

Karl Jousten (Hrsg.)

# **Wutz Handbuch Vakuumtechnik**

**Theorie und Praxis**

Mit 558 Abbildungen und 101 Tabellen



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Die Geschichte der Vakuumphysik und Vakuumtechnik .....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatur .....	15
<b>2 Anwendungen und Aufgaben der Vakuumtechnik .....</b>	<b>16</b>
2.1 Literatur .....	23
<b>3 Gasgesetze und kinetische Gastheorie .....</b>	<b>24</b>
3.1 Beschreibung des Gaszustandes .....	24
3.1.1 Zustandsgrößen .....	24
3.1.2 Mengengrößen .....	27
3.1.3 Zustandsgleichung des idealen Gases .....	29
3.1.4 Gemisch verschiedener Gase .....	31
3.2 Kinetische Gastheorie.....	32
3.2.1 Modellvorstellung .....	32
3.2.2 Wanddruck als Folge von Teilchenstößen .....	33
3.2.3 Geschwindigkeitsverteilung von Maxwell und Boltzmann .....	34
3.2.4 Flächenstoßrate und Effusion .....	37
3.2.5 Größe der Gasteilchen, freie Weglänge .....	38
3.3 Transporteigenschaften von Gasen.....	42
3.3.1 Druckabhängigkeit.....	42
3.3.2 Innere Reibung in Gasen: Viskosität .....	43
3.3.3 Wärmetransport: Wärmeleitfähigkeit.....	47
3.3.4 Diffusion .....	54
3.4 Reale Gase.....	56
3.4.1 Zustandsgleichungen.....	56
3.5 Dämpfe .....	60
3.5.1 Sättigungsdampfdruck .....	60
3.5.2 Verdampfungsrate.....	63
3.6 Literatur .....	65
<b>4 Strömung von Gasen .....</b>	<b>66</b>
4.1 Strömungsarten, Begriffsdefinitionen .....	66
4.1.1 Charakterisierung von Strömungen, Knudsenzahl, Reynoldszahl .....	66
4.1.2 Gasstrom, Saugleistung, Saugvermögen.....	69
4.1.3 Strömungswiderstand, Strömungsleitwert .....	74
4.1.4 Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe.....	75
4.2 Reibungsfreie viskose Strömung, Gasdynamik.....	76
4.2.1 Erhaltungssätze .....	76
4.2.2 Allmähliche Querschnittsänderung: isentrope Zustandsänderung .....	78
4.2.3 Kritische Strömung .....	81
4.2.4 Verblockung bei kleinem Auslassdruck .....	83

4.2.5	Kontraktion bei Einströmung in Blende und Rohr.....	84
4.2.6	Beispiele zur Düsenströmung .....	85
4.2.7	Gerader und schräger Verdichtungsstoß .....	88
4.2.8	Lavaldüse, Ausströmung bei Gegendruck .....	90
4.2.9	Strömung um eine Ecke (Prandtl-Meyer) .....	93
4.3	Reibungsbehaftete viskose Leitungsströmung.....	95
4.3.1	Laminare und turbulente Strömung durch eine Leitung .....	95
4.3.2	Leitungsströmung von Luft.....	99
4.3.3	Lufteinströmung in einen Kessel, Beispiele.....	103
4.3.4	Rohr in der Ansaugleitung einer Pumpe, Beispiele .....	106
4.3.5	Strömung durch Leitungen mit nicht-kreisförmigem Querschnitt .....	109
4.3.6	Gasartabhängigkeit der Strömung .....	111
4.4	Molekulare Strömung im (Ultra-) Hochvakuum .....	112
4.4.1	Strömungsform, Begriffe, Durchlaufwahrscheinlichkeit .....	112
4.4.2	Molekulare Strömung durch Blende .....	115
4.4.3	Molekulare Strömung durch Leitung gleichbleibenden Querschnitts.....	117
4.4.4	Molekulare Strömung durch Kreisrohr .....	119
4.4.5	Molekulare Strömung durch Leitungen einfachen Querschnitts.....	120
4.4.6	Rohrbogen und Rohrknien .....	124
4.4.7	Hintereinanderschaltung von Rohr und Blende .....	125
4.4.8	Hintereinanderschaltung von Bauelementen.....	126
4.4.9	Molekularströmung durch konisches Kreisrohr (Trichter) .....	128
4.4.10	Bauelement in der Ansaugleitung einer Pumpe .....	129
4.5	Strömung im gesamten Druckbereich.....	130
4.5.1	Kennzeichnung der Strömung.....	130
4.5.2	Strömung durch dünne Kreisblende.....	130
4.5.2	Strömung durch langes Kreisrohr .....	133
4.6	Strömung bei Temperaturdifferenz, thermische Effusion, Transpiration .....	137
4.7	Messung von Strömungsleitwerten.....	140
4.7.1	Notwendigkeit der Messung .....	140
4.7.2	Messung des charakteristischen Leitwerts (Eigenleitwert) .....	141
4.7.3	Berechnung des reduzierten Leitwerts (Einbauleitwert) .....	142
4.7.4	Messung des reduzierten Leitwerts .....	142
4.8	Literatur .....	144
<b>5</b>	<b>Sorption und Diffusion .....</b>	<b>145</b>
5.1	Sorptionsphänomene und deren Bedeutung; Begriffe und Terminologie .....	145
5.2	Adsorptions- und Desorptionskinetik.....	149
5.2.1	Adsorptionsrate .....	149
5.2.2	Desorptionsrate .....	150
5.2.3	Hobsons Modell einer Auspumpkurve.....	152
5.2.4	Mono-Schicht-Adsorptionsisothermen .....	155
5.2.5	Mehrschicht-Adsorption und Brunauer-Emmett-Teller-(BET-) Isotherme .....	157
5.2.6	Mono-Zeit .....	158
5.3	Absorption, Diffusion und Ausgasung .....	159
5.4	Permeation .....	165
5.5	Literatur .....	167

<b>6</b>	<b>Verdrängerpumpen</b> .....	168
6.1	Einleitung und Übersicht.....	168
6.2	Oszillationsverdrängerpumpen.....	170
6.2.1	Kolbenpumpen.....	170
6.2.2	Membranpumpen .....	172
6.2.2.1	Aufbau und Funktionsweise.....	172
6.2.2.2	Saugvermögen und Enddruck .....	173
6.2.2.3	Gasballast .....	175
6.2.2.4	Antriebskonzepte .....	175
6.2.2.5	Enddruck .....	176
6.2.2.6	Gasartabhängigkeit des Saugvermögens und des Enddrucks .	177
6.2.2.7	Drehzahlabhängigkeit des Enddrucks .....	178
6.2.2.8	Konstruktionsprinzipien.....	178
6.2.2.9	Anwendung von Membranpumpen im Chemielabor .....	180
6.2.2.10	Membranpumpen als Vorpumpen für Turbomolekular- pumpen.....	180
6.2.2.11	Membranpumpen in Kombination mit anderen Vakuumpumpen.....	183
6.3	Einwellige Rotationsverdrängerpumpen .....	184
6.3.1	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen ([26] ... [31]) .....	184
6.3.1.1	Aufbau und Funktionsweise.....	185
6.3.1.2	Betriebseigenschaften und Auslegung .....	186
6.3.1.3	Bauarten .....	189
6.3.1.4	Pumpstände mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen.....	192
6.3.1.5	Hinweise für den wirtschaftlichen Betrieb.....	194
6.3.2	Drehschieberpumpen .....	196
6.3.2.1	Wirkungsweise und Aufbau.....	196
6.3.2.2	Trocken laufende Drehschieberpumpen .....	197
6.3.2.3	Ölgeschmierte Drehschieberpumpen .....	198
6.3.2.4	Frischöl geschmierte Drehschieberpumpe .....	200
6.3.2.5	Betriebsverhalten und Hinweise .....	201
6.3.2.6	Kennlinien, Kenndaten.....	203
6.3.3	Sperrschieberpumpen.....	204
6.3.3.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau.....	204
6.3.3.2	Vergleich zwischen Dreh- und Sperrschieberpumpen .....	208
6.3.4	Trochoidenpumpen .....	208
6.3.5	Scroll-Pumpen.....	210
6.3.5.1	Das Verdichtungsprinzip.....	210
6.3.5.2	Aufbau.....	211
6.3.5.3	Anwendungen und Vorteile .....	212
6.4	Zweiwellige Rotationsverdrängerpumpen.....	213
6.4.1	Schraubenpumpen.....	213
6.4.1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau.....	213
6.4.1.2	Wärmeverhalten und technische Hinweise .....	219
6.4.2	Drehzahnumpen .....	221
6.4.2.1	Verdichtungsprinzip.....	222
6.4.2.2	Vergleich mit Wälzkolbenpumpen .....	224
6.4.2.3	Mehrstufige Drehzahnumpen und Pumpkombinationen.....	226

6.4.2.4	Drehzahlregelung .....	226
6.4.2.5	Anwendungsgebiete .....	226
6.4.3	Wälzkolbenpumpen (Roots-Pumpen) .....	226
6.4.3.1	Wirkungsweise .....	227
6.4.3.2	Technischer Aufbau .....	228
6.4.3.3	Theoretische Grundlagen .....	230
6.4.3.4	Der effektive Gasstrom .....	230
6.4.3.5	Kompressionsverhältnis $K_0$ bei Nulldurchsatz .....	230
6.4.3.6	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad [51] .....	232
6.4.3.7	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/Wälzkolbenpumpe .....	233
6.4.3.8	Saugvermögen und Enddruck .....	236
6.4.3.9	Installation und Betriebshinweise .....	238
6.5	Spezifische Eigenschaften ölgedichteter Verdrängerpumpen .....	239
6.5.1	Saugvermögen und erreichbarer Enddruck .....	239
6.5.1.1	Saugvermögen und Endpartialdruck .....	239
6.5.1.2	Enddruck und Ölauswahl .....	240
6.5.2	Ölrückströmung .....	243
6.6	Grundlagen Verdrängerpumpen .....	244
6.6.1	Abpumpen von Dämpfen – Gasballast .....	244
6.6.2	Leistungsbedarf .....	248
6.6.2.1	Isotherme Kompression .....	249
6.6.2.2	Adiabatische Kompression .....	249
6.6.2.3	Polytrope Kompression .....	250
6.6.2.4	Kompressionsleistung .....	250
6.7	Betriebs- und Sicherheitshinweise .....	252
6.7.1	Aufstellung und elektrischer Anschluss .....	252
6.7.2	An- und Abstellen, Saugstutzenventile .....	252
6.7.3	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise .....	253
6.7.4	Sicherheitstechnische Hinweise .....	254
6.8	Spezifisches Zubehör für Verdrängerpumpen .....	256
6.8.1	Sorptionsfallen .....	256
6.8.2	Sicherheitsventile .....	257
6.8.3	Ölfilter und Ölreinigung .....	257
6.8.4	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider) .....	259
6.8.5	Staubfilter .....	260
6.9	Literatur .....	261
<b>7</b>	<b>Kondensatoren</b> .....	<b>265</b>
7.1	Kondensationsvorgänge im Vakuum .....	265
7.1.1	Grundlagen .....	265
7.1.2	Kondensation reiner Dämpfe .....	267
7.1.3	Kondensation von Gas-Dampf Gemischen .....	269
7.1.4	Kühlmittel .....	272
7.2	Bauarten von Kondensatoren .....	273
7.2.1	Oberflächenkondensatoren für Flüssigkeitskondensation .....	273
7.2.2	Mischkondensatoren .....	275

7.2.3	Kondensataustrag .....	277
7.2.4	Oberflächenkondensatoren für Feststoffkondensation.....	278
7.3	Integration von Kondensatoren in Vakuumsysteme.....	278
7.3.1	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen .....	278
7.3.2	Regelung .....	281
7.4	Berechnungsbeispiele .....	282
7.5	Literatur .....	283
<b>8</b>	<b>Treibmittelpumpen .....</b>	<b>284</b>
8.1	Einleitung, Übersicht.....	284
8.2	Flüssigkeitsstrahlpumpen .....	286
8.3	Dampfstrahl-Vakuumpumpen .....	288
8.3.1	Aufbau und Wirkungsweise.....	288
8.3.2	Leistungsdaten, Betriebsverhalten und Regelung .....	290
8.3.3	Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen .....	293
8.3.4	Organische Dämpfe als Treibmedium .....	295
8.4	Diffusionspumpen .....	296
8.4.1	Aufbau und Arbeitsweise.....	296
8.4.2	Treibmittel.....	300
8.4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen.....	301
8.4.4	Fraktionieren, Entgasen .....	302
8.4.5	Betriebshinweise .....	303
8.4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen .....	303
8.4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahl- pumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells.....	305
8.5	Vergleich Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen .....	313
8.6	Literatur .....	315
<b>9</b>	<b>Molekular- und Turbomolekularpumpen .....</b>	<b>316</b>
9.1	Einleitung .....	316
9.2	Molekularpumpen.....	318
9.2.1	Gaedepumpstufe .....	318
9.2.2	Holweckstufe .....	322
9.2.3	Siegbahnstufe.....	322
9.3	Physikalische Grundlagen der Turbomolekularpumpstufen .....	323
9.3.1	Pumpmechanismus.....	323
9.3.2	Wärmehaushalt .....	328
9.4	Turbomolekularpumpen .....	331
9.4.1	Aufbau .....	331
9.4.2	Wirkungsweise.....	332
9.4.3	Rotormaterialien und mechanische Anforderungen.....	333
9.4.4	Heizung und Kühlung.....	334
9.4.5	Sonderausführungen .....	334
9.4.6	Sicherheitsanforderungen .....	335
9.4.7	Lagerung von Turbomolekularpumpenrotoren.....	336
9.4.7.1	Welle mit zwei Kugellagern.....	337
9.4.7.2	Welle mit Permanentmagnetlager und Kugellager .....	337

9.4.7.3	Magnetlagerung.....	338
9.4.8	Antriebe und Bedienung .....	339
9.4.9	Leistungsdaten .....	340
9.4.9.1	Saugvermögen.....	340
9.4.9.2	Kompressionsverhältnis und Enddruck.....	341
9.4.9.3	Auspumpzeiten von Behältern .....	342
9.4.9.4	Pumpen hoher Gaslasten .....	344
9.4.10	Betrieb und Wartung .....	345
9.4.10.1	Wahl der Vorpumpe.....	345
9.4.10.2	Allgemeine Hinweise .....	345
9.4.10.3	Einschalten .....	346
9.4.10.4	Erreichen des Enddruckes .....	346
9.4.10.5	Betrieb in Magnetfeldern .....	346
9.4.10.6	Belüften.....	346
9.4.10.7	Wartung.....	347
9.4.11	Anwendungen .....	347
9.5	Literatur .....	350
<b>10</b>	<b>Sorptionspumpen .....</b>	<b>351</b>
10.1	Einleitung .....	351
10.2	Adsorptionspumpen.....	352
10.2.1	Wirkungsweise.....	352
10.2.2	Aufbau 354	
10.2.3	Endvakuum und Saugvermögen .....	355
10.2.3.1	Enddruck mit einer Adsorptionspumpe.....	355
10.2.3.2	Enddruck mit zwei oder mehr Adsorptionspumpen.....	356
10.2.4	Verbesserung des Endvakuums durch Vorevakuieren oder Füllen mit einem Fremdgas .....	358
10.2.5	Betriebs- und Arbeitshinweise .....	358
10.3	Getter.....	359
10.3.1	Wirkungsweise und Getterarten.....	359
10.3.2	NEG-Pumpen.....	361
10.3.2.1	Grundlagen der Volumengetter / NEG.....	361
10.3.2.2	Aufbau von NEG-Pumpen .....	364
10.3.2.3	Saugvermögen und Getterkapazität.....	365
10.3.2.4	Anwendung von NEG-Pumpen.....	367
10.3.2.5	Sicherheits- und Betriebshinweise .....	367
10.3.3	Verdampferpumpen.....	369
10.3.3.1	Materialien der Verdampfer .....	369
10.3.3.2	Saugvermögen.....	369
10.3.3.3	Getterkapazität .....	373
10.3.3.4	Aufbau der Verdampfergetterpumpen.....	373
10.4	Ionenzerstäuberpumpen.....	377
10.4.1	Wirkungsweise.....	377
10.4.2	Technischer Aufbau (Diodentyp).....	381
10.4.3	Saugvermögen.....	382
10.4.4	Die differentielle Diodenpumpe.....	384
10.4.5	Die Triodenpumpe .....	385

10.4.6	Lineare Zerstäuberpumpen (Distributed ion pump).....	387
10.4.7	Restgasspektrum .....	388
10.4.8	Arbeitstechnik .....	388
10.5	Die Orbitronpumpe.....	390
10.6	Literatur .....	391
<b>11</b>	<b>Kryotechnik und Kryopumpen .....</b>	<b>393</b>
11.1	Einleitung .....	393
11.2	Kühlverfahren.....	394
11.2.1	Begriffe und Hauptsätze der Thermodynamik .....	394
11.2.2	Spezielle Kühlprozesse .....	396
11.2.2.1	Joule-Thomson-Entspannung; Linde-Verfahren.....	396
11.2.2.2	Expansionsmaschinen .....	398
11.2.2.3	Claude-Verfahren .....	399
11.2.2.4	Stirling-Verfahren .....	400
11.2.2.5	Gifford-McMahon-Verfahren .....	400
11.2.3	Allgemeine Kriterien für Kälteanlagen .....	401
11.3	Kryostatentechnik.....	404
11.3.1	Kryostate 404 .....	
11.3.2	Vakuumisolierte Leitungen [18] .....	407
11.3.3	Nachfüllvorrichtungen .....	407
11.3.4	Kältemittelverluste .....	411
11.4	Kryopumpen.....	415
11.4.1	Die Bindung von Gasen an Kaltflächen.....	415
11.4.1.1	Gaskondensation .....	416
11.4.1.2	Kryotrapping und Kryosorption.....	416
11.4.2	Kenngrößen einer Kryopumpe.....	419
11.4.2.1	Startdruck $p_{St}$ .....	420
11.4.2.2	Enddruck $p_{end}$ .....	420
11.4.2.3	Saugvermögen.....	421
11.4.2.4	Standzeit $t_B$ .....	422
11.4.2.5	Kapazität (maximale Gasaufnahme) .....	423
11.4.2.6	Wärmeübertragung auf die Kaltfläche .....	423
11.4.2.7	Wärmeleitfähigkeit der Kondensate.....	424
11.4.2.8	Wachstumsgeschwindigkeit der Kondensatschicht .....	425
11.4.2.9	„cross over“-Wert .....	427
11.4.2.10	Maximal zulässiger $pV$ -Durchfluß .....	427
11.4.3	Konstruktionsprinzipien.....	427
11.4.3.1	Bad-Kryopumpen.....	427
11.4.3.2	Verdampfer-Kryopumpen .....	427
11.4.3.3	Kryopumpen mit Kältemaschine (Refrigerator-Kryopumpen) .....	430
11.4.3.4	Anwendungsbeispiele .....	433
11.4.3.5	Kryopumpen in der Kernfusionstechnik .....	433
11.4.3.6	Kryopumpen in der Raumfahrttechnik.....	434
11.4.3.7	Kryopumpen in Teilchenbeschleunigern .....	435
11.4.3.8	Kryopumpen in industriellen Anlagen .....	435
11.4.3.9	Kryopumpen für UHV-Anlagen .....	435



11.4.4	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe .....	436
11.5	Literatur .....	438
<b>12</b>	<b>Vakuummessgeräte für Totaldruck .....</b>	<b>440</b>
12.1	Einleitung .....	440
12.2	Mechanische Vakuummeter .....	441
12.2.1	Prinzip und Einteilung .....	441
12.2.2	Plattenfedervakuummeter.....	442
12.2.3	Kapselfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa).....	443
12.2.4	Röhrenfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa) .....	444
12.2.4.1	Quarz-Bourdon-Vakuummeter.....	444
12.2.5	Membranvakuummeter .....	445
12.2.5.1	Membranvakuummeter mit mechanischer Anzeige (Messbereich 0,1 kPa ... 100 kPa).....	446
12.2.5.2	Membranvakuummeter mit elektrischem Umformer .....	447
12.2.5.3	Membranvakuummeter nach dem piezo-resistiven Prinzip ....	448
12.2.5.4	Piezo-elektrische Vakuummeter.....	449
12.2.5.5	Kapazitätsvakuummeter .....	449
12.2.5.6	Thermische Transpiration .....	452
12.2.6	Druckschalter und Druckregler .....	454
12.3	Gasreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge).....	455
12.3.1	Messanordnung und Messprinzip .....	456
12.3.2	Bremsung durch Gasreibung.....	457
12.3.3	Durchführung der Messung .....	461
12.3.4	Erweiterung des Messbereichs zu höheren Drücken.....	462
12.3.5	Messunsicherheit.....	463
12.4	Direkte elektrische Druckmessumformer .....	464
12.5	Wärmeleitungsvakuummeter .....	464
12.5.1	Prinzip .....	464
12.5.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur .....	467
12.5.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung .....	470
12.5.4	Thermoelementvakuummeter (Thermocouple).....	471
12.5.5	Thermistoren .....	471
12.5.6	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern.....	472
12.6	Gasflussmessgeräte.....	472
12.7	Ionisationsvakuummeter.....	475
12.7.1	Prinzip und Einteilung .....	475
12.7.2	Geschichtliche Entwicklung der Ionisationsvakuummeter .....	475
12.7.3	Ionisationsvakuummeter mit Emissionskathode .....	477
12.7.3.1	Messprinzip .....	477
12.7.3.2	Aufbau der Emissionskathoden-Ionisationsvakuummeter .....	481
12.7.3.3	Konzentrische Triode .....	482
12.7.3.4	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter .....	482
12.7.3.5	Ionisationsvakuummeter nach Bayard und Alpert .....	484
12.7.3.6	Extraktor-Ionisationsvakuummeter .....	487
12.7.3.7	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter.....	490
12.7.3.8	Betriebshinweise für Emissionskathoden-Ionisationsvakuum- meter.....	490

12.7.4 Ionisationsvakuummeter mit gekreuzten elektromagnetischen Feldern ..	492
12.7.4.1 Penning-Vakuummeter .....	492
12.7.4.2 Magnetron und invertiertes Magnetron.....	496
12.8 Vergleichende Betrachtung zwischen den beiden Arten von Ionisations- vakuummetern .....	498
12.9 Allgemeine Hinweise .....	500
12.10 Literatur.....	503
<b>13 Partialdruckmessgeräte und Leckdetektoren .....</b>	<b>506</b>
13.1 Einleitung .....	506
13.2 Partialdruckmessgeräte (Massenspektrometer) .....	506
13.2.1 Ionenquellen.....	511
13.2.1.1 Offene Ionenquelle OIS .....	512
13.2.1.2 Geschlossene Ionenquellen .....	513
13.2.1.3 Crossbeam Ionenquelle .....	514
13.2.2 Heizfaden-Materialien .....	515
13.2.3 Ionenquellenbedingte Artefakte im Massenspektrum.....	516
13.2.4 Massen-Analysatoren.....	517
13.2.4.1 Quadrupol-Massenanalysator.....	518
13.2.4.2 Miniaturisierte Quadrupol-Massenspektrometer.....	521
13.2.4.3 Magnetische Sektorfeld Massenspektrometer.....	524
13.2.5 Ionendetektoren .....	526
13.2.5.1 Faraday-Detektor .....	527
13.2.5.2 Sekundärelektronen-Vervielfacher .....	527
13.2.5.3 SEV mit diskreten Dynoden.....	528
13.2.5.4 SEV mit kontinuierlicher Dynode.....	530
13.2.5.5 Microchannel Plate Detektor.....	530
13.2.6 Steuersoftware für Massenspektrometer .....	532
13.2.6.1 Analoger Scan, Ionenstrom in Abhängigkeit von der Masse..	532
13.2.6.2 Messung ausgewählter Massenzahlen.....	533
13.2.6.3 Lecksuch-Modus .....	533
13.2.7 Weitere Einsatzmöglichkeiten von Massenspektrometern.....	533
13.3 Partialdruckmessung mit optischen Methoden .....	535
13.4 Leckdetektoren .....	537
13.4.1 Grundprinzipien und geschichtliche Entwicklung .....	537
13.4.2 Heliumleckdetektoren .....	537
13.4.2.1 Anforderungen und Grundfunktion bei der Vakuum- lecksuche .....	537
13.4.2.2 Heliumsektorfeldmassenspektrometer .....	538
13.4.2.3 Einlassdruck von Heliumleckdetektoren.....	540
13.4.2.4 Zeitverhalten von Heliumleckdetektoren .....	540
13.4.2.5 Arbeitsprinzipien von Heliumleckdetektoren .....	541
13.4.2.6 Schnüffleinrichtungen für Heliumleckdetektoren .....	545
13.4.2.7 Anwendungsfelder der massenspektrometrischen Helium- leckdetektoren .....	546
13.4.3 Kältemittelleckdetektoren .....	547
13.4.3.1 Aufbau und Funktion .....	547
13.4.3.2 Anwendungsfelder .....	548

13.4.4	Prüflecks .....	548
13.4.4.1	Permeationslecks .....	548
13.4.4.2	Leitwertlecks .....	549
13.4.4.3	Praktische Ausführungen von Prüflecks .....	549
13.4.4.4	Kalibrierung von Prüflecks .....	550
13.4.5	Messeigenschaften und Kalibrierung von Leckdetektoren .....	550
13.4.5.1	Leckdetektoren als Prüfmittel im Sinne der DIN/ISO 9001 ...	550
13.4.5.2	Unsicherheit der Kalibrierung .....	550
13.4.6	Leckdetektoren mit anderen Sensorprinzipien .....	551
13.4.6.1	Heliumschnüffler mit Quarzglasmembrane .....	551
13.4.6.2	Halogenleckdetektoren mit Alkali-Ionen-Sensor .....	551
13.4.6.3	Halogenleckdetektoren mit Infrarot-Sensor .....	552
13.5	Literatur .....	553
<b>14</b>	<b>Kalibrierungen und Normen .....</b>	<b>554</b>
14.1	Einleitung .....	554
14.2	Kalibrierung von Vakuummessgeräten .....	556
14.2.1	Primärnormale .....	556
14.2.1.1	Flüssigkeitsmanometer .....	557
14.2.1.2	Kompressionsmanometer nach McLeod .....	561
14.2.1.3	Drehkolbenmanometer und Druckwaagen .....	562
14.2.1.4	Statisches Expansionsverfahren .....	565
14.2.1.5	Kontinuierliches Expansionsverfahren .....	570
14.2.1.6	Sonstige Primärnormale .....	577
14.2.2	Das Vergleichsmessverfahren .....	577
14.2.3	Kapazitätsvakuummeter .....	578
14.2.4	Gasreibungsvakuummeter .....	582
14.2.5	Ionisationsvakuummeter .....	584
14.3	Kalibrierungen von Partialdruckmessgeräten .....	586
14.4	Kalibrierungen von Testlecks .....	589
14.5	Normen für die Bestimmung von Kenngrößen von Vakuumpumpen .....	591
14.6	Literaturverzeichnis .....	594
<b>15</b>	<b>Werkstoffe .....</b>	<b>597</b>
15.1	Anforderungen und Überblick über die Werkstoffe .....	597
15.2	Werkstoffe der Vakuumtechnik [1] .....	598
15.2.1	Metalle .....	598
15.2.1.1	Die wichtigsten Metalle und Metalllegierungen .....	599
15.2.2	Technische Gläser .....	603
15.2.2.1	Allgemeines .....	603
15.2.2.2	Eigenschaften der wichtigsten Gläser .....	605
15.2.3	Keramische Werkstoffe .....	607
15.2.3.1	Allgemeines .....	607
15.2.3.2	Eigenschaften der wichtigsten keramischen Werkstoffe .....	608
15.2.3.3	Keramik in der Vakuumtechnik .....	608
15.2.3.4	Verbindungstechnologien für Keramiken mit Metallen .....	609
15.2.3.5	Zeolithe .....	609

15.2.4	Kunststoffe.....	609
15.2.4.1	Allgemeines .....	609
15.2.4.2	Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffe .....	609
15.2.5	Vakuurfette.....	611
15.2.6	Öle.....	611
15.2.7	Kühlmittel .....	611
15.3	Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen .....	612
15.3.1	Allgemeines .....	612
15.3.2	Gasdurchlässigkeit .....	612
15.3.2.1	Gasdurchlässigkeit von Metallen .....	613
15.3.2.2	Gasdurchlässigkeit von Gläsern und Keramiken .....	614
15.3.2.3	Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen [4].....	615
15.3.3	Gasabgabe.....	616
15.3.3.1	Allgemeines .....	616
15.3.3.2	Sättigungsdampfdruck (siehe auch Abschnitt 3.5.1).....	616
15.3.3.3	Desorption von der Oberfläche, Gasdiffusion aus dem Materialinnern und Richtwerte für die Gasabgabe [6],[5],[13].....	618
15.3.3.4	Diffusion aus dem Inneren.....	618
15.3.3.5	Richtwerte für die Gesamtgasabgaberate [6, 13] .....	621
15.4	Literatur .....	622
<b>16</b>	<b>Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen.....</b>	<b>623</b>
16.1	Einleitung .....	623
16.2	Nichtlösbare Verbindungen [6] .....	623
16.2.1	Schweißverbindungen [16],[14] .....	624
16.2.1.1	Das WIG (Wolfram-Inert-Gas) Schweißen .....	624
16.2.1.2	Das Mikroplasma-, das Elektronenstrahl-Schweißen und das Reib-Schweißen.....	625
16.2.2	Lötverbindungen [2] .....	625
16.2.3	Verschmelzungen [3].....	627
16.2.4	Verbindungen mit Metallisierung [3].....	629
16.2.5	Verbindungen durch Kleben [9] .....	629
16.3	Lösbare Verbindungen [6].....	630
16.3.1	Dichtungen und Dichtflächen .....	630
16.3.2	Kraftbedarf .....	631
16.3.3	Schliffe .....	631
16.3.4	Flanschverbindungen .....	632
16.3.4.1	Kleinflanschbauteile und Dichtungen nach DIN 28403 [4], [5] .....	632
16.3.4.2	ISO-K Bauteile und Dichtungen nach DIN 28404 [4].....	633
16.3.4.3	CF-Bauteile und Dichtungen.....	634
16.3.4.4	COF-Bauteile .....	634
16.3.4.5	Sonderflansche und Sonderdichtungen.....	635
16.3.4.6	Vakuumbauteile und -kammern .....	636
16.3.4.7	Steckverbindungen.....	637
16.4	Vakuumbehälter .....	638
16.4.1	Auslegung.....	638

16.4.1.1	Dimensionierung von Vakuumbehältern und Berechnungsbeispiele.....	638
16.4.2	Doppelwandige Behälter.....	640
16.5	Flexible Verbindungselemente.....	640
16.6	Durchführungen.....	643
16.6.1	Durchführungen für Bewegung und für mechanische Energie.....	643
16.6.1.1	Durchführungen für Linearbewegungen.....	643
16.6.1.2	Durchführungen für Drehbewegungen.....	644
16.6.1.3	Manipulatoren.....	645
16.6.2	Stromdurchführungen.....	646
16.6.2.1	Durchführungen aus Kunststoff.....	646
16.6.2.2	Durchführungen aus Keramik.....	647
16.6.3	Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase.....	648
16.6.3.1	Einblickfenster (Sichtfenster).....	648
16.6.4	Schmierstoffe im Vakuum.....	649
16.7	Absperrorgane (Ventile) [15].....	649
16.7.1	Allgemeines.....	649
16.7.1.1	Aufbau, Auslegung und Anforderungen.....	649
16.7.1.2	Einteilung (Benennung).....	650
16.7.1.3	Betätigungsarten.....	651
16.7.1.4	Abdichtung der Ventile und Werkstoffe.....	652
16.7.2	Eckventile.....	652
16.7.3	Durchgangsventile.....	654
16.7.4	Schieberventile.....	655
16.7.5	Gaseinlassventile [12].....	656
16.8	Vakuumgerechte Fertigung und Oberflächenbehandlung.....	656
16.8.1	Bearbeitungsverfahren.....	656
16.8.2	Oberflächenbehandlung.....	657
16.8.3	Reinigung (Vorreinigung und In-situ).....	658
16.8.3.1	Reinigung von Edelstählen.....	659
16.8.3.2	Reinigen von technischen Gläsern.....	659
16.8.3.3	Reinigen von Keramik.....	660
16.8.3.4	Vakuumglühen.....	660
16.8.3.5	Ausheizen.....	660
16.8.3.6	In-situ-Reinigung durch Glimmentladung und chemisch aktivem Gas.....	661
16.9	Literatur.....	662
<b>17</b>	<b>Arbeitstechnik in den einzelnen Druckbereichen.....</b>	<b>663</b>
17.1	Allgemeine Hinweise.....	663
17.1.1	Enddruck $p_{\text{end}}$ bzw. Betriebsenddruck $p_{\text{B, end}}$ einer Vakuumpumpe.....	663
17.1.2	Enddruck einer Vakuumanlage oder -anlage $p_{\text{end, A}}$ .....	663
17.1.3	Arbeitsdruck.....	664
17.1.4	Arbeitsdruck, bedingt durch den Prozessgasstrom.....	665
17.1.5	Arbeitsdruck, bedingt durch verdampfende Substanzen.....	665
17.1.6	Arbeitsdruck, bedingt durch Ausgasung (vgl. Kapitel 5 und Abschnitt 15.3).....	668

17.1.7	Arbeitsdruck, bedingt durch den Permeationsgasstrom (Abschnitt 15.3.2) .....	668
17.1.8	Arbeitsdruck, bedingt durch den Leckgasstrom .....	669
17.2	Arbeitstechnik im Grobvakuum (101 kPa ... 100 Pa).....	669
17.2.1	Überblick .....	669
17.2.2	Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur.....	670
17.2.3	Pumpen, Art und Saugvermögen .....	670
17.2.4	Pumpstände für Grobvakuum .....	672
17.2.5	Druckmessung im Grobvakuum .....	674
17.2.6	Auspumpzeit im Grobvakuum .....	674
17.2.7	Belüften.....	678
17.3	Arbeitstechnik im Feinvakuum (100 Pa ... 0,1 Pa).....	680
17.3.1	Überblick .....	680
17.3.2	Aufbau einer Feinvakuum-Apparatur .....	680
17.3.3	Pumpen: Art und Saugvermögen .....	681
17.3.4	Druckmessung.....	681
17.3.5	Auspumpzeit und Enddruck.....	682
17.3.6	Belüften.....	685
17.3.7	Feinvakuumpumpstände .....	685
17.4	Arbeitstechnik im Hochvakuum ( $10^{-1}$ Pa ... $10^{-5}$ Pa).....	689
17.4.1	Pumpen: Art und Saugvermögen .....	689
17.4.2	Behandlung der Vakuummeter (Reinigung) .....	690
17.4.3	Hochvakuum pumpstände.....	691
17.4.3.1	Hochvakuum pumpstand mit Diffusionspumpe (s. auch Abschnitt 8.4.6) .....	691
17.4.3.2	Hochvakuum pumpstand mit Turbomolekularpumpe.....	698
17.4.3.3	Der vollautomatische Hochvakuum pumpstand.....	700
17.4.4	Auspumpzeit und Belüften.....	702
17.5	Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum ( $p < 10^{-5}$ Pa) [4] .....	702
17.5.1	Überblick .....	702
17.5.2	Aufbau einer UHV-Apparatur .....	703
17.5.3	UHV-Pumpen: Betriebshinweise .....	704
17.5.3.1	Adsorptionspumpen .....	704
17.5.3.2	Ionenzerstäuberpumpen .....	705
17.5.3.3	Titanverdampferpumpen .....	706
17.5.3.4	Turbomolekularpumpen.....	707
17.5.3.5	Kryopumpen.....	707
17.5.3.6	Volumengetter-(NEG-) Pumpen .....	707
17.5.4	Druckmessung.....	707
17.5.5	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik .....	708
17.5.6	Belüften.....	708
17.5.7	Ultrahochvakuum - Systeme .....	709
17.5.8	Ultrahochvakuum (UHV) - Bauelemente .....	709
17.5.9	Ultrahochvakuum (UHV) - Pumpstände.....	709
17.5.9.1	Ultrahochvakuum (UHV) - Großanlagen.....	712
17.6	Literatur .....	714

<b>18 Lecksuchtechniken</b> .....	715
18.1 Überblick .....	715
18.1.1 Vakuumlecksuche .....	715
18.1.2 Überdrucklecksuche .....	716
18.1.3 Prüfgasverteilung vor einem Leck in der Atmosphäre .....	716
18.1.4 Messergebnisse mit der Schnüffelmethode .....	717
18.1.5 Prüfgas .....	718
18.1.5.1 Helium .....	718
18.1.5.2 Andere Edelgase als Helium .....	718
18.1.5.3 Wasserstoff H <sub>2</sub> .....	719
18.1.5.4 Methan CH <sub>4</sub> .....	719
18.1.5.5 Kohlendioxid CO <sub>2</sub> .....	719
18.1.5.6 Schwefelhexafluorid SF <sub>6</sub> .....	719
18.2 Eigenschaften von Lecks .....	720
18.2.1 Leckrate, Einheiten .....	720
18.2.2 Leckarten .....	720
18.2.2.1 Eigenschaften von Porenlecks .....	721
18.2.2.2 Permeationslecks .....	723
18.2.2.3 Virtuelle Lecks in Vakuumkammern .....	723
18.2.2.4 Flüssigkeitslecks .....	724
18.3 Überblick über die Lecksuchverfahren (siehe auch DIN EN 1779) .....	724
18.3.1 Allgemeine Hinweise zur Dichtheitsprüfung .....	724
18.3.2 Verfahren ohne Prüfgas (Druckprüfungen) .....	726
18.3.2.1 Allgemeines .....	726
18.3.2.2 Druckabfallmessung .....	727
18.3.2.3 Druckanstiegsmessung .....	727
18.3.2.4 Sonstige Verfahren .....	728
18.3.3 Prüfgasverfahren ohne Helium .....	729
18.3.3.1 Allgemeines .....	729
18.3.3.2 Vakuumlecksuche mit Prüfgasen außer Helium .....	729
18.3.3.3 Überdrucklecksuche mit Prüfgasen außer Helium .....	731
18.4 Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektoren .....	731
18.4.1 Eigenschaften des Heliumleckdetektors .....	731
18.4.2 Prüfung von Komponenten .....	732
18.4.2.1 Prüfablauf, integrale Prüfung .....	732
18.4.2.2 Vorgehen zur Lecklokalisierung .....	733
18.4.3 Prüfung von Vakuumanlagen .....	735
18.4.3.1 Allgemeines zum Teilstromverfahren .....	736
18.4.3.2 Anschlusspunkte des Lecksuchers an der Anlage .....	737
18.4.3.3 Nachweisempfindlichkeit und Ansprechzeit .....	739
18.4.4 Überdruck(Schnüffel-)lecksuche mit dem Heliumleckdetektor .....	741
18.4.4.1 Integrales Verfahren (total oder partiell) .....	741
18.4.4.2 Lecklokalisierung mit dem Schnüffler .....	742
18.5 Lecksuchverfahren mit anderen Prüfgasen .....	742
18.5.1 Allgemeines .....	742
18.5.2 Schnüffellecksuche an Kälte-/Klimaanlagen .....	742
18.6 Industrielle Dichtheitsprüfung von Bauteilen in der Serienfertigung .....	743
18.6.1 Allgemeines .....	743

18.6.2 Industrielle Prüfung von Serienbauteilen.....	743
18.6.2.1 Hüllenverfahren für Vakuumkomponenten (Methode A1 in DIN EN 1779) .....	743
18.6.2.2 Vakuumkammerverfahren für Überdruckbauteile (Methode B6 in DIN EN 1779).....	744
18.6.3 Prüfung von hermetisch verschlossenen Komponenten durch Druck- lagerung („Bombing“, Methode B5 in DIN EN 1779) .....	746
18.6.4 Prüfung von Lebensmittelverpackungen in der Folienprüfkammer .....	746
18.7 Literatur .....	747
<b>19 Anhang</b> .....	<b>748</b>
19.A Tabellen .....	748
19.B Diagramme .....	773
19.C Erläuterung einiger häufiger verwendeter Abkürzungen .....	790
19.D Größen und Einheiten.....	790
19.E Glossar.....	793
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>799</b>
<b>Bezugsquellenverzeichnis</b> .....	<b>812</b>