS: Die bereits zitierte Norm 1330-8 benutzt den Ausdruck „Leckagerate“. Aus Gründen der Lesbarkeit verwenden wir hier weiterhin den gebräuchlichen Ausdruck „Leckrate“.

Bei einem Leck kann es sich um einfache, harmlose Undichtigkeiten wie z. B. einen tropfenden Wasserhahn handeln. Gravierende Konsequenzen können Lecks durch den Austritt aggressiver Medien oder toxischer Substanzen haben. Auch das Unglück der US-Raumfähre Challenger im Jahre 1986 ist auf Versagen eines O-Rings an der Feststoffrakete und Austritt heißen Verbrennungsgases zurückzuführen.

Viele technische Produkte funktionieren nicht oder nicht ausreichend lange, wenn sie Lecks aufweisen.

Als Beispiele seien genannt:

- der Kältekreislauf von Kühlschränken
- Klimaanlage in Autos
- Autoräder
- Benzin- und Heizöltanks
- Prozessanlagen in der chemischen bzw. pharmazeutischen Industrie.

Die Dichtigkeit 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.

### 7.1.2 Leckrate

Betrachten wir einen Fahrradreifen mit einem Volumen von 4 Litern. Er ist auf einen Druck von drei bar (3.000 hPa) aufgepumpt und soll nach der Zeit von 30 Tagen ohne Nachpumpen einen Druckverlust von maximal einem bar (1.000 hPa) haben.

Die Leckrate wurde bereits in Kapitel 1.3.3 nach Formel 1-35 definiert.

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

$Q_L$	Leckrate	[Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\Delta p$	Druckänderung während der Messzeit	[Pa]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta t$	Messzeit	[s]

oder anschaulich: Die Leckrate eines Behälters mit einem Volumen von 1 Kubikmeter beträgt 1 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, wenn der Druck im Inneren innerhalb von 1 Sekunde um 1 Pa ansteigt oder abfällt. Die Umrechnung in andere gebräuchliche Einheiten entnehmen Sie bitte Tabelle 1-8 oder unserer App.

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

$$Q_L = \frac{1 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{30 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Mit dieser Leckrate ist der Fahrradschlauch also funktionsgerecht dicht. Leckraten in dieser Größenordnung kann man mit der altbekannten Blasenleckttestmethode (Abbildung 7.1) finden.

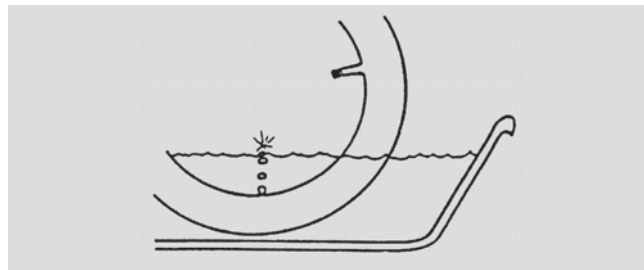


Abbildung 7.1: Blasenleckttest bei einem Fahrradschlauch



Betrachten wir nun einen Kühlschrank, der über einen Zeitraum von 10 Jahren 10 g eines Kältemittels verlieren darf. Als Kältemittel setzen wir R134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan) ein mit einer molaren Masse von 102 g mol<sup>-1</sup>. Der erlaubte Verlust beträgt also etwa 224 Pa m<sup>3</sup>. Daraus ergibt sich eine zulässige Leckrate von

$$Q_L = \frac{224 \text{ Pa m}^3}{10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s}} = 7,1 \cdot 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

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

### 7.1.3 Prüfgase

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

Sie sollen

- für Mensch, Tier und Umwelt **ungiftig** sein
- die **Luft nicht verdrängen**, sonst kann es zu bedrohlichen Situationen wie Erstickung kommen
- **inert**, d. h. reaktionsträge sein, 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
- durch **Prüflecks** quantifizierbar sein.

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. Der spezifische Nachweis gelingt mittels der Massenspektrometrie, einem höchst empfindlichen und sehr selektiven Analyseverfahren (siehe Kapitel 6.1 und 7.2). Eine Vielzahl kommerziell erhältlicher Prüflecks sind entweder als Diffusionsleck oder als Strömungsleck ausgeführt.

Die oben angeführten Kriterien werden von fast keinem anderen Prüfgas erfüllt, eine Ausnahme ist Formiergas 95/5, eine Mischung aus 95% Stickstoff und 5% Wasserstoff. Der brennbare und in einem weiten Mischungsverhältnis mit Luft explosionsfähige Wasserstoff ist hier so stark verdünnt, dass die Mischung weder explosionsfähig noch brennbar ist und damit als Testgas sicher. Dieselben massenspektrometrischen Detektoren können ebenfalls für den empfindlichen Nachweis von Wasserstoff eingesetzt werden. Wegen des höheren Untergrundsignals von Wasserstoff in der eingesetzten Analysetechnik wird jedoch nicht dieselbe Nachweisempfindlichkeit wie mit dem Prüfgas Helium erreicht, die Nachweisempfindlichkeit von Druckänderungsverfahren jedoch immer noch deutlich übertroffen.

## 7.2 Lecksuche mit Prüfgasen

Zum Nachweis von Prüfgasen setzt Pfeiffer Vacuum Lecksuchgeräte auf der Basis von Massenspektrometern und Quarzfenstersensoren ein. Massenspektrometer ionisieren ein Gasgemisch und isolieren das gewünschte Prüfgas durch das Masse-zu-Ladungs-Verhältnis. Quarzfenstersensoren basieren auf der selektiven Permeation leichter Gase durch eine Quarzmembran.

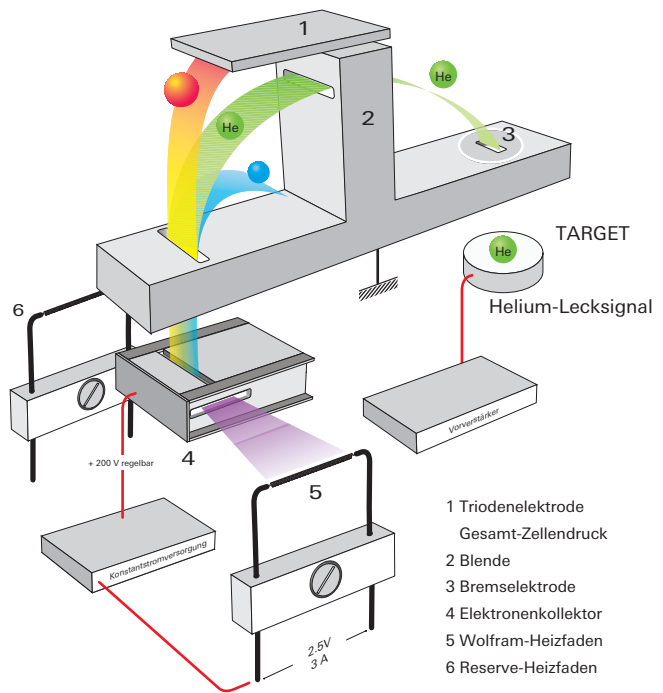
### 7.2.1 Aufbau eines Lecksuchers mit Massenspektrometer

Die Funktion von Quadrupol-Massenspektrometern ist in Kapitel 6.1.2 dargestellt. Diese Geräte werden sowohl als reine Restgas- oder Prozessgas-Analysatoren in Vakuumsystemen eingesetzt als auch zur Lecksuche genutzt. Einlasssysteme zur Analyse von Gasgemischen bei höheren Drücken – auch zur Lecksuche – sind in Kapitel 6.1.2.5 beschrieben. Gasanalysensysteme auf der Basis von Quadrupol-Massenspektrometern können als Multigas-Lecksuchgeräte eingesetzt werden.

Die Funktion von Sektorfeld-Massenspektrometern ist in Kapitel 6.1.1 dargestellt.

Auch die in Abbildung 7.2 gezeigte Spektrometerzelle eines Lecksuchgeräts funktioniert nur bei Drücken unterhalb von 10<sup>-4</sup> hPa. In Lecksuchgeräten wird dieser Druck durch ein eigenes Pumpsystem erzeugt und aufrecht erhalten. Hierzu sind keine Bedieneingriffe erforderlich.

Lecksucher mit massenspektrometrischen Analysatoren sind nach dem Schema in Abbildung 7.3 aufgebaut.



Elektronenstrahl



"Schwere" Ionen



Heliumionen



"Leichte" Ionen

Abbildung 7.2: Funktion eines Sektorfeld-Massenspektrometers

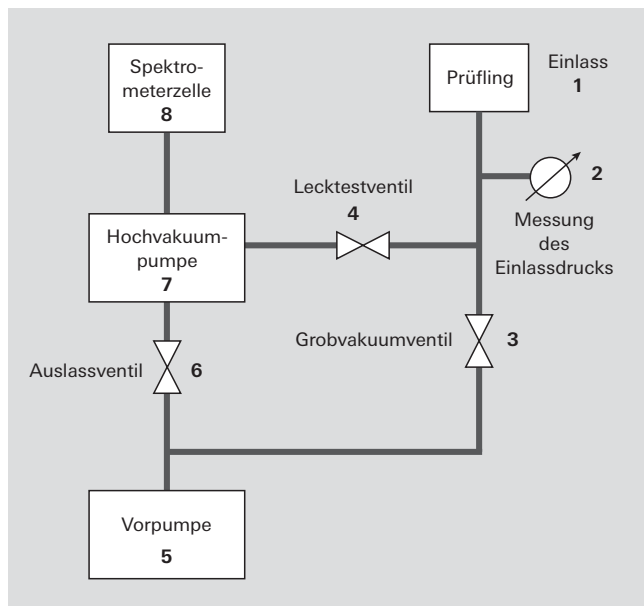


Abbildung 7.3: Generelles Fließschema eines Lecksuchgeräts

Ein Massenspektrometer (**Spektrometerzelle**) für die Massen 2, 3 und 4 (entsprechend den Prüfgasen  $H_2$ ,  $^3He$  und  $^4He$ ) ist auf dem Saugflansch einer Turbopumpe (Hochvakuum-pumpe) montiert. Eine **Vorpumpe** evakuiert über das Auslassventil (6) die Turbopumpe. Ein **Prüfling** (in der DIN EN 1330-8 auch „Prüfobjekt“ genannt) wird über den Einlass bei geöffnetem Ventil (3) evakuiert. Die Ventile (6) und (3) 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 (4) an eine Zwischenabsaugung der Turbopumpe angeschlossen werden. Nun wird das Prüfgas von außen auf den Prüfling aufgebracht und es dringt zusammen mit der Umgebungsluft durch Lecks in den Prüfling ein. Das im Restgas vorhandene Prüfgas strömt über die Ventile (3) und (6) gegen die Pumprichtung durch die Turbopumpe zur Spektrometerzelle und wird dort nachgewiesen. Man nutzt hierbei die Eigenschaft der Turbopumpe aus, dass sie für Luft ein um mehrere Zehnerpotenzen größeres Kompressionsverhältnis hat als für das leichte Prüfgas Helium.

Während Luft durch das hohe Kompressionsverhältnis der Turbopumpe von der Spektrometerzelle ferngehalten wird, kommen dort leichte Prüfgase mit relativ hohem Partialdruck an. Die Turbopumpe wirkt so als selektiver Filter für Helium und Wasserstoff. Man kann deshalb schon bei Drücken  $< 10$  hPa (bei einigen Geräten auch höher) im Prüfling Helium und Wasserstoff mit der Spektrometerzelle nachweisen. Über verschiedene Zwischenabsaugungen an der Hochvakuum-pumpe (4) sowie über deren Betrieb mit verschiedenen Drehzahlen, die das Kompressionsverhältnis exponentiell beeinflussen, kann man einige Zehnerpotenzen des Heliumpartialdruckes und damit auch einen Leckratenbereich im Gegenstrom zwischen  $1$  und  $10^{-9}$  Pa  $m^3 s^{-1}$  abdecken. Für die höchste Empfindlichkeitsstufe des Lecksuchers (Einlass über Ventil (4)) muss ein Druck im Bereich von einigen  $10^{-2}$  hPa im Prüfling erreicht und der Lecksucher im Hauptstrom betrieben werden.

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

### 7.2.2 Aufbau eines Lecksuchers mit Quarzfensterdetektor

Während massenspektrometrische Detektoren die Trennung eines Gasgemischs durch Ionisation mit nachfolgender Separation in einem magnetischen oder elektrischen Feld durchführen, nutzen Quarzfensterdetektoren unterschiedliche Permeationseigenschaften von Gasen aus.

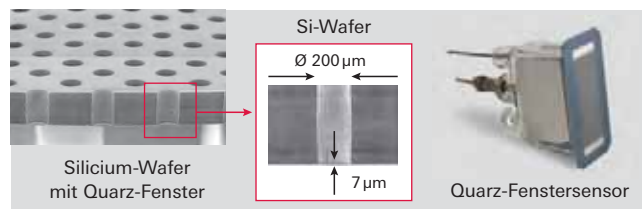


Abbildung 7.4: Funktionsprinzip Quarzfenstersensor

Das Prüfgasgemisch wird an die Quarzoberfläche einer beheizten Membran geführt. Die Trägerschicht für die Quarzmembran besteht aus einem Silicium-Wafer mit mehreren tausend Löchern, durch die sämtliche ankommenden Gasatome und -moleküle an die Quarzmembran gelangen können. Die eigentliche Trennung erfolgt an der Quarzmembran, die Durchlässigkeit für Helium zeigt, nicht aber für andere Gase. Die Dicke und Temperatur der Membran sind die Einflussgrößen für die Permeation des Prüfgases Helium. Nach Durchtritt der Gase durch die Membran wird das eingedrungene Prüfgas ionisiert und der gemessene Ionenstrom ist ein Maß für die Leckrate.

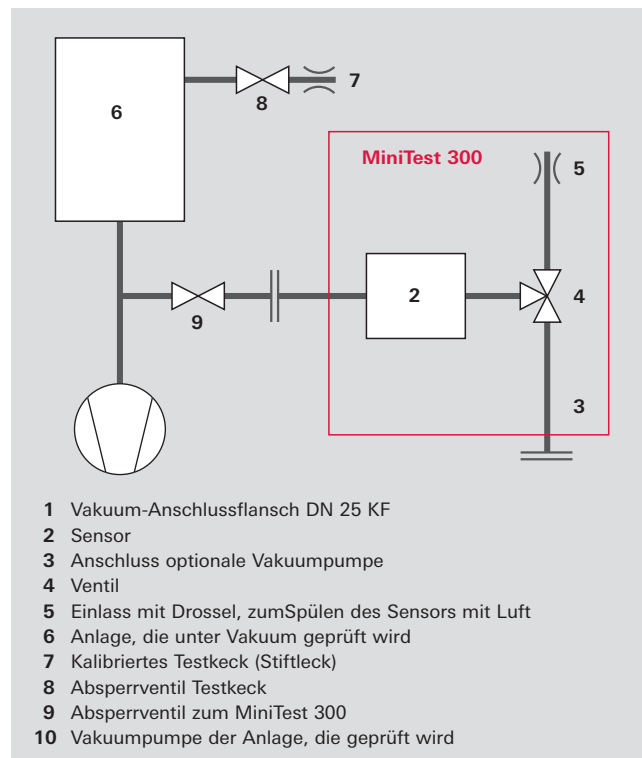


Abbildung 7.5: Vakuumschema des Quarzfenster-Lecksuchers MiniTest an einer Anlage

Das Gerät wird über den Vakuum-Anschlussflansch (1) mit der zu prüfenden Anlage (6) verbunden. Der Anschluss (3) kann optional mit einer zusätzlichen Vakuumpumpe verbunden werden. Zur Vorbereitung der Dichtheitsprüfung kann diese Pumpe das Vakuumsystem des Gerätes evakuieren, während das Absperrventil (9) noch geschlossen ist.

Für die Prüfung wird das Absperrventil (9) geöffnet. Die optionale Pumpe kann einen Gasstrom erzeugen, der bei höheren Anlagendrücken die Ansprechzeit des Sensors verringert.

Der Sensor (2) misst den Partialdruck von Helium im Vakuum. Mit einem Prüfling (7) an der Anlage wird die Ansprechzeit bestimmt und das Gerät kalibriert.

Zum Schutz des Sensors und zum Freispülen des Geräts nach einem intensiven Signal kann eine automatische Spülung durchgeführt werden. Das Ventil (4) öffnet den Einlass mit Drossel (5), und der Sensor wird kurzzeitig mit Außenluft gespült.

### 7.2.3 Prüfverfahren

Die Prüfverfahren bei der Lecksuche richten sich nach der Art des Prüflings und dem geforderten Prüfergebnis. In der DIN EN 1779 [34] sind die folgende Kriterien formuliert:

- Wird der Prüfling bei Überdruck oder bei Unterdruck geprüft?  
Dabei sollte man bei der Auswahl des Prüfverfahrens möglichst eine Methode wählen, die den Druckgradienten im tatsächlichen Einsatzfall des Prüflings berücksichtigt.
- Soll nur ein Teilbereich des Prüflings getestet werden oder soll der gesamte Prüfling getestet werden?
- Soll eine lokalisierende Lecksuche durchgeführt werden, die zur Auffindung von Lecks dient oder soll eine integrale Lecksuche zur quantitativen Bestimmung einer Leckrate im Rahmen einer Qualitätssicherung durchgeführt werden?

Lecksucher sind für zwei Betriebsmodi ausgerüstet:

- Die Vakuummethode, bei der der Prüfling evakuiert wird und von außen mit Prüfgas beaufschlagt wird
- Die Schnüffelmethode, bei der der Prüfling mit Prüfgasüberdruck  $\Delta p > 100 \text{ hPa}$  gefüllt und das austretende Prüfgas über eine Schnüffelsonde in den Lecksucher eingesaugt und nachgewiesen wird.

### 7.2.4 Kalibrierung des Lecksuchers

Zur quantitativen Bestimmung von Leckraten muss der Lecksucher kalibriert werden. Man benutzt dazu ein käufliches Prüfling, das unter definierten Bedingungen eine bekannte und wiederholbare Prüfgasrate erzeugt. Kommerzielle Bauformen sind als Permeationsleck oder als Kapillarleck mit oder ohne Prüfgasreservoir erhältlich. In einen Lecksucher sind meist Permeationslecks mit Heliumreservoir eingebaut. Für eine Kalibrierung ist in Lecksuchern oft ein entsprechendes Ablaufprogramm eingebaut, das die Kalibrierung automatisch vornimmt.

Für genaue Messungen sollte eine Kalibrierung direkt vor jedem Einsatz vorgenommen werden. Für den Test von großen Prüflingen bei denen zusätzliche Vakuumpumpen

im Einsatz sind, ist es sinnvoll, ein externes Prüfling zu verwenden. Das Prüfergebnis kann vom Anbringungsort des Testlecks abhängen. Deshalb sind die Strömungsverhältnisse innerhalb des Vakuumbereichs zu berücksichtigen. Auch zur Bestimmung einer maximalen Ansprechzeit ist der Einsatz von externen Prüflings sinnvoll.

### 7.2.5 Lokale Lecksuche

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

Bei der Vakuummethode schließt man den Prüfling (Behälter) an den Lecksucher an und sprüht für kurze Zeit Helium mit einer Dosiersprühpistole auf eine verdächtige Stelle. Ist der Druck im Prüfling im molekularen Strömungsbereich also  $< 10^{-3} \text{ hPa}$ , so ist die Prüfungsgeschwindigkeit vom Volumen des Prüflings und dem effektiven Saugvermögen des Prüfaufbaus für Helium abhängig. Je kleiner der Prüfling oder je größer das Saugvermögen des eingesetzten Lecksuchers oder einer Hilfspumpe, umso schneller erhält man das Ergebnis. Bei höheren Drücken, besonders im laminaren Strömungsbereich größer  $1 \text{ hPa}$  wird die Anzeigegeschwindigkeit durch das Saugvermögen der Vorpumpe des Lecksuchers bzw. einer Hilfspumpe bestimmt.

Bei der Schnüffelmethode nach Abbildung 6 füllt man den Prüfling (3) mit Prüfgasüberdruck. Eine Schnüffelsonde (2) ist mit dem Schnüffelanschluss des Lecksuchers verbunden. Das durch Lecks im Prüfling austretende Prüfgas kann durch Abschnüffeln mit der Sonde nachgewiesen werden.

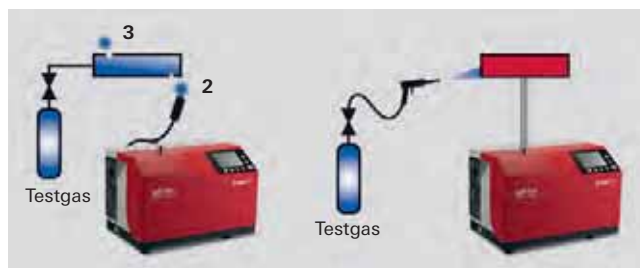


Abbildung 7.6: Lokale Lecksuche mit der Schnüffel- und Vakuummethode

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

	Schnüffellecksuche	Vakuumlecksuche
Methode	Abschnüffeln des mit Prüfgas gefüllten Testobjekts	Absprühen mit Helium
Mechanische Festigkeit	Gegen Überdruck	Gegen atmosphärischen Druck von außen gegen Vakuum (Druckdifferenz 1000 hPa)
Nachweisgrenze	$< 1 \cdot 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	$< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$

Tabelle 7.1: Lokale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuumverfahren

### 7.2.6 Integrale Lecksuche

Die integrale Lecksuche bestimmt die Gesamtleckrate, also die Summe der Leckraten aller Lecks eines Prüfobjekts. Auch hier kann man mit der Vakuummethode und der Schnüffelmethode arbeiten.

Beim integralen Vakuumverfahren (Methode A1 nach DIN EN 1779, Abbildung 7.7 rechts) evakuiert man den Prüfling (z. B. eine Vakuumanlage) und füllt den Umgebungsraum mit einer definierten Prüfgasmenge. Die Umhüllung kann dabei eine Plastikfolie oder ein fester Behälter sein. Wichtig ist die Beaufschlagung des Prüflings mit einer definierten Prüfgasmenge, um Aussagen über die Prüfgaskonzentration am Leck treffen zu können und damit eine belastbare quantitative Aussage zu treffen.

Bei der Prüfung umschlossener Prüfobjekte (Methode B6 nach DIN EN 1779, Abbildung 7.7 links) füllt man den Prüfling mit Helium und platziert ihn in einem umgebenden Vakuumbehälter. Das austretende Prüfgas wird quantitativ vom Lecksucher nachgewiesen.

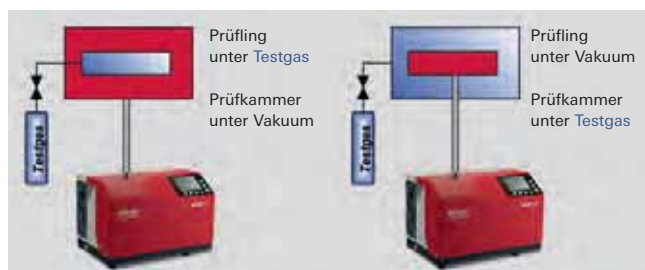


Abbildung 7.7: Integrale Lecksuche mit der Vakuummethode

Bei der integralen Schnüffelmethode füllt man den Prüfling mit Prüfgas (Methode B3 nach DIN EN 1779, Abbildung 7.8) und platziert ihn in einem umgebenden Behälter. Dieser Behälter muss im Gegensatz zum oben beschriebenen Verfahren nicht evakuiert werden und kann auf Atmosphärendruck verbleiben. Damit sind die Anforderungen an den Apparatebau geringer als beim oben beschriebenen Verfahren. Das austretende Prüfgas wird in der umgebenden Hülle gesammelt und muss während der Prüfung gut durchmischt werden (z. B. durch einen Ventilator), um im Analyserraum eine homogene Prüfgaskonzentration sicherzustellen. Über die Schnüffelsonde des Lecksuchgeräts wird der Konzentrationsanstieg des aus dem Prüfling ausgetretenen Prüfgases bestimmt, welches sich in der Hülle ansammelt. Die Nachweisgrenze der Methode ist durch die Prüfgaskonzentration im Totvolumen der Hülle und den zusätzlichen

Konzentrationsanstieg des Prüfgases bestimmt. Damit ist diese Methode deutlich langsamer als die integralen Verfahren unter Vakuum und ihr Einsatz beschränkt sich meist auf kleine Prüflinge mit eingeschränktem Teiledurchsatz.



Abbildung 7.8: Integrale Lecksuche mit der Schnüffelhüllenmethode

Eine noch umfassendere Darstellung der Methoden und Verfahren für eine Dichtheitsprüfung mit Prüfgasen ist in unserem Lecksuchkompendium zusammengefasst.

## 7.3 Anwendungshinweise

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

- Wie druckstabil ist der Prüfling?
- Gibt es eine Vorzugsrichtung für die Druckstabilität und kann der Druckgradient im tatsächlichen Einsatzfall des Prüflings simuliert werden?
- Soll nur der Ort der Undichtigkeit ermittelt oder soll diese quantifiziert werden?
- Soll die integrale Leckrate des Prüflings ermittelt werden? Wenn ja, wie groß darf diese maximal sein?
- Auf welche Fluidreferenz bezieht sich die angegebene Leckrate?
- Auf welche Prüfdrücke bezieht sich diese?
- Gibt es sicherheitstechnische Aspekte zu berücksichtigen?

Mit den Antworten auf diese Fragen kann aus den in den Kapiteln 7.2.4 und 7.2.5 angegebenen Methoden ein passendes Prüfverfahren ausgewählt werden.

### 7.3.1 Lecksuche mit Helium

Vor Beginn einer lokalisierenden Lecksuche oder integralen Dichtheitsprüfung wird der Lecksucher kalibriert. Dazu wird in den Pfeiffer Vacuum-Lecksuchern ein eingebautes Heliumprüfleck verwendet. Die Kalibrierroutine wird entweder beim Start des Lecksuchgeräts, durch Knopfdruck oder automatisch gestartet und läuft nach einem festgelegten Softwareprotokoll ab. Nach der Kalibrierung ist der Lecksucher bereit.

	Schnüffellecksuche	Vakuumlecksuche	
Methode	Akkumulationsprüfung, Sammeln des austretenden Prüfgases in einer umgebenden Hülle oder Kammer	Prüfling unter Überdruck, Messung des austretenden Prüfgases in einer Vakuumkammer	Prüfling unter Vakuum, Messung des aus einer umgebenden Hülle in den Prüfling eintretenden Prüfgases
Mechanische Festigkeit	Gegen Überdruck des Prüfgases	Gegen Überdruck des Prüfgases	Gegen atmosphärischen Druck von außen gegen Vakuum (Druckdifferenz 1000 hPa)
Geschwindigkeit	langsam	schnell	schnell
Nachweisgrenze	Einsatz meist $> 1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	$< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$	$< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$

Tabelle 7.2: Integrale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuumverfahren



Der Benutzer wird durch optische und akustische Anzeigen jederzeit über den Zustand des Geräts und die gemessene Leckrate informiert. Bei der akustischen Anzeige ändert sich die Frequenz des Signaltons mit der Leckrate. Das Einsetzen des akustischen Signals kann vom Bediener durch Programmierung eines Schwellenwerts bestimmt werden. Optische Signale können entweder am Bedienteil des jeweiligen Geräts oder an einer drahtgebundenen oder drahtlosen Fernbedienung abgelesen werden. Dies ermöglicht die Durchführung der Lecksuche durch eine einzelne Person.

Grundsätzlich ist bei der Verwendung von Helium als Prüfgas 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. Dies vermeidet ein Falschsignal durch aufsteigendes Helium an einer Leckstelle oberhalb der aktuellen Prüfung. Allerdings kann der Heliumfluss nach oben durch Luftströmungen gestört werden. In Reinräumen mit laminarer Gasströmung von der Decke zum Boden kehrt sich die Arbeitsrichtung um.
- Es sollten keine größeren Mengen des Prüfgases versprüht werden, da es sonst zu erhöhten Heliumgehalten in der Umgebungsluft kommen kann. Dies resultiert in einem erhöhten Untergrundsignal des Lecksuchers und wachsender Unempfindlichkeit bei der Prüfung.
- Ist die Vorpumpe des verwendeten Lecksuchers oder eine Hilfspumpe ölgeschmiert, so sammelt sich Helium im Auspuffraum der Vorpumpe und löst sich im Öl. Von dort kann das Helium wieder in den Hochvakuumbereich zurückdiffundieren. Nach der Detektion großer Leckraten kann der Einsatz von Gasballast an der Vorpumpe hilfreich sein, um angesammeltes Helium aus dem Pumpsystem auszutreiben und das angezeigte Untergrundsignal zu erniedrigen.

Bei der Vakuummethode ist es notwendig, einen ausreichend niedrigen Druck zu erzeugen, damit der Lecksucher mit der höchsten Empfindlichkeit betrieben werden kann. Ansonsten zeigt das Lecksuchgerät noch Resthelium aus der abgepumpten Umgebungsluft an.

Deshalb müssen bei großen Prüflingen oft zusätzliche Vakuumpumpen (Hilfspumpen) mit hohem Saugvermögen benutzt werden. Der Lecksucher soll in diesem Fall direkt am Pumpstutzen der großen Vakuumpumpe angeschlossen werden, also parallel zur Hilfspumpe betrieben werden.

Bei der Bestimmung der Leckrate ist bei laufender Hilfspumpe das sogenannte Teilstromverhältnis durch Messung mit einem Prüflack an der Anlage zu bestimmen. Nur eine Messung zeigt zuverlässig, welcher Anteil des austretenden Prüfgases über die Hilfspumpe abgepumpt wird und welcher Anteil im Lecksucher nachgewiesen werden kann.

Bei Arbeiten mit der Schnüffelsonde muss der Druck im Behälter mindestens 100 hPa höher liegen als der Umgebungsdruck. Durch den natürlichen Heliumgehalt der Luft ist die Empfindlichkeit der Schnüffelmethode geringer als die der Vakuummethode. Außerdem ist auf die verzögerte Reaktion des Lecksuchers auf das einströmende Helium zu achten. Das zeitliche Ansprechverhalten ist auch von der Länge der eingesetzten Schnüffelsonde anhängig.

Die Dichtheitsprüfung mit Helium oder einem anderen Prüfgas muss nicht zwingend bei den Parametern durchgeführt werden, die für die Spezifikation maßgebend sind. Umrechnungen sind möglich für z. B. verschiedene Gase, Gase und Flüssigkeiten, unterschiedliche Druckverhältnisse, Massenleckraten und Volumenleckraten, etc. Für eine Formelsammlung zur Dichtheitsprüfung verweisen wir auf unser Lecksuchkompendium.

### 7.3.2 Vergleich der Prüfergebnisse mit Lecksuchgerät und Quadrupol-Massenspektrometer

Quadrupolmassenspektrometer dienen in erster Linie zur Analyse der Zusammensetzung von Gasgemischen. Dazu benötigen sie Prüfdrücke im Hochvakuumbereich. Massenspektrometer können mit fast beliebigen Prüfgasen eingesetzt werden, ihre Anwendung ist nicht unbedingt auf das klassische Prüfgas Helium beschränkt. Restgasanalysatoren können Lecks in einer Vakuumanlage auch ohne spezielles Prüfgas erkennen. Dazu wird eine Analyse der Massen der Luftgase vorgenommen.

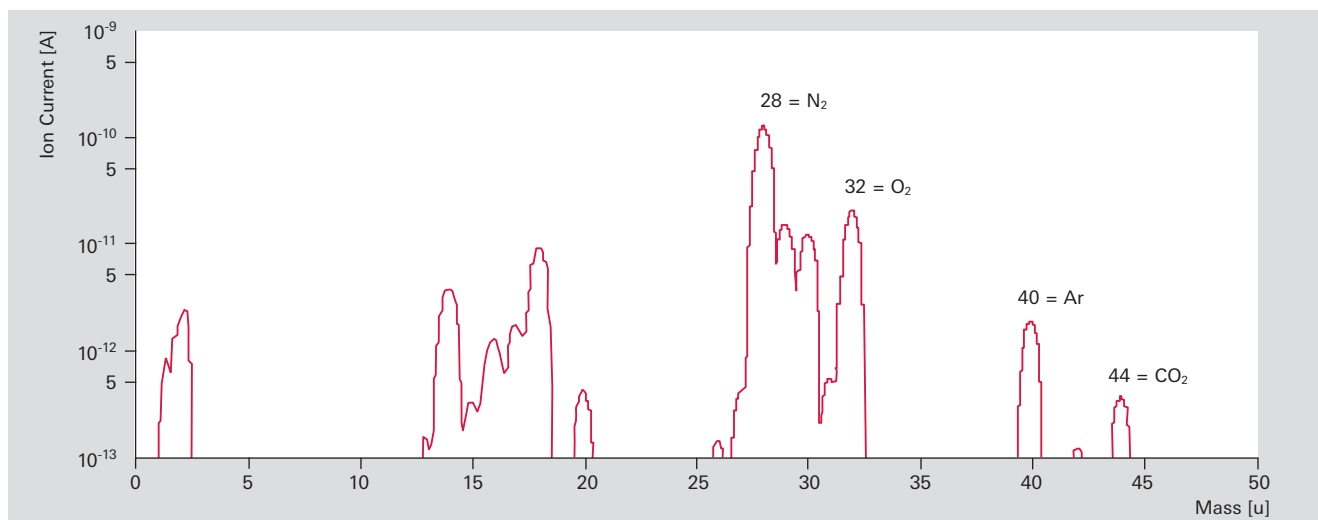


Abbildung 7.9: Massenspektrum eines Rezipienten mit Luftleck



Lecksuchgeräte für das Prüfgas Helium werden derzeit nicht auf der Basis von Quadrupolmassenspektrometern aufgebaut. Die größere Robustheit und Langzeitstabilität sowie die einfachere Quantifizierung der Ergebnisse und Dateninterpretation hat dazu geführt, dass hier in erster Linie massenspektrometrische Detektoren auf der Basis magnetischer Sektorfeld-Massenspektrometer dominieren.

Geräte mit Detektoren auf der Basis eines Quarzfenstersensors besetzen Anwendungen mit, in denen die überlegene Empfindlichkeit massenspektrometrischer Detektoren nicht erforderlich ist. Dafür erlaubt ein Gerät mit Quarzfenstersensor die Arbeit bei sehr hohen Prüfdrücken und mit hoher Wasserdampfbelastung.

	Lecksucher	RGA / QMS
Leck, Ortung	ja	ja
Leck, quantitativ	ja	nein
Leck, virtuell	nein	ja
Permeation	Grobe Angabe möglich, keine Unterscheidung zwischen Permeation und Desorption	ja, Dateninterpretation möglich
Desorption		ja, Aussage über desorbierende Gase
Prüfdruck	hoch	niedrig
Nachweisgrenze	5 · 10 <sup>-13</sup> Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (Sektorfeld-MS) 5 · 10 <sup>-9</sup> Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (Quarzfenster-Detektor)	Ionenstrom von Stabsystem und Detektor abhängig
Allgemeines	Quantitative Leckageratenmessung möglich	Qualitatives Instrument, Quantifizierung aufwändig, erfordert mehr Know-how, liefert mehr Informationen

**Tabelle 7.3:** Vergleich von Lecksuchgerät und Quadrupol-Massenspektrometer

## 7.4 Portfolio

Das Portfolio der Massenspektrometer und Gasanalyse-systeme ist in Kapitel 6 dargestellt.

Pfeiffer Vacuum bietet die breiteste Palette an Helium-Lecksuchgeräten. Einen Überblick gibt Tabelle 7.3.

Die Breite des Portfolios erlaubt die Auswahl von Geräten, die speziell auf den Anwendungsfall zugeschnitten sind. Die wichtigsten Charakteristika sind:

- **MiniTest:** Lokalisierende Lecksuche an Vakuumsystemen, auch bei Absolutdrücken bis zu 200 mbar und hoher Wasserdampfbelastung. Durch Gewicht von nur 5kg und drahtlose Fernbedienung mit hoher Reichweite die optimale Lösung für die Leckortung an großen Vakuumsystemen mit nur einem Bediener.
- **ASM 310:** Der kleinste und leichteste Lecksucher für Vakuum- und Schnüffelttest mit vollwertigem integrierten Pumpsystem. Durch Massenspektrometer-Detektor hervorragende Nachweisempfindlichkeit.
- **ASM 340:** Der jüngste Lecksucher von Pfeiffer Vacuum, der die Erfahrung aller Produktionswerke in sich vereint. Leistungsstarkes Pumpsystem und Abwärtskompatibilität zu dem Lecksuchern der ASM- und HLT-Serie machen ihn zum universellsten Lecksucher.
- **ASM 182-Serie:** Ausgestattet mit leistungsstarkem Pumpsystem sind dies die Geräte der Wahl für die empfindliche quantitative Lecksuche im industriellen Umfeld oder bei Vakuumanlagen mit großen Volumina.
- **ASM 380:** Entwickelt für die Bedürfnisse der Halbleiterindustrie und für Beschichtungsanlagen. Die schmale Bauform erlaubt den einfachen Transport des Geräts auch in den engen Gängen zwischen Produktionsanlagen. Das hohe Helium-Saugvermögen sorgt für konkurrenzlos hohe Empfindlichkeit auch beim Einsatz mit Hilfspumpen und die öl- und partikelfreie Vorpumpe erlaubt den Einsatz im Reinraum.
- **ASM 192-Serie:** Die Konsolengeräte für den stationären Betrieb sind optimal geeignet für die empfindliche Lecksuche an großen Volumina.

	Portabel		Universell	Hochleistung			Arbeitsstation	Modular	Schnüffler
	MiniTest	ASM 310	ASM 340	ASM 182T ASM 182 TD+	ASM 380	ASM 192T ASM 192TD+	ASM 1002	ASI 30	ASM 102S
Quarzfenstersensor	■								
Sektorfeld-MS		■	■	■	■	■	■	■	■
Vakuummethoden	■	■	■	■	■	■	■	■	
Schnüffelmethode		■	■	■	■	■	■	■	■
Prüfleck integriert		■	■	■	■	■	■	■	

**Tabelle 7.3:** Pfeiffer Vacuum Lecksuchgeräte

- **ASM 1002:** Die Arbeitsstation für die Prüfung sowohl offener Gehäuse als auch gekapselter Bauteile. Der ASM 1002 ist perfekt geeignet für die Prüfung kleiner, hermetisch geschlossener Komponenten. Die Benutzerführung ist besonders einfach gehalten und erlaubt die optische Signalerkennung nach dem Ampelprinzip.
- **ASI 30:** Der modulare Lecksucher für die Integration in Lecksuchanlagen. Durch vielfältige Schnittstellen ist die Ansteuerung mit einer Vielzahl von Signalen ebenso möglich wie der Ersatz bestehender Lecksuchmodule aller Hersteller.
- **ASM 102S:** Reiner Schüffellecksucher im portablen 19"-Gehäuse. Der ASM 102S ist konzipiert für die mobile Schnüffellecksuche z. B. in Luft- und Raumfahrt oder im Rohrleitungsbau.

## 7.5 Industrielle Dichtheitsprüfung

Die Pfeiffer Vacuum Systemgruppe baut kundenspezifische Lecksuchanlagen für die verschiedensten Anwendungen in Automobilindustrie, Energiewirtschaft, Verpackungsindustrie, Kälte-/Klimatechnik und einer Reihe weiterer Anwendungen. Die Anlagen können entweder in eine Fertigungslinie integriert oder als einzelne Prüfstation ausgeführt werden. Hoher Durchsatz bei minimalem Prüfgasverbrauch kann ebenso realisiert werden wie flexible Anlagen für die Vorausentwicklung und Serienvorbereitung.

Unserer Verpflichtung zum ressourcenschonenden Einsatz kommen wir mit dem Bau kundenspezifischer Rückgewinnungsanlagen für Prüfgase nach.



Abbildung 7.10: Dichtheitsprüfanlage für Kältemittelschläuche



Abbildung 7.11: Helium-Rückgewinnungsanlage



## 8.2 Kontamination

Staub ist der natürliche Feind bei der Herstellung integrierter Schaltkreise der Mikroelektronik. Im Laufe der Entwicklung integrierter Schaltkreise wurden effiziente Methoden entwickelt, um Staub aus Produktionsumgebungen zu entfernen. Ein Staubteilchen einer Größe, die vergleichbar ist mit den Elementen der Schaltkreisstruktur (kritische Abmessung, CD) oder größer, kann problematisch sein, wenn es ungewollt in die Schaltung aufgenommen wird. Eine Struktur von 22 nm Silicium enthält nur 41 Si-Atome. Bei diesen Größenverhältnissen stellen nicht nur Partikel, sondern auch die Kontamination durch Moleküle eine zunehmende Herausforderung dar. Diese Kontamination ist bekannt als AMC (Airborne Molecular Contamination). Der Wechsel von offenen Kassetten zu geschlossenen Transportboxen (FOUPs) reduzierte die Partikelkontamination erheblich, verstärkte gleichzeitig jedoch den Einfluss der AMC.

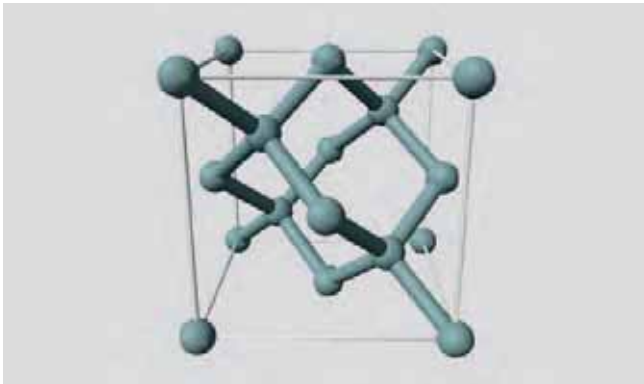


Abbildung 8.3: Diamantähnliche Kristallstruktur von Silicium

Moleküle auf der Waferoberfläche, die aus der Umgebungsluft stammen und von den umgebenden Oberflächen oder einem vorhergehenden Prozessschritt freigesetzt wurden, können mit atmosphärischen Gasen reagieren und winzige Ansammlungen an Reaktionsnebenprodukten bilden, die sich bei der Wartezeit der Wafer auf den nächsten Prozessschritt in der Regel vergrößern.

Der Kern der molekularen Kontamination rührt von den vielen bei der Halbleiterherstellung verwendeten Substanzen her. Die ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) hat eine Liste von AMCs erstellt, die Waferdefekte verursachen können [36]. Diese Liste beinhaltet anorganische und organische Säuren, Basen, Schwefelverbindungen und flüchtige organische Verbindungen. Weitere Informationen siehe Abbildung 8.4.

Für molekulare Verunreinigungen (AMC) gibt es in der Atmosphäre innerhalb der FOUPs zwei Quellen. Hauptquelle sind die Wafer, die im FOUP nach jedem Prozessschritt aufbewahrt werden. Nebenprodukte aus dem letzten Prozess werden von der jeweiligen Oberfläche freigesetzt und vom Polymermaterial des FOUP absorbiert oder auf anderen Waferoberflächen reabsorbiert. Die zweite Quelle ist das Ausgasen der FOUPs selbst – entweder aus dem Polymer oder den vorher absorbierten Nebenprodukten von anderen Wafern und/oder anderen Prozessen. Da die Polymere eine hohe Gasaufnahme-fähigkeit haben, „merkt“ sich der FOUP, welche Wafer er transportiert hat. Verglichen mit diesen AMC-Quellen ist der Beitrag der gut kontrollierten Reinraumluft zu vernachlässigen.

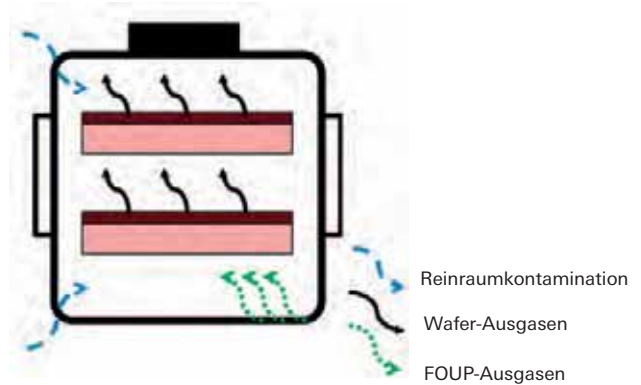
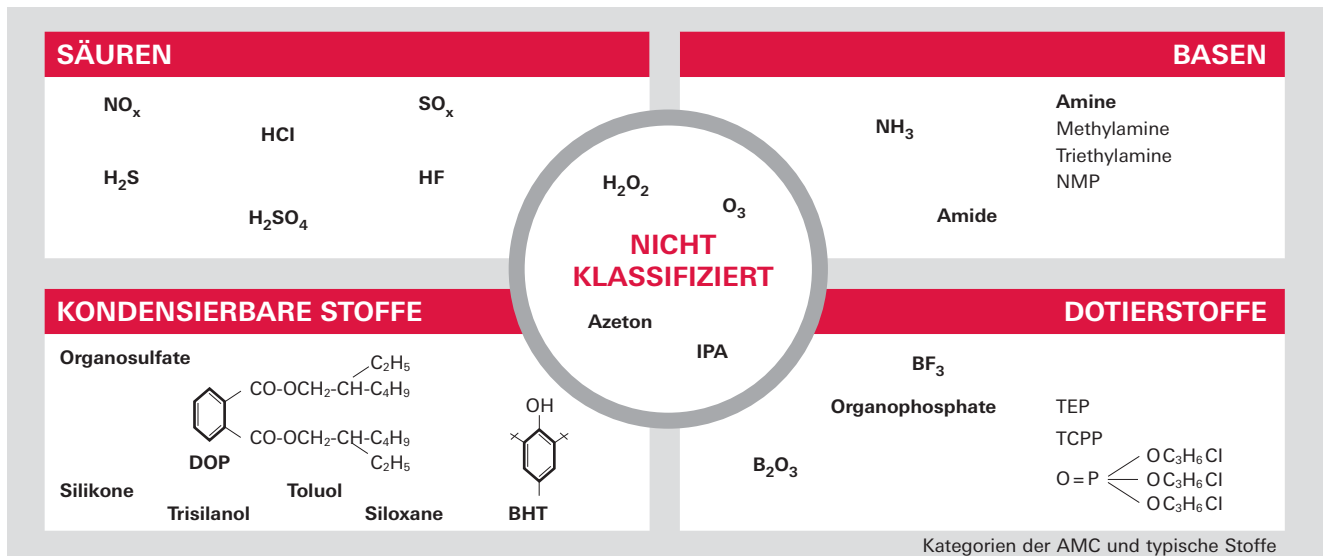


Abbildung 8.5: AMC-Quellen in FOUPs



Kategorien der AMC und typische Stoffe

Abbildung 8.4: Klassifizierung der Airborne Molecular Contamination AMC

### 8.3 Das Wesen luftgetragener molekularer Verunreinigungen (AMC)

Bei Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur trifft ein Strom zufälliger Gasmoleküle und -atome in der Größenordnung  $10^2$  [37] pro Sekunde und Quadratzentimeter auf eine feste Oberfläche, die etwa  $10^{15}$  Atome/cm<sup>2</sup> enthält. Das heißt, dass die Oberfläche innerhalb von Nanosekunden mit einigen Schichten an Gasmolekülen bedeckt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Molekül auf der Oberfläche haftet, hängt stark von der Beschaffenheit und Topografie dieser Oberfläche ab. Doch auch kleinere Spuren an Reaktionsprodukten im ppbv-Bereich (Volumenanteil pro Milliarde, d.h.  $10^{-9}$ ), die in einer Menge von  $10^{14}$  s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> auf die Oberfläche treffen, decken diese Oberfläche in wenigen Sekunden ab, wenn der Haftkoeffizient hoch ist.

Durch Luftströmung übertragene Moleküle können entweder polar oder nichtpolar sein. Bei den nichtpolaren Molekülen sind die elektrischen Ladungen symmetrisch verteilt, die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladung fallen zusammen. Beispiele sind Stickstoff N<sub>2</sub> oder das lineare CO<sub>2</sub>-Molekül. Diese Moleküle werden auf einer festen Oberfläche durch schwache Van-der-Waals-Kräfte angezogen, wobei die Bindungsenergien typischerweise zwischen der Wärmeenergie  $RT \approx 2,5$  kJ/mol und etwa  $20 \cdot RT$  liegen. In polaren Molekülen sind die elektrischen Ladungen asymmetrisch verteilt, was zu einem permanenten bipolaren Moment führt. Beispiele für polare Moleküle sind Wasser H<sub>2</sub>O und anorganische Säuren, die bei Ätzverfahren in der Halbleiterfertigung verwendet werden, z.B. HF und HCl. Die Bindungsenergien polarer Moleküle sind höher, z. B. bei H<sub>2</sub>O auf einer Si-(100)-Oberfläche etwa 138 kJ/mol. Bei diesen Molekülen ist es wahrscheinlich, dass sie chemisch mit der Oberfläche interagieren und Kristallisationskeime für weitere Reaktionen bilden.

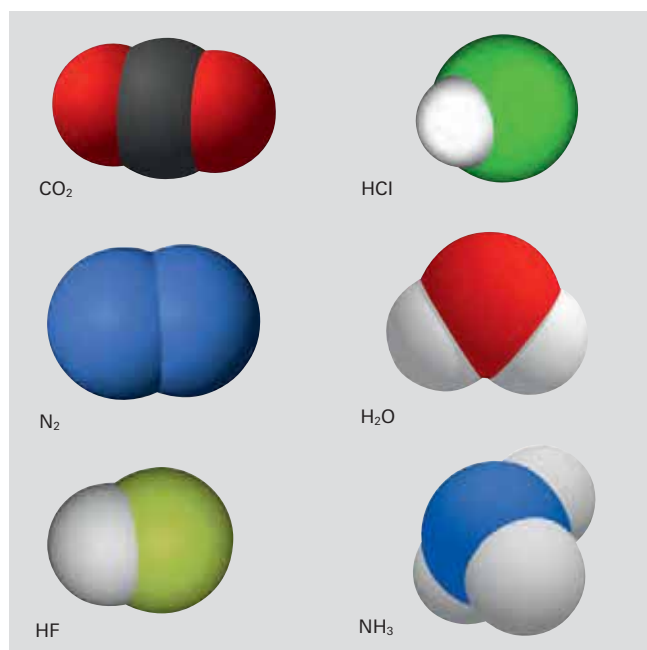


Abbildung 8.6: Durch Luftströmungen übertragene polare (b) und nichtpolare (a) Moleküle

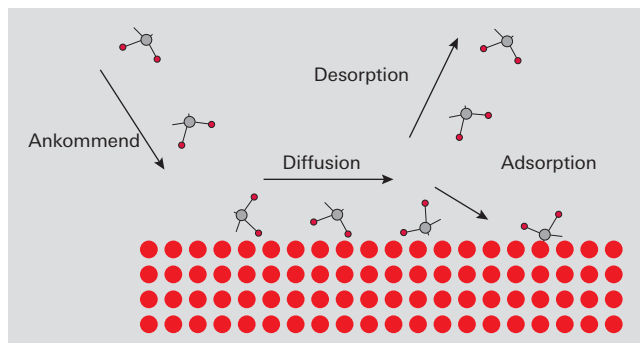


Abbildung 8.7: Gas-Festkörper-Interaktion auf einer Oberfläche

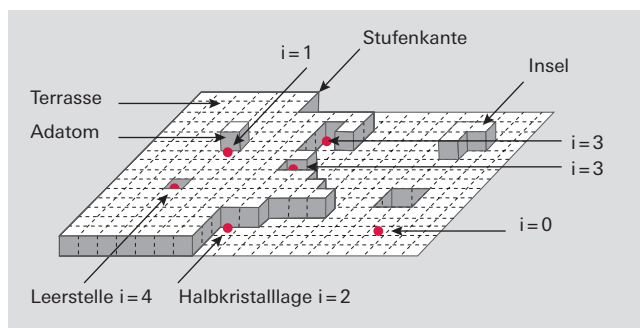


Abbildung 8.8: Oberflächenlagen

### 8.4 Von der molekularen Oberflächenverunreinigung SMC (Surface Molecular Contamination) zu Defekten

Die verschiedenen Phänomene bei der Interaktion zwischen einer festen Oberfläche und einem Gas werden in Abbildung 8.7 gezeigt. Gasmoleküle treffen auf den Festkörper, diffundieren entlang der Oberfläche und desorbieren oder werden adsorbiert. Eine feste Oberfläche ist die Grenze zwischen dem Grundmaterial und der Außenwelt. Diese Oberfläche hat aufgrund der freien Bindungen in der letzten Schicht der Atome oder Moleküle eine höhere Energie als das Grundmaterial. Jede freie Bindung ist eine potenzielle Adsorptionsstelle. Die freie Energie der Oberfläche hängt von der Beschaffenheit der Bindungen ab, d. h., ob sie metallisch, ionisch oder kovalent sind. Die Anzahl der Adsorptionsstellen steigt von geordneten Kristalloberflächen zu polykristallinen und amorphen Polymermaterialien. Jede Unregelmäßigkeit erhöht die Anzahl an Adsorptionsstellen.

Wasserdampf spielt eine wichtige Rolle bei Oberflächenprozessen. Bei 25°C und einer relativen Feuchtigkeit von 50% enthält die Luft 16 hPa (1,58 %) Wasserdampf. Jede Oberfläche empfängt einen Strom an Wassermolekülen von etwa  $5 \cdot 10^{21}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. In etwa 200 ns kann eine Monoschicht aus Wasser eine Si-(100)-Oberfläche bedecken. Aufgrund der polaren Eigenschaft des Wassermoleküls geht die erste Schicht eine enge Bindung mit der Oberfläche ein und eine weitere Schicht aus Wasser-Wasser-Bindungen entsteht, sodass sich eine Doppelschicht bildet. Ein Säuremolekül, das auf eine Oberfläche trifft, die atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt ist, kommt mit Wassermolekülen zusammen, die weitere Reaktionen begünstigen.



Jedes Material, das Wasser absorbieren kann, wie Kunststoff oder Elastomere, wird gesättigt, wenn die Einwirkung lange genug dauert.

FOUPs bestehen aus Polymerstoffen wie Polycarbonat (PC), Polyetheretherketon (PEEK) oder Acrylonitrilbutadienstyrol (ABS). Diese Stoffe können zu einem Anteil von 0,12%, 0,5% und 0,7% Wasser absorbieren, was zu einer Wasserdampfmenge von jeweils 6 l, 25 l und 35 l bei Umgebungsbedingungen führt. Fotolackmasken bestehen ebenfalls aus Polymerstoffen und absorbieren Wasser.

Unter Plasmabedingungen trifft ein Strom an Gasmolekülen, energiereichen Ionen und reaktiven Stoffen auf Oberflächen. Ionen helfen, Ätznutzenprodukte zu desorbieren, und erhöhen die Ätzgeschwindigkeit durch die Erzeugung von Defekten auf der Oberfläche. Nach dem Ätzen ist die Oberfläche mit reaktiven Stoffen vollständig gesättigt. Eine Halogenierungsschicht von 1,5 bis 2,5 nm wurde beim Poly-Ätzen mit  $\text{Cl}_2 + \text{HBr}$ -Chemie beobachtet [38]. Nach dem Ätzen setzt die Waferoberfläche Nebenprodukte und reaktive Moleküle in der geschlossenen Atmosphäre des FOUP frei, die darüber hinaus Wasserdampf enthält und chemische Reaktionen begünstigt.

Basierend auf der Theorie von Adsorptions- und Desorptionsprozessen, kann die Menge des adsorbierten Gases  $\Theta$  mit folgender Formel angegeben werden:

$$\Theta = \frac{p \cdot C}{1 + p \cdot C}$$

Formel 8-1: Oberflächenabdeckung

Hierbei ist  $p$  der Druck und  $C = C(T)$  eine Funktion der Temperatur. Dies ist bekannt als die Langmuir-Adsorptionsisotherme/-isobare. Eine gleichmäßige Abdeckung  $\Theta_{eq}$  stellt sich bei gegebenen Druck- und Temperaturbedingungen ein. Die Abhängigkeit von  $\Theta$  von  $p$  und  $T$  ist in Abbildung 8.9 dargestellt. Sie zeigt, dass eine geringe Abdeckung einer festen Oberfläche mit Gas bei niedrigem Druck und hoher Temperatur erreicht werden kann.

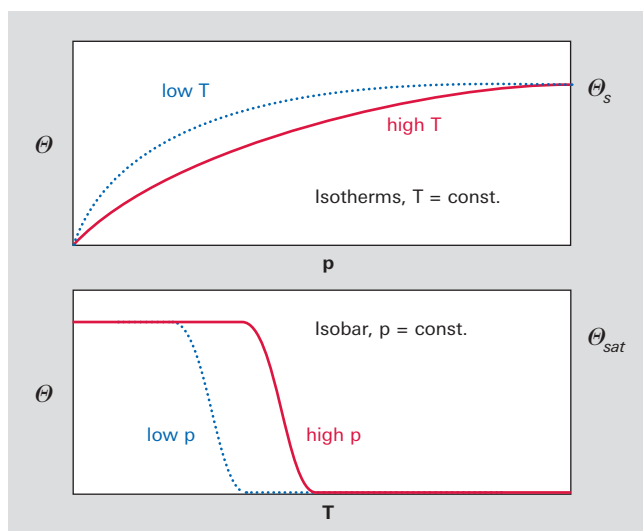


Abbildung 8.9: Oberfläche nach dem Ätzen

Adsorption und Desorption sind dynamische Prozesse. Unpolare Moleküle weisen aufgrund ihrer niedrigen Bindungsenergie eine schnellere Desorptionsgeschwindigkeit auf. Jedes unpolare Molekül, das die Oberfläche verlässt, bietet eine neue Adsorptionsstelle. Diese neue Stelle kann von einem polaren Molekül mit einer stärkeren Bindungsenergie und einer niedrigeren Desorptionsrate besetzt werden. Mit der Zeit steigt die Molekülkonzentration auf der Oberfläche und erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Defektbildung, die das Ergebnis der Dosis  $D$  einer AMC ist:

$$D = c_{AMC} \cdot \Delta t$$

Formel 8-2: Dosis der Kontamination

Dabei ist  $c_{AMC}$  die Konzentration der luftgetragenen molekularen Kontaminanten und  $\Delta t$  die Zeit, in der die Waferoberfläche der FOUP-Atmosphäre ausgesetzt ist.

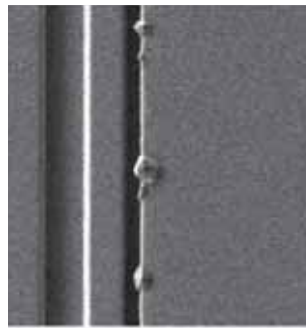


Abbildung 8.10: Kristallwachstum an der Kante einer Struktur

Die molekulare Oberflächenverunreinigung SMC ist der Auslöser des Kristallwachstums in der Wartezeit. Wenn die Wafer länger auf den nächsten Prozessschritt warten, erhalten sie eine höhere Dosis an reaktiven polaren Molekülen. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Kristalle auf eine Größe anwachsen, die danach zu Defekten und Ertragsausfall führt (Abbildung 8.10).

## 8.5 Portfolioüberblick

Das Dosiskonzept führt zu Maßnahmen, mit denen die Erzeugung von Defekten durch AMC vermieden werden kann:

- Druck verringern
- Temperatur erhöhen
- Einwirkzeit reduzieren

Da die Wartezeit bei der Produktion erforderlich ist, um die Flexibilität bei der Waferbearbeitung zu gewährleisten, ist ein Ausgasen der FOUPs und Wafer in einem Vakuum bei hohen Temperaturen die richtige Maßnahme, um Verunreinigungen zu reduzieren und die Ausbeute zu erhöhen. Zur Kontrolle der AMC, ist es wichtig, sie in den FOUPs zu überwachen, und da sie von dynamischen Prozessen bestimmt wird, muss die Überwachung in der Produktionsumgebung erfolgen. Pfeiffer Vacuum bietet den **APA 302 Pod Analyser** als geeignetes Tool zur Analyse der AMC. Der APA 302 liefert innerhalb von zwei Minuten Informationen über den Gesamtgehalt an Säuren, Aminen, flüchtigen organischen Verbindungen und Wasserdampf im ppbv-Nachweisbereich. Die Messungen können im leeren oder mit Wafern bestückten FOUP erfolgen.

Nach der AMC-Analyse und der Bestimmung der Auswirkung auf die Ausbeute sind die entsprechenden Maßnahmen zu ergreifen, um die Situation zu verbessern. Zu diesem Zweck bietet Pfeiffer Vacuum den **APR 4300 Pod Regenerator** als effizientes System zur Dekontaminierung von bis zu vier FOUPs in einem einzigen Durchgang. Dieses patentierte Gerät basiert auf den Erkenntnissen der physikalischen und chemischen Gas-Oberflächen-Interaktion, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Das Regeneriergerät kommt nach einem Vakuumprozess zum Einsatz, wie in Abbildung 8.11 gezeigt. Nach einem ersten Vakuumkonditionier-

schritt von etwa fünf Minuten ist der Arbeitsdruck erreicht. Der nachfolgende Spülvorgang desorbiert die AMC, die sich auf den Oberflächen aufgebaut haben, und im letzten Schritt wird der FOUP auf Atmosphärendruck gebracht.

Der APR 4300 Pod Regenerator hat sich als effizientes System mit Erhöhungen der Ausbeute bis zu 7% bewährt. Die Halbleiterproduktion steht vor neuen Herausforderungen und das Maß der luftgetragenen molekularen Verunreinigungen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Deshalb müssen Alternativen zum Transport unter Atmosphärendruck zwischen den kritischen Produktionsstufen entwickelt werden. Vakuumtechniken werden bei zukünftigen Lösungen sicher eine größere Rolle spielen.

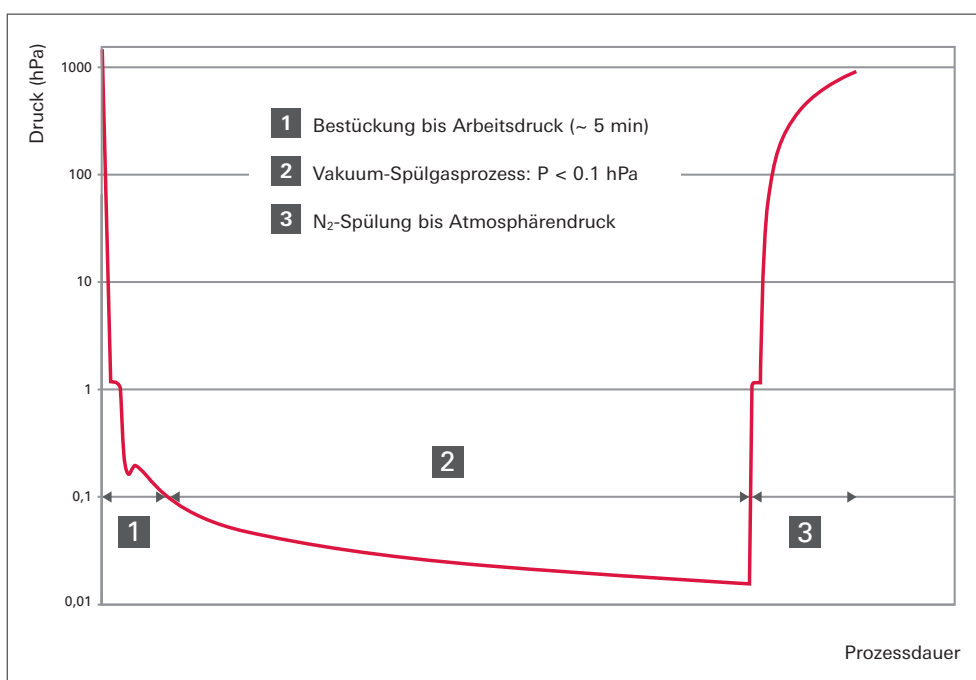


Abbildung 8.11 Prozesszyklus Pod Regenerator





## Abbildungsverzeichnis

### 1 Einführung in die Vakuumtechnik

<b>Abbildung 1.1:</b>	Vakuum im Überblick . . . . .	8
<b>Abbildung 1.2:</b>	Definition des Totaldrucks . . . . .	9
<b>Abbildung 1.3:</b>	Definition des Partialdrucks . . . . .	10
<b>Abbildung 1.4:</b>	Mittlere freie Weglänge zwischen zwei Stößen . . . . .	12
<b>Abbildung 1.5:</b>	Teilchenzahldichte (rot, rechte y-Achse) und mittlere freie Weglänge (blau, linke y-Achse) für Stickstoff bei einer Temperatur von 273,15 K . . . . .	13
<b>Abbildung 1.6:</b>	Profile der unterschiedlichen Strömungsarten . . . . .	14
<b>Abbildung 1.7:</b>	Strömungsbereiche im Vakuum in Abhängigkeit von $p \cdot d$ . . . . .	15
<b>Abbildung 1.8:</b>	Leitwert eines runden glatten Rohrs in Abhängigkeit vom mittleren Druck in der Rohrleitung . . . . .	16
<b>Abbildung 1.9:</b>	Dampfdruckkurven verschiedener Stoffe . . . . .	17
<b>Abbildung 1.10:</b>	Typisches Restgasspektrum einer Turbomolekularpumpe . . . . .	20

### 2 Auslegung

<b>Abbildung 2.1:</b>	Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen . . . . .	24
<b>Abbildung 2.2:</b>	Saugvermögenskurve eines Wälzkolbenpumpstands mit Hepta 100 und Okta 500 . . . . .	24
<b>Abbildung 2.3:</b>	Trocknungsanlage (schematisch) . . . . .	25
<b>Abbildung 2.4:</b>	Wälzkolbenpumpstand zur Dampfkondensation . . . . .	26
<b>Abbildung 2.5:</b>	Wälzkolbenpumpstand zur Dampfkondensation . . . . .	27
<b>Abbildung 2.6:</b>	Wälzkolbenpumpstand zur Trafotrocknung . . . . .	27
<b>Abbildung 2.7:</b>	Gasdurchsatz unterschiedlicher Turbopumpen bei hohen Prozessdrücken . . . . .	29
<b>Abbildung 2.8:</b>	Vakuumanlage mit Druck- und Durchsatzregelung . . . . .	30

### 3 Mechanische Komponenten im Vakuum

<b>Abbildung 3.1:</b>	Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls austenitischer Edelstähle . . . . .	34
<b>Abbildung 3.2:</b>	Temperaturabhängigkeit der 0,2 % Dehngrenze austenitischer Edelstähle . . . . .	34
<b>Abbildung 3.3:</b>	De Long-Diagramm . . . . .	35
<b>Abbildung 3.4:</b>	Schliffbild einer Laser-Schweißnaht . . . . .	39
<b>Abbildung 3.5:</b>	Schliffbild einer WIG Orbital-Schweißnaht . . . . .	39
<b>Abbildung 3.6:</b>	O-Ring Dichtungen in Rechtecknut, Trapeznut und in Ecklage . . . . .	41
<b>Abbildung 3.7:</b>	ISO-KF Verbindung mit Zentrierring und Spannring . . . . .	41
<b>Abbildung 3.8:</b>	ISO-KF Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrierring und Pratzen . . . . .	41
<b>Abbildung 3.9:</b>	ISO-K Verbindung mit Zentrierring und Klammerschrauben . . . . .	42
<b>Abbildung 3.10:</b>	ISO-K Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrierring und Pratzen . . . . .	42
<b>Abbildung 3.11:</b>	ISO-K Flansch montiert auf Grundplatte mit O-Ring Nut und Pratzen für Grundplatte mit Dichtnut . . . . .	42
<b>Abbildung 3.12:</b>	ISO-K Flansch montiert auf Grundplatte mit Zentrierring, Überwurfflansch und Schrauben . . . . .	42
<b>Abbildung 3.13:</b>	ISO-F Verbindung mit Zentrierring und Schrauben . . . . .	43
<b>Abbildung 3.14:</b>	ISO-K Flansch mit Überwurfflansch montiert an ISO-K Flansch mit Zentrierring und Schrauben . . . . .	43
<b>Abbildung 3.15:</b>	CF Verbindung mit Kupfer Flachdichtung und Schrauben . . . . .	43
<b>Abbildung 3.16:</b>	COF Verbindung mit Kupferdrahtdichtung und Schrauben . . . . .	44
<b>Abbildung 3.17:</b>	EUV-Quellenkammer mit Kühlprofilen und wassergekühlten Flanschen . . . . .	47
<b>Abbildung 3.18:</b>	Weltraumsimulationskammer mit Kissenkühlung . . . . .	47
<b>Abbildung 3.19:</b>	CF Schauglas mit Glas-Metall-Verschmelzung . . . . .	49
<b>Abbildung 3.20:</b>	Stromdurchführung mit keramisch isoliertem Drahtleiter aus Kupfer . . . . .	50

**Abbildung 3.21:** Balggedichtetes Eckventil ..... 51  
**Abbildung 3.22:** Inline-Ventil mit elektropneumatischer Betätigung ..... 51  
**Abbildung 3.23:** UHV Zugschieberventil ..... 52  
**Abbildung 3.24:** UHV Ganzmetall-Gasdosierventil ..... 52  
**Abbildung 3.25:** Balggedichtete UHV-Drehdurchführung (Katzenschwanzprinzip) ..... 53  
**Abbildung 3.26:** Magnetisch gekoppelte UHV Drehdurchführung ..... 54  
**Abbildung 3.27:** Elastomergedichtete Drehdurchführung ..... 54  
**Abbildung 3.28:** Z-Achsen Präzisionsmanipulator ..... 55  
**Abbildung 3.29:** XY-Achsen Präzisionsmanipulator ..... 56

**4 Vakuumherzeugung**

**Abbildung 4.1:** Übersicht Vakuumpumpen ..... 58  
**Abbildung 4.2:** Funktionsprinzip der Drehschieberpumpe ..... 60  
**Abbildung 4.3:** Pfeiffer Vacuum Drehschieberpumpen ..... 62  
**Abbildung 4.4:** Zubehör für Drehschieberpumpen ..... 67  
**Abbildung 4.5:** Funktionsprinzip einer Membranvakuumpumpe ..... 68  
**Abbildung 4.6:** Funktionsprinzip der Schraubpumpe ..... 69  
**Abbildung 4.7:** Rotoren der HeptaDry ..... 69  
**Abbildung 4.8:** HeptaDry mit Anschlüssen und Zubehör ..... 70  
**Abbildung 4.9:** Funktionsprinzip der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe, luftgekühlt ..... 71  
**Abbildung 4.10:** Kondensation von Ammoniumhexafluorsilicat (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> in einer zu kalt gefahrenen Roots Pumpe ..... 74  
**Abbildung 4.11:** Funktionsprinzip der mehrstufigen Wälzkolbenpumpe, Prozesspumpe ..... 74  
**Abbildung 4.12:** ACP 120 ..... 75  
**Abbildung 4.13:** A 100 L Rückseite mit Anschlüssen ..... 76  
**Abbildung 4.14:** A 203 H Querschnitt ..... 76  
**Abbildung 4.15:** A 1503 H Prozesspumpstand ..... 77  
**Abbildung 4.16:** Funktionsprinzip einer Wälzkolbenpumpe ..... 78  
**Abbildung 4.17:** Funktionsprinzip der gasgekühlten Wälzkolbenvakuumpumpe ..... 79  
**Abbildung 4.18:** Leerlaufkompressionsverhältnis für Luft von Wälzkolbenpumpen ..... 79  
**Abbildung 4.19:** Saugvermögen von Pumpständen mit Okta 2000 und verschiedenen Vorpumpen ..... 80  
**Abbildung 4.20:** Funktionsprinzip der Seitenkanalvakuumpumpe ..... 83  
**Abbildung 4.21:** Freiheitsgrade einer Turborotors ..... 84  
**Abbildung 4.22:** Funktionsprinzip der Turbomolekularpumpe ..... 84  
**Abbildung 4.23:** Spezifisches Saugvermögen von Turbopumpen ..... 85  
**Abbildung 4.24:** Saugvermögen als Funktion der relativen Molekülmasse ..... 85  
**Abbildung 4.25:** Saugvermögen als Funktion des Ansaugdruckes ..... 85  
**Abbildung 4.26:** Funktionsprinzip der Holweckstufe ..... 86  
**Abbildung 4.27:** Kompressionsverhältnisse von reinen Turbo- und Turbodragpumpen ..... 86  
**Abbildung 4.28:** Typisches UHV-Restgasspektrum (Turbopumpe) ..... 87  
**Abbildung 4.29:** Standard-Turbopumpen HiPace ..... 89  
**Abbildung 4.30:** Magnetgelagerte Turbopumpen ATH M ..... 90  
**Abbildung 4.31:** Zubehör für Turbopumpen am Beispiel der HiPace 300 ..... 91

**5 Vakuummessgeräte**

**Abbildung 5.1:** Aufbau eines Membranvakuummeters ..... 92  
**Abbildung 5.2:** Aufbau eines kapazitiven Membranvakuummeters ..... 93  
**Abbildung 5.3:** Funktionsweise des Pirani-Vakuummeters ..... 93  
**Abbildung 5.4:** Kennlinien des Pirani-Vakuummeters ..... 94  
**Abbildung 5.5:** Aufbau eines invertierenden Magnetrons ..... 94  
**Abbildung 5.6:** Funktionsweise des invertierenden Magnetrons ..... 94  
**Abbildung 5.7:** Aufbau einer Bayard-Alpert Messröhre ..... 95  
**Abbildung 5.8:** Druckmessbereiche und Messprinzipien ..... 96  
**Abbildung 5.9:** Anwendungskonzepte DigiLine ..... 98  
**Abbildung 5.10:** Anwendungskonzepte ActiveLine ..... 99  
**Abbildung 5.11:** Steuergerät TPG 300 für ModulLine Sensoren ..... 100



**6 Massenspektrometer und Restgasanalyse**

**Abbildung 6.1:** Total- und Partialdruckmessung . . . . . 102  
**Abbildung 6.2:** Komponenten eines Massenspektrometers. . . . . 102  
**Abbildung 6.3:** Funktion des 180° Sektorfeld-Massenspektrometers . . . . . 103  
**Abbildung 6.4:** Sektorfeldmassenspektrometer: (a) Ionenquelle, (b) Detektor . . . . . 104  
**Abbildung 6.5:** Prinzip des Quadrupol-Massenspektrometers . . . . . 104  
**Abbildung 6.6:** Stabilitätsdiagramm eines Quadrupolfilters. . . . . 105  
**Abbildung 6.6:** Schnitt durch eine Axialionenquelle . . . . . 107  
**Abbildung 6.7:** Ionisierung als Funktion der Elektronenenergie . . . . . 107  
**Abbildung 6.8:** Bruchstückionenverteilung von CO<sub>2</sub> . . . . . 107  
**Abbildung 6.9:** Gitterionenquelle . . . . . 108  
**Abbildung 6.10:** Diskriminierung von EID-Ionen . . . . . 109  
**Abbildung 6.11:** Cross-Beam-Ionenquelle . . . . . 109  
**Abbildung 6.12:** Gasdichte Axialionenquelle . . . . . 109  
**Abbildung 6.13:** SPM- Ionenquelle. . . . . 110  
**Abbildung 6.14:** PrismaPlus-Ionenquellen . . . . . 110  
**Abbildung 6.15:** Funktionsweise des Faraday-Cup . . . . . 110  
**Abbildung 6.16:** Sekundärelektronenervielfacher SEV . . . . . 111  
**Abbildung 6.17:** Funktionsweise des kontinuierlichen C-SEM. . . . . 112  
**Abbildung 6.18:** QMS mit Gaseinlasssystem und Cross-Beam-Ionenquelle . . . . . 113  
**Abbildung 6.19:** Differentiell gepumptes QMS mit verschiedenen Gaseinlässen . . . . . 114  
**Abbildung 6.20:** Potentialverlauf in einer elektrisch hochgelegten Ionenquelle . . . . . 115  
**Abbildung 6.21:** 90° off axis SEM . . . . . 116

**7 Lecksuche**

**Abbildung 7.1:** Blasenlecktest bei einem Fahrradschlauch . . . . . 118  
**Abbildung 7.2:** Funktion eines Sektorfeld-Massenspektrometers . . . . . 119  
**Abbildung 7.3:** Generelles Fließschema eines Lecksuchgeräts . . . . . 120  
**Abbildung 7.4:** Funktionsprinzip Quarzfenstersensor. . . . . 120  
**Abbildung 7.5:** Vakuumschema des Quarzfenster-Lecksuchers MiniTest an einer Anlage . . . . . 120  
**Abbildung 7.6:** Lokale Lecksuche mit der Schnüffel- und Vakuummethode. . . . . 121  
**Abbildung 7.7:** Integrale Lecksuche mit der Vakuummethode . . . . . 122  
**Abbildung 7.8:** Integrale Lecksuche mit der Schnüffelhüllenmethode . . . . . 122  
**Abbildung 7.9:** Massenspektrum eines Rezipienten mit Luftleck . . . . . 123  
**Abbildung 7.10:** Dichtheitsprüfanlage für Kältemittelschläuche . . . . . 125  
**Abbildung 7.11:** Helium-Rückgewinnungsanlage. . . . . 125

**8 Lösungen zum Kontaminationsmanagement**

**Abbildung 8.1:** Mooresches Gesetz (dokumentiert durch die Anzahl an Transistoren in Intel-Mikroprozessoren) . . . . . 126  
**Abbildung 8.2:** Wafer-Handling mittels Kassette (a) und FOUP (b) . . . . . 126  
**Abbildung 8.3:** Diamantähnliche Kristallstruktur von Silicium. . . . . 127  
**Abbildung 8.4:** Klassifizierung der Airborne Molecular Contamination AMC . . . . . 127  
**Abbildung 8.5:** AMC-Quellen in FOUPs . . . . . 127  
**Abbildung 8.6:** Durch Luftströmungen übertragene polare (b) und nichtpolare (a) Moleküle. . . . . 128  
**Abbildung 8.7:** Gas-Festkörper-Interaktion auf einer Oberfläche. . . . . 128  
**Abbildung 8.8:** Oberflächenlagen. . . . . 128  
**Abbildung 8.9:** Oberfläche nach dem Ätzen . . . . . 129  
**Abbildung 8.10:** Kristallwachstum an der Kante einer Struktur. . . . . 129  
**Abbildung 8.11:** Prozesszyklus Pod Regenerator . . . . . 130

## Tabellenverzeichnis

<b>1 Einführung in die Vakuumtechnik</b>	<b>Tabelle 1.1:</b>	Zusammensetzung der atmosphärischen Luft. . . . .	10
	<b>Tabelle 1.2:</b>	Druckbereiche in der Vakuumtechnik . . . . .	10
	<b>Tabelle 1.3:</b>	Umrechnungstabelle für Druckeinheiten . . . . .	10
	<b>Tabelle 1.4:</b>	Molare Massen und mittlere thermische Geschwindigkeiten verschiedener Gase. . . . .	12
	<b>Tabelle 1.5:</b>	Mittlere freie Weglänge ausgewählter Gase bei 273,15K . . . . .	13
	<b>Tabelle 1.6:</b>	Mittlere freie Weglänge eines Stickstoffmoleküls bei . . . . .	13
	<b>Tabelle 1.7:</b>	Übersicht Strömungsarten . . . . .	14
	<b>Tabelle 1.8:</b>	Umrechnungstabelle Saugleistung 273,15 K (0°C) . . . . .	15
<b>2 Auslegung</b>	<b>Tabelle 2.1:</b>	Saugvermögen eines Wälzkolbenpumpstands und Auspumpzeit. . . . .	24
<b>3 Mechanische Komponenten im Vakuum</b>	<b>Tabelle 3.1:</b>	Chemische Zusammensetzung (Masseanteil) von Edelstählen gemäß der europäischen Werkstoffbezeichnung nach EN 10088 Teil 1. . . . .	33
	<b>Tabelle 3.2:</b>	Chemische Zusammensetzung (Masseanteil) von Edelstählen gemäß der Werkstoffbezeichnung nach AISI (American Iron and Steel Institute) . . . . .	33
	<b>Tabelle 3.3:</b>	Eigenschaften von Edelstählen . . . . .	33
	<b>Tabelle 3.4:</b>	Eigenschaften von Elastomerwerkstoffen . . . . .	37
	<b>Tabelle 3.5:</b>	Vergleich von Dichtungsmaterialien . . . . .	38
	<b>Tabelle 3.6:</b>	Mechanische Kennwerte und Werkstoffe von Schrauben bei Raumtemperatur . . . . .	45
	<b>Tabelle 3.7:</b>	Reibungskoeffizienten für Edelstahl und verzinkte Stahlschrauben. . . . .	45
	<b>Tabelle 3.8:</b>	Temperaturabhängigkeit der 0,2 % Dehngrenze für Edelstahl- und Stahlschrauben mit Durchmesser $\leq$ M24 . . . . .	45
	<b>Tabelle 3.9:</b>	Maximales Anziehdrehmoment und maximal resultierende Vorspannkraft für Edelstahlschrauben . . . . .	46
	<b>Tabelle 3.10:</b>	Maximales Anziehdrehmoment und maximal resultierende Vorspannkraft für Stahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8. . . . .	46
<b>4 Vakuumerzeugung</b>	<b>Tabelle 4.1:</b>	Kenndaten HenaLine (alle Angaben für Betrieb an 50 Hz) . . . . .	62
	<b>Tabelle 4.2:</b>	Kenndaten UnoLine Plus (alle Angaben für Betrieb an 50 Hz) . . . . .	62
	<b>Tabelle 4.3:</b>	Kenndaten PentaLine . . . . .	63
	<b>Tabelle 4.4:</b>	Kenndaten DuoLine . . . . .	63
	<b>Tabelle 4.5:</b>	Kenndaten Duo M-Reihe . . . . .	63
	<b>Tabelle 4.6:</b>	Kenndaten Duo MC-Reihe . . . . .	64
	<b>Tabelle 4.7:</b>	Kenndaten Pascal SD-Reihe. . . . .	64
	<b>Tabelle 4.8:</b>	Kenndaten Pascal I-Reihe. . . . .	64
	<b>Tabelle 4.9:</b>	Kenndaten Pascal C1-Reihe. . . . .	65
	<b>Tabelle 4.10:</b>	Kenndaten Pascal C2-Reihe. . . . .	65
	<b>Tabelle 4.11:</b>	Ölarten für Vorpumpen und Wälzkolbenpumpen . . . . .	66
	<b>Tabelle 4.12:</b>	Kenndaten von Membranpumpen . . . . .	68
	<b>Tabelle 4.13:</b>	Kenndaten HeptaDry . . . . .	70
	<b>Tabelle 4.14:</b>	Mögliche Konfigurationen von luftgekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen . . . . .	72
	<b>Tabelle 4.15:</b>	Kenndaten von luftgekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen . . . . .	72
	<b>Tabelle 4.16:</b>	Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen für nicht-korrosive Anwendungen . . . . .	77
	<b>Tabelle 4.17:</b>	Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der P-Serie für korrosive Anwendungen . . . . .	77
	<b>Tabelle 4.18:</b>	Kenndaten von wassergekühlten mehrstufigen Wälzkolbenpumpen der H-Serie für harte korrosive Anwendungen . . . . .	77
<b>Tabelle 4.19:</b>	Kenndaten OktaLine. . . . .	81	
<b>Tabelle 4.20:</b>	Kenndaten OnToolBooster . . . . .	83	
<b>Tabelle 4.21:</b>	Ausgewählte Kenndaten HiPace® für Stickstoff . . . . .	89	
<b>Tabelle 4.22:</b>	Kenndaten magnetgelagerter Turbopumpen für Stickstoff . . . . .	90	
<b>5 Vakuummessgeräte</b>	<b>Tabelle 5.1:</b>	Aktive und passive Messröhren. . . . .	96
	<b>Tabelle 5.2:</b>	Auswahlhilfe Vakuummeter . . . . .	97

<b>6 Massenspektrometer und Restgasanalyse</b>	<b>Tabelle 6.1:</b>	Filamentmaterialien und deren Anwendungen . . . . .	108
	<b>Tabelle 6.2:</b>	Detektoren und deren Eigenschaften . . . . .	111
	<b>Tabelle 6.3:</b>	Verschiedene Gaseinlasssysteme und deren Eigenschaften . . . . .	113
<b>7 Lecksuche</b>	<b>Tabelle 7.1:</b>	Lokale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuumverfahren . . . . .	121
	<b>Tabelle 7.2:</b>	Integrale Lecksuche mit Schnüffel- und Vakuumverfahren . . . . .	122
	<b>Tabelle 7.3:</b>	Pfeiffer Vacuum Lecksuchgeräte . . . . .	124

## Formelverzeichnis

<b>1 Einführung in die Vakuumentchnik</b>	<b>Formel 1-1:</b>	Barometrische Höhenformel . . . . .	9
	<b>Formel 1-2:</b>	Barometrische Höhenformel, numerisch . . . . .	9
	<b>Formel 1-3:</b>	Druckdefinition . . . . .	9
	<b>Formel 1-4:</b>	Boyle-Mariotte'sches Gesetz . . . . .	11
	<b>Formel 1-5:</b>	Gay-Lussac'sches Gesetz . . . . .	11
	<b>Formel 1-6:</b>	Allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase . . . . .	11
	<b>Formel 1-7:</b>	Zustandsgleichung für ideale Gase I . . . . .	11
	<b>Formel 1-8:</b>	Zustandsgleichung für ideale Gase II . . . . .	11
	<b>Formel 1-9:</b>	Wahrscheinlichste Geschwindigkeit . . . . .	12
	<b>Formel 1-10:</b>	Mittlere Geschwindigkeit . . . . .	12
	<b>Formel 1-11:</b>	Mittlere freie Weglänge . . . . .	12
	<b>Formel 1-12:</b>	Mittlere freie Weglänge II . . . . .	12
	<b>Formel 1-13:</b>	Knudsenzahl . . . . .	14
	<b>Formel 1-14:</b>	Knudsenzahl . . . . .	14
	<b>Formel 1-15:</b>	pV-Durchfluss . . . . .	15
	<b>Formel 1-16:</b>	Saugleistung einer Vakuumpumpe . . . . .	15
	<b>Formel 1-17:</b>	Saugvermögen einer Vakuumpumpe . . . . .	15
	<b>Formel 1-18:</b>	Definition Leitwert . . . . .	16
	<b>Formel 1-19:</b>	Ohm'sches Gesetz . . . . .	16
	<b>Formel 1-20:</b>	Parallelschaltung Leitwerte . . . . .	16
	<b>Formel 1-21:</b>	Reihenschaltung Leitwerte . . . . .	16
	<b>Formel 1-22:</b>	Verblockung einer Blende . . . . .	16
	<b>Formel 1-23:</b>	Blendendurchfluss . . . . .	17
	<b>Formel 1-24:</b>	Blendenleitwert . . . . .	17
	<b>Formel 1-25:</b>	Blendenleitwert für Luft . . . . .	17
	<b>Formel 1-26:</b>	Leitwert Rohr laminar . . . . .	17
	<b>Formel 1-27:</b>	Leitwert Rohr laminar für Luft . . . . .	17
	<b>Formel 1-28:</b>	Rohr molekular . . . . .	17
	<b>Formel 1-29:</b>	Durchtrittswahrscheinlichkeit für lange runde Rohre . . . . .	17
	<b>Formel 1-30:</b>	Leitwert Rohr molekular . . . . .	17
	<b>Formel 1-31:</b>	Leitwert Rohr molekular . . . . .	17
	<b>Formel 1-32:</b>	Desorptionsstrom . . . . .	19
	<b>Formel 1-33:</b>	Desorptionsstrom aus Kunststoffen . . . . .	19
	<b>Formel 1-34:</b>	Permeation . . . . .	19
	<b>Formel 1-35:</b>	Leckrate . . . . .	19
	<b>Formel 1-36:</b>	Enddruck als Funktion der Zeit . . . . .	20

## 2 Auslegung

<b>Formel 2-1:</b>	Gaslast Wälzkolbenpumpe . . . . .	22
<b>Formel 2-2:</b>	Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe . . . . .	22
<b>Formel 2-3:</b>	Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe laminar . . . . .	22
<b>Formel 2-4:</b>	Kompressionsverhältnis Wälzkolbenpumpe molekular . . . . .	23
<b>Formel 2-5:</b>	Saugvermögen Wälzkolbenpumpstand bei geöffnetem Überströmventil und hohem Vorvakuumdruck. . . . .	23
<b>Formel 2-6:</b>	Saugvermögen Wälzkolbenpumpstand bei geöffnetem Überströmventil und hohem Vorvakuumdruck. . . . .	23
<b>Formel 2-7:</b>	Saugvermögen Wälzkolbenpumpstand bei hohem Ansaugdruck. . . . .	23
<b>Formel 2-8:</b>	Saugvermögen Wälzkolbenpumpstand bei niedrigem Ansaugdruck . . . . .	23
<b>Formel 2-9:</b>	Auspumpzeit . . . . .	23
<b>Formel 2-10:</b>	Saugvermögensberechnung . . . . .	23
<b>Formel 2-11:</b>	Gasdurchsatz für das Abpumpen von Dämpfen . . . . .	25
<b>Formel 2-12:</b>	Berechnung Kondensationsfläche . . . . .	26
<b>Formel 2-13:</b>	Basisdruck eines Vakuumsystems . . . . .	27
<b>Formel 2-14:</b>	Diffusionskoeffizient (T) . . . . .	28

## 4 Vakuumerzeugung

<b>Formel 4-1:</b>	Kompressionsverhältnis . . . . .	59
<b>Formel 4-2:</b>	Gasstrom Pumpkombination . . . . .	59
<b>Formel 4-3:</b>	Rückströmleitwert . . . . .	59
<b>Formel 4-4:</b>	Reales Kompressionsverhältnis . . . . .	59
<b>Formel 4-5:</b>	Rekursionsformel Saugvermögen . . . . .	59
<b>Formel 4-6:</b>	Wasserdampfverträglichkeit . . . . .	60
<b>Formel 4-7:</b>	Wasserdampfkapazität. . . . .	60
<b>Formel 4-8:</b>	Kompressionsverhältnis Turbopumpe . . . . .	84
<b>Formel 4-9:</b>	Saugvermögen Turbopumpe . . . . .	84
<b>Formel 4-10:</b>	Effektives Saugvermögen Turbopumpe . . . . .	85
<b>Formel 4-11:</b>	Spezifisches Saugvermögen . . . . .	85
<b>Formel 4-12:</b>	Saugvermögen Holweckstufe . . . . .	86
<b>Formel 4-13:</b>	Kompressionsverhältnis Holweckstufe . . . . .	86
<b>Formel 4-14:</b>	Enddruck . . . . .	87

## 6 Massenspektrometer und Restgasanalyse

<b>Formel 6-1:</b>	kinetische Energie . . . . .	103
<b>Formel 6-2:</b>	Lorentzkraft . . . . .	103
<b>Formel 6-3:</b>	Käftegleichheit . . . . .	103
<b>Formel 6-4:</b>	Bahnradius . . . . .	103
<b>Formel 6-5:</b>	Quadrupol-Ablenkspannung . . . . .	104
<b>Formel 6-2:</b>	Stabilitätsparameter $a$ . . . . .	105
<b>Formel 6-3:</b>	Stabilitätsparameter $q$ . . . . .	105
<b>Formel 6-8:</b>	Stabilitätsbedingung für U . . . . .	105
<b>Formel 6-9:</b>	Stabilitätsbedingung für V . . . . .	105
<b>Formel 6-10:</b>	Hochpassbedingung . . . . .	105
<b>Formel 6-11:</b>	HF-Leistung . . . . .	106
<b>Formel 6-12:</b>	Streuung . . . . .	106
<b>Formel 6-13:</b>	Ionenstrom . . . . .	107

## 8 Lösungen zum Kontaminations- management

<b>Formel 8-1:</b>	Oberflächenabdeckung . . . . .	129
<b>Formel 8-2:</b>	Dosis der Kontamination . . . . .	129

## Literaturverzeichnis

- [1] Paul Scherrer Institut, Villigen, CH
- [2] DIN 28400-1, Ausgabe: 1990-05, Titel (deutsch): Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen.
- [3] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 667
- [4] G. M. Barrow, G. W. Herzog (bearb.), Physikalische Chemie Teil 1: Atome, Moleküle, Kerne, 5. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 2 ff
- [5] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 17
- [6] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 23
- [7] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 25
- [8] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, Tabelle 17.5, S. 667
- [9] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988, S. 38
- [10] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, Tabelle 17.6, S. 668
- [11] Zur Herleitung siehe Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 84
- [12] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 83
- [13] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988, S. 132
- [14] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 690
- [15] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden
- [16] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988
- [17] Jobst H. Kerspe, Vakuumtechnik in der industriellen Praxis, 3. Auflage, expert Verlag, Renningen 2003
- [18] John F. O'Hanlon, A user's guide to vacuum technology (3<sup>rd</sup> Edition). Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2003
- [19] J. Delafosse, G. Mongodin, Les calculs de la technique du vide, Société française des ingénieurs et techniciens du vide, 1961
- [20] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 272.
- [21] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 273 ff



- [22] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 150.
- [23] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, S. 638
- [24] G. Schweitzer, H. Bleuler, A. Traxler, Active Magnetic Bearings, vdf Hochschulverlag AG, 1994
- [25] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag, S. 327 – 331
- [26] Karl Jousten (Hrsg.), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9. Auflage Vieweg Verlag, S. 321 – 325
- [27] Bayard, R. T. u. D. Alpert, Rev. Sci. Instr. 21 (1950) S. 571
- [28] Hobson und Redhead, Can. J. Phys. 36 (1958) S. 271
- [29] Dawson, Peter H., Quadrupole Mass Spectrometry and Its Applications, American Institute of Physics (1997)
- [30] Gross, Jürgen H., Mass Spectrometry: A Textbook, Springer (2011)
- [31] Fachbericht Balzers BG 800003, Das Funktionsprinzip des Quadrupol-Massenspektrometers (1990)
- [32] Redhead, P. A., Hobson, J. P. and Kornelsen, E. V., The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum, Chapman & Hall, London (1968)
- [33] DIN EN 1330-8:1998-7 Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 8: Begriffe der Dichtheitsprüfung
- [34] DIN EN 1779:1999-10: Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren
- [35] G. E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits. In: Electronics. 38, Nr. 8, 1965, S. 114–117
- [36] <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>;  
see: Yield Enhancement
- [37] P. Gonzáles et al.: FOUPs Polymers Against AMCs: The HF Case, Future Fab international, issue 42
- [38] Jin, Weidong, Study of Plasma-Surface Kinetics And Feature Profile Simulation of Poly-Silicon Etching in Cl<sub>2</sub>/HBr Plasma, M.I.T., Dept. of Chemical Engineering

## **Impressum**

### **Pfeiffer Vacuum GmbH**

April 2013

Technische Änderungen vorbehalten

Schutzgebühr: Euro 60,-

Vacuum Technology Book Volume II: PI 0355 PDE

Band 2 – Know-how Book: PI 0355\_2 PDE

### **Bildnachweis**

Pfeiffer Vacuum GmbH: Produktabbildungen und Zeichnungen

### **Produktfotos**

Fotostudio Gleim, 35452 Heuchelheim, Deutschland

### **Herausgeber und verantwortlich für den Inhalt**

Pfeiffer Vacuum GmbH

Berliner Strasse 43

35614 Asslar, Deutschland

T +49 6441 802 0

F +49 6441 802 1202

info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.de

### **Umsetzung**

LOTS OF DOTS MediaGroup. AG, 55129 Mainz, Deutschland

### **Druck**

mSP Druck und Medien GmbH, 57555 Mundersbach, Deutschland

### **Hinweis**

The Vacuum Technology Book Volume II, gültig ab 01. April 2013