

Karl Jousten (Hrsg.)

Wutz Handbuch Vakuumtechnik

Theorie und Praxis

9., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 569 Abbildungen und 109 Tabellen



Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 9. Auflage	V
Vorwort zur 8. Auflage	VII
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter	IX
1 Die Geschichte der Vakuumphysik und Vakuumtechnik	1
1.1 Literatur	14
2 Anwendungen und Aufgaben der Vakuumtechnik	15
2.1 Literatur	22
3 Gasgesetze und kinetische Gastheorie	23
3.1 Beschreibung des Gaszustandes	23
3.1.1 Zustandsgrößen	23
3.1.2 Mengengrößen	26
3.1.3 Zustandsgleichung des idealen Gases	28
3.1.4 Gemisch verschiedener Gase	30
3.2 Kinetische Gastheorie	31
3.2.1 Modellvorstellung	31
3.2.2 Wanddruck als Folge von Teilchenstößen	32
3.2.3 Geschwindigkeitsverteilung von Maxwell und Boltzmann	33
3.2.4 Flächenstoßrate und Effusion	36
3.2.5 Größe der Gasteilchen, freie Weglänge	37
3.3 Transporteigenschaften von Gasen	41
3.3.1 Druckabhängigkeit	41
3.3.2 Innere Reibung in Gasen: Viskosität	42
3.3.3 Wärmetransport: Wärmeleitfähigkeit	46
3.3.4 Diffusion	53
3.4 Reale Gase	55
3.4.1 Zustandsgleichungen	55
3.5 Dämpfe	59
3.5.1 Sättigungsdampfdruck	59
3.5.2 Verdampfungsrate	62
3.6 Literatur	64
4 Strömung von Gasen	65
4.1 Strömungsarten, Begriffsdefinitionen	65
4.1.1 Charakterisierung von Strömungen, Knudsenzahl, Reynoldszahl	65
4.1.2 Gasstrom, Saugleistung, Saugvermögen	68
4.1.3 Strömungswiderstand, Strömungsleitwert	72
4.1.4 Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe	73

4.2	Reibungsfreie viskose Strömung, Gasdynamik	74
4.2.1	Erhaltungssätze	74
4.2.2	Allmähliche Querschnittsänderung: isentrope Zustandsänderung	76
4.2.3	Kritische Strömung	79
4.2.4	Verblockung bei kleinem Auslassdruck	81
4.2.5	Kontraktion bei Einströmung in Blende und Rohr	82
4.2.6	Beispiele zur Düsenströmung	83
4.2.7	Gerader und schräger Verdichtungsstoß	86
4.2.8	Lavaldüse, Ausströmung bei Gegendruck	89
4.2.9	Strömung um eine Ecke (Prandtl-Meyer)	91
4.3	Reibungsbehaftete viskose Leitungsströmung	94
4.3.1	Laminare und turbulente Strömung durch eine Leitung	94
4.3.2	Leitungsströmung von Luft	97
4.3.3	Luft einströmung in einen Kessel, Beispiele	100
4.3.4	Rohr in der Ansaugleitung einer Pumpe, Beispiele	103
4.3.5	Strömung durch Leitungen mit nicht-kreisförmigem Querschnitt	106
4.3.6	Gasartabhängigkeit der Strömung	108
4.4	Molekulare Strömung im Hoch- und Ultrahochvakuum	109
4.4.1	Strömungsform, Begriffe, Durchlaufwahrscheinlichkeit	109
4.4.2	Molekulare Strömung durch Blende	113
4.4.3	Molekulare Strömung durch Leitung gleichbleibenden Querschnitts	114
4.4.4	Molekulare Strömung durch Kreisrohr	116
4.4.5	Molekulare Strömung durch Leitungen einfachen Querschnitts	118
4.4.6	Rohrbogen und Rohrknie	121
4.4.7	Hintereinanderschaltung von Rohr und Blende	122
4.4.8	Hintereinanderschaltung von Bauelementen	123
4.4.9	Molekularströmung durch konisches Kreisrohr (Trichter)	125
4.4.10	Bauelement in der Ansaugleitung einer Pumpe	126
4.5	Strömung im gesamten Druckbereich	128
4.5.1	Kennzeichnung der Strömung	128
4.5.2	Strömung durch dünne Kreisblende	128
4.5.3	Strömung durch langes Kreisrohr	130
4.6	Strömung bei Temperaturdifferenz, thermische Effusion, Transpiration	135
4.7	Messung von Strömungsleitwerten	138
4.7.1	Notwendigkeit der Messung	138
4.7.2	Messung des charakteristischen Leitwerts (Eigenleitwert)	138
4.7.3	Berechnung des reduzierten Leitwerts (Einbauleitwert)	140
4.7.4	Messung des reduzierten Leitwerts	140
4.8	Literatur	142
5	Sorption und Diffusion	143
5.1	Sorptionsphänomene und deren Bedeutung – Begriffe und Terminologie	143
5.2	Adsorptions- und Desorptionskinetik	148
5.2.1	Adsorptionsrate	148
5.2.2	Desorptionsrate	149
5.2.3	Hobsons Modell einer Auspumpkurve	150
5.2.4	Mono-Schicht-Adsorptionsisothermen	153

5.2.5	Mehrschicht-Adsorption und Brunauer-Emmett-Teller- (BET-)Isotherme	156
5.2.6	Mono-Zeit	157
5.3	Absorption, Diffusion und Ausgasung	158
5.4	Permeation	163
5.5	Literatur	166
6	Verdrängerpumpen	167
6.1	Einleitung und Übersicht	167
6.2	Oszillationsverdrängerpumpen	169
6.2.1	Kolbenpumpen	169
6.2.2	Membranpumpen	171
6.2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	171
6.2.2.2	Saugvermögen und Enddruck	172
6.2.2.3	Gasballast	174
6.2.2.4	Antriebskonzepte	174
6.2.2.5	Enddruck	175
6.2.2.6	Gasartabhängigkeit des Saugvermögens und des Enddrucks	176
6.2.2.7	Drehzahlabhängigkeit des Enddrucks	176
6.2.2.8	Konstruktionsprinzipien	177
6.2.2.9	Anwendung von Membranpumpen im Chemielabor	179
6.2.2.10	Membranpumpen als Vorpumpen für Turbomolekularpumpen	179
6.2.2.11	Membranpumpen in Kombination mit anderen Vakuumpumpen	182
6.3	Einwellige Rotationsverdrängerpumpen	183
6.3.1	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	183
6.3.1.1	Aufbau und Funktionsweise	184
6.3.1.2	Betriebseigenschaften und Auslegung	185
6.3.1.3	Bauarten	188
6.3.1.4	Pumpstände mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	191
6.3.1.5	Hinweise für den wirtschaftlichen Betrieb	193
6.3.2	Drehschieberpumpen	195
6.3.2.1	Wirkungsweise und Aufbau	195
6.3.2.2	Trocken laufende Drehschieberpumpen	196
6.3.2.3	Ölgeschmierte Drehschieberpumpen	197
6.3.2.4	Frischöl geschmierte Drehschieberpumpe	199
6.3.2.5	Betriebsverhalten und Hinweise	200
6.3.2.6	Kennlinien, Kenndaten	202
6.3.3	Sperrschieberpumpen	203
6.3.3.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	203
6.3.3.2	Vergleich zwischen Dreh- und Sperrschieberpumpen	207
6.3.4	Trochoidenpumpen	207
6.3.5	Scroll-Pumpen	209
6.3.5.1	Das Verdichtungsprinzip	209
6.3.5.2	Aufbau	210
6.3.5.3	Anwendungen und Vorteile	211

6.4	Zweiwellige Rotationsverdrängerpumpen	211
6.4.1	Schraubenpumpen	211
6.4.1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	212
6.4.1.2	Wärmeverhalten und technische Hinweise	218
6.4.2	Drehzahnpumpen	220
6.4.2.1	Verdichtungsprinzip	220
6.4.2.2	Vergleich mit Wälzkolbenpumpen	223
6.4.2.3	Mehrstufige Drehzahnpumpen und Pumpkombinationen	225
6.4.2.4	Drehzahlregelung	225
6.4.2.5	Anwendungsgebiete	226
6.4.3	Wälzkolbenpumpen (Roots-Pumpen)	226
6.4.3.1	Wirkungsweise	226
6.4.3.2	Technischer Aufbau	227
6.4.3.3	Theoretische Grundlagen	229
6.4.3.4	Der effektive Gasstrom	229
6.4.3.5	Kompressionsverhältnis K_0 bei Nulldurchsatz	230
6.4.3.6	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad [51]	231
6.4.3.7	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/Wälzkolbenpumpe	232
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	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	258
6.8.4	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider)	259
6.8.5	Staubfilter	260
6.9	Literatur	261

7	Kondensatoren	265
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	276
7.2.3	Kondensataustrag	277
7.2.4	Oberflächenkondensatoren für Feststoffkondensation	278
7.3	Integration von Kondensatoren in Vakuumsysteme	279
7.3.1	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen	279
7.3.2	Regelung	282
7.4	Berechnungsbeispiele	282
7.5	Literatur	284
8	Treibmittelpumpen	285
8.1	Einleitung, Übersicht	285
8.2	Flüssigkeitsstrahlpumpen	286
8.3	Dampfstrahl-Vakuumpumpen	288
8.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	289
8.3.2	Leistungsdaten, Betriebsverhalten und Regelung	290
8.3.3	Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen	294
8.3.4	Organische Dämpfe als Treibmedium	296
8.4	Diffusionspumpen	297
8.4.1	Aufbau und Arbeitsweise	297
8.4.2	Treibmittel	301
8.4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen	302
8.4.4	Fraktionieren, Entgasen	303
8.4.5	Betriebshinweise	305
8.4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen	305
8.4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahlpumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells	308
8.5	Vergleich Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen	315
8.6	Literatur	318
9	Molekular- und Turbomolekularpumpen	319
9.1	Einleitung	319
9.2	Molekularpumpen	321
9.2.1	Gaedepumpstufe	321
9.2.2	Holweckstufe	325
9.2.3	Siegbahnstufe	325
9.3	Physikalische Grundlagen der Turbomolekularpumpstufen	326
9.3.1	Pumpmechanismus	326
9.3.2	Saugvermögen und Kompressionsverhältnis	327

9.3.3	Statistische und Guedesche Betrachtung des Pumpeffekts	328
9.3.4	Wärmehaushalt	331
9.4	Turbomolekularpumpen	334
9.4.1	Aufbau	334
9.4.2	Wirkungsweise	335
9.4.3	Rotormaterialien und mechanische Anforderungen	336
9.4.4	Heizung und Kühlung	337
9.4.5	Sonderausführungen	337
9.4.6	Sicherheitsanforderungen	339
9.4.7	Lagerung von Turbomolekularpumpenrotoren	340
9.4.7.1	Welle mit zwei Kugellagern	340
9.4.7.2	Welle mit Permanentmagnetlager und Kugellager	341
9.4.7.3	Magnetlagerung	341
9.4.8	Antriebe und Bedienung	343
9.4.9	Leistungsdaten	344
9.4.9.1	Saugvermögen	344
9.4.9.2	Kompressionsverhältnis, Enddruck und Basisdruck	345
9.4.9.3	Auspumpzeiten von Behältern	346
9.4.9.4	Pumpen hoher Gaslasten	347
9.4.10	Betrieb und Wartung	349
9.4.10.1	Wahl der Vorpumpe	349
9.4.10.2	Allgemeine Hinweise	349
9.4.10.3	Einschalten	349
9.4.10.4	Erreichen des Basisdruckes	349
9.4.10.5	Betrieb in Magnetfeldern	350
9.4.10.6	Belüften	350
9.4.10.7	Wartung	350
9.4.11	Anwendungen	351
9.5	Literatur	354
10	Sorptionspumpen	355
10.1	Einleitung	355
10.2	Adsorptionspumpen	356
10.2.1	Wirkungsweise	356
10.2.2	Aufbau	358
10.2.3	Endvakuum und Saugvermögen	359
10.2.3.1	Enddruck mit einer Adsorptionspumpe	359
10.2.3.2	Enddruck mit zwei oder mehr Adsorptionspumpen	361
10.2.4	Verbesserung des Endvakuums durch Vorevakuieren oder Füllen mit einem Fremdgas	362
10.2.5	Betriebs- und Arbeitshinweise	362
10.3	Getter	363
10.3.1	Wirkungsweise und Getterarten	363
10.3.2	NEG-Pumpen	365
10.3.2.1	Grundlagen der Volumengetter/NEG	365
10.3.2.2	Aufbau von NEG-Pumpen	369
10.3.2.3	Saugvermögen und Getterkapazität	370

10.3.2.4	Anwendung von NEG-Pumpen	371
10.3.2.5	Sicherheits- und Betriebshinweise	372
10.3.3	Verdampferpumpen	373
10.3.3.1	Materialien der Verdampfer	373
10.3.3.2	Saugvermögen	374
10.3.3.3	Getterkapazität	376
10.3.3.4	Aufbau der Verdampfergetterpumpen	377
10.4	Ionenzerstäuberpumpen	382
10.4.1	Wirkungsweise	382
10.4.2	Technischer Aufbau (Diodentyp)	385
10.4.3	Saugvermögen	386
10.4.4	Die differentielle Diodenpumpe	389
10.4.5	Die Triodenpumpe	389
10.4.6	Lineare Zerstäuberpumpen (Distributed ion pump)	392
10.4.7	Restgasspektrum	392
10.4.8	Arbeitstechnik	393
10.5	Die Orbitronpumpe	394
10.6	Literatur	395
11	Kryotechnik und Kryopumpen	397
11.1	Einleitung	397
11.2	Kühlverfahren	398
11.2.1	Begriffe und Hauptsätze der Thermodynamik	398
11.2.2	Spezielle Kühlprozesse	400
11.2.2.1	Joule-Thomson-Entspannung; Linde-Verfahren	400
11.2.2.2	Expansionsmaschinen	403
11.2.2.3	Claude-Verfahren	404
11.2.2.4	Stirling-Verfahren	404
11.2.2.5	Gifford-McMahon-Verfahren	405
11.2.2.6	Allgemeine Kriterien für Kälteanlagen	406
11.3	Kryostatentechnik	409
11.3.1	Kryostate	409
11.3.2	Vakuumisolierte Leitungen [17]	412
11.3.3	Nachfüllvorrichtungen	413
11.3.4	Kältemittelverluste	417
11.4	Kryopumpen	421
11.4.1	Die Bindung von Gasen an Kaltflächen	421
11.4.1.1	Gaskondensation	422
11.4.1.2	Kryotrapping und Kryosorption	422
11.4.2	Kenngrößen einer Kryopumpe	425
11.4.2.1	Startdruck p_{St}	425
11.4.2.2	Enddruck p_{end}	426
11.4.2.3	Saugvermögen	427
11.4.2.4	Standzeit \bar{t}_B	428
11.4.2.5	Kapazität (maximale Gasaufnahme)	429
11.4.2.6	Wärmeübertragung auf die Kaltfläche	429
11.4.2.7	Wärmeleitfähigkeit der Kondensate	430

11.4.2.8	Wachstumsgeschwindigkeit der Kondensatschicht	431
11.4.2.9	„Cross-over“-Wert	432
11.4.2.10	Maximal zulässiger pV -Durchfluß	432
11.4.3	Konstruktionsprinzipien	433
11.4.3.1	Bad-Kryopumpen	433
11.4.3.2	Verdampfer-Kryopumpen	433
11.4.3.3	Kryopumpen mit Kältemaschine (Refrigerator-Kryopumpen)	436
11.4.3.4	Anwendungsbeispiele	439
11.4.3.5	Kryopumpen in der Kernfusionstechnik	439
11.4.3.6	Kryopumpen in der Raumfahrttechnik	440
11.4.3.7	Kryopumpen in Teilchenbeschleunigern	441
11.4.3.8	Kryopumpen in industriellen Anlagen	441
11.4.3.9	Kryopumpen für UHV-Anlagen	441
11.4.4	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe	443
11.5	Literatur	444
12	Vakuummessgeräte für Totaldruck	446
12.1	Einleitung	446
12.2	Mechanische Vakuummeter	447
12.2.1	Prinzip und Einteilung	447
12.2.2	Plattenfedervakuummeter	448
12.2.3	Kapselfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa)	449
12.2.4	Röhrenfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa)	450
12.2.4.1	Quarz-Bourdon-Vakuummeter	450
12.2.5	Membranvakuummeter	451
12.2.5.1	Membranvakuummeter mit mechanischer Anzeige (Messbereich 0,1 kPa ... 100 kPa)	452
12.2.5.2	Membranvakuummeter mit elektrischem Umformer	453
12.2.5.3	Membranvakuummeter nach dem piezo-resistiven Prinzip ...	454
12.2.5.4	Piezo-elektrische Vakuummeter	455
12.2.5.5	Resonanz-Membranvakuummeter	456
12.2.5.6	Kapazitätsvakuummeter	457
12.2.5.7	Thermische Transpiration	459
12.2.6	Druckschalter und Druckregler	461
12.3	Gasreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge)	463
12.3.1	Messanordnung und Messprinzip	464
12.3.2	Bremung durch Gasreibung	465
12.3.3	Durchführung der Messung	469
12.3.4	Erweiterung des Messbereichs zu höheren Drücken	470
12.3.5	Messunsicherheit	471
12.4	Direkte elektrische Druckmessumformer	472
12.5	Wärmeleitungsvakuummeter	472
12.5.1	Prinzip	472
12.5.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur	476
12.5.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung	479
12.5.4	Thermoelementvakuummeter (Thermocouple)	481

12.5.5	Thermistoren	481
12.5.6	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern	482
12.6	Gasflussmessgeräte	482
12.7	Ionisationsvakuummeter	485
12.7.1	Prinzip und Einteilung	485
12.7.2	Geschichtliche Entwicklung der Ionisationsvakuummeter	485
12.7.3	Ionisationsvakuummeter mit Emissionskathode	488
12.7.3.1	Messprinzip	488
12.7.3.2	Aufbau der Emissionskathoden-Ionisationsvakuummeter	492
12.7.3.3	Konzentrische Triode	492
12.7.3.4	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter	493
12.7.3.5	Ionisationsvakuummeter nach Bayard und Alpert	494
12.7.3.6	Extraktor-Ionisationsvakuummeter	498
12.7.3.7	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	502
12.7.3.8	Betriebshinweise für Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	502
12.7.4	Ionisationsvakuummeter mit gekreuzten elektromagnetischen Feldern	504
12.7.4.1	Penning-Vakuummeter	504
12.7.4.2	Magnetron und invertiertes Magnetron	508
12.7.5	Vergleichende Betrachtung zwischen den beiden Arten von Ionisationsvakuummetern	510
12.7.6	Allgemeine Hinweise	512
12.8	Literatur	516
13	Partialdruckmessgeräte und Leckdetektoren	519
13.1	Einleitung	519
13.2	Partialdruckmessgeräte (Massenspektrometer)	519
13.2.1	Ionenquellen	524
13.2.1.1	Offene Ionenquelle OIS	525
13.2.1.2	Geschlossene Ionenquellen	526
13.2.1.3	Crossbeam-Ionenquelle	527
13.2.2	Heizfaden-Materialien	528
13.2.3	Ionenquellenbedingte Artefakte im Massenspektrum.	529
13.2.4	Massen-Analysatoren	531
13.2.4.1	Quadrupol-Massenanalysator	531
13.2.4.2	Miniaturisierte Quadrupol-Massenspektrometer	535
13.2.4.3	Magnetische Sektorfeld Massenspektrometer	537
13.2.5	Ionendetektoren	540
13.2.5.1	Faraday-Detektor	540
13.2.5.2	Sekundärelektronen-Vervielfacher	541
13.2.5.3	SEV mit diskreten Dynoden	542
13.2.5.4	SEV mit kontinuierlicher Dynode	544
13.2.5.5	Microchannel Plate Detektor	544
13.2.6	Steuersoftware für Massenspektrometer	546
13.2.6.1	Analoger Scan, Ionenstrom in Abhängigkeit von der Masse	546

13.2.6.2	Messung ausgewählter Massenzahlen	546
13.2.6.3	Lecksuch-Modus	547
13.2.7	Weitere Einsatzmöglichkeiten von Massenspektrometern	547
13.3	Partialdruckmessung mit optischen Methoden	548
13.4	Leckdetektoren	550
13.4.1	Grundprinzipien und geschichtliche Entwicklung	550
13.4.2	Heliumleckdetektoren	551
13.4.2.1	Anforderungen und Grundfunktion bei der Vakuumlecksuche	551
13.4.2.2	Heliumsektorfeldmassenspektrometer	552
13.4.2.3	Einlassdruck von Heliumleckdetektoren	553
13.4.2.4	Zeitverhalten von Heliumleckdetektoren	554
13.4.2.5	Arbeitsprinzipien von Heliumleckdetektoren	555
13.4.2.6	Schnüffleinrichtungen für Heliumleckdetektoren	559
13.4.2.7	Anwendungsfelder der massenspektrometrischen Heliumleckdetektoren	560
13.4.3	Kältemittelleckdetektoren	561
13.4.3.1	Aufbau und Funktion	561
13.4.3.2	Anwendungsfelder	562
13.4.4	Prüflecks	562
13.4.4.1	Permeationslecks	562
13.4.4.2	Leitwertlecks	563
13.4.4.3	Praktische Ausführungen von Prüflecks	563
13.4.4.4	Kalibrierung von Prüflecks	564
13.4.5	Messeigenschaften und Kalibrierung von Leckdetektoren	564
13.4.5.1	Leckdetektoren als Prüfmittel im Sinne der DIN/ISO 9001 ..	564
13.4.5.2	Unsicherheit der Kalibrierung	564
13.4.6	Leckdetektoren mit anderen Sensorprinzipien	565
13.4.6.1	Heliumschnüffler mit Quarzglasmembrane	565
13.4.6.2	Halogenleckdetektoren mit Alkali-Ionen-Sensor	566
13.4.6.3	Halogenleckdetektoren mit Infrarot-Sensor	566
13.5	Literatur	567
14	Kalibrierungen und Normen	569
14.1	Einleitung	569
14.2	Kalibrierung von Vakuummessgeräten	571
14.2.1	Primärnormale	571
14.2.1.1	Flüssigkeitsmanometer	573
14.2.1.2	Kompressionsmanometer nach McLeod	575
14.2.1.3	Drehkolbenmanometer und Druckwaagen	578
14.2.1.4	Statisches Expansionsverfahren	580
14.2.1.5	Kontinuierliches Expansionsverfahren	586
14.2.1.6	Sonstige Primärnormale	593
14.2.2	Das Vergleichsmessverfahren	593
14.2.3	Kapazitätsvakuummeter	595
14.2.4	Gasreibungsvakuummeter	598
14.2.5	Ionisationsvakuummeter	601

14.3	Kalibrierungen von Partialdruckmessgeräten	603
14.4	Kalibrierungen von Testlecks	605
14.5	Normen für die Bestimmung von Kenngrößen von Vakuumpumpen	608
14.6	Literatur	611
15	Werkstoffe	614
15.1	Anforderungen und Überblick über die Werkstoffe	614
15.2	Werkstoffe der Vakuumtechnik	615
15.2.1	Metalle	615
15.2.1.1	Die wichtigsten Metalle und Metalllegierungen	616
15.2.2	Technische Gläser	620
15.2.2.1	Allgemeines	620
15.2.2.2	Eigenschaften der wichtigsten Gläser	622
15.2.3	Keramische Werkstoffe	624
15.2.3.1	Allgemeines	624
15.2.3.2	Eigenschaften der wichtigsten keramischen Werkstoffe	625
15.2.3.3	Keramik in der Vakuumtechnik	626
15.2.3.4	Verbindungstechnologien für Keramiken mit Metallen	626
15.2.3.5	Zeolithe	626
15.2.4	Kunststoffe	626
15.2.4.1	Allgemeines	626
15.2.4.2	Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffe	626
15.2.5	Vakuurfette	628
15.2.6	Öle	629
15.2.7	Kühlmittel	629
15.3	Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen	629
15.3.1	Allgemeines	629
15.3.2	Gasdurchlässigkeit	630
15.3.2.1	Gasdurchlässigkeit von Metallen	630
15.3.2.2	Gasdurchlässigkeit von Gläsern und Keramiken	631
15.3.2.3	Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen [4]	632
15.3.3	Gasabgabe	634
15.3.3.1	Allgemeines	634
15.3.3.2	Sättigungsdampfdruck (siehe auch Abschnitt 3.5.1)	634
15.3.3.3	Desorption von der Oberfläche, Gasdiffusion aus dem Materialinnern und Richtwerte für die Gasabgabe [6], [5], [13]	636
15.3.3.4	Diffusion aus dem Inneren	636
15.3.3.5	Richtwerte für die Gesamtgasabgaberate [6, 13]	640
15.4	Literatur	640
16	Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen	641
16.1	Einleitung	641
16.2	Nichtlösbare Verbindungen	641
16.2.1	Schweißverbindungen [2], [3], [4]	642

16.2.1.1	Das WIG-(Wolfram-Inert-Gas-)Schweißen	642
16.2.1.2	Das Mikroplasma-, das Elektronenstrahl-Schweißen und das Reib-Schweißen	643
16.2.2	Lötverbindungen	643
16.2.3	Verschmelzungen [9]	645
16.2.4	Verbindungen mit Metallisierung [9]	647
16.2.5	Verbindungen durch Kleben [10]	647
16.3	Lösbare Verbindungen	648
16.3.1	Dichtungen und Dichtflächen	648
16.3.2	Kraftbedarf	649
16.3.3	Schliffe	649
16.3.4	Flanschverbindungen	650
16.3.4.1	Swagelok- und Swagelok-VCR-Verbindungen	650
16.3.4.2	Kleinflanschbauteile und Dichtungen nach DIN 28403 [11], [12]	652
16.3.4.3	ISO-K Bauteile und Dichtungen nach DIN 28404	652
16.3.4.4	CF-Bauteile und Dichtungen	653
16.3.4.5	COF-Bauteile	654
16.3.4.6	Sonderflansche und Sonderdichtungen	654
16.3.4.7	Vakuumbauteile und -kammern	655
16.3.4.8	Steckverbindungen	656
16.4	Vakuumbehälter	657
16.4.1	Auslegung	657
16.4.1.1	Dimensionierung von Vakuumbehältern und Berechnungsbeispiele	657
16.4.2	Doppelwandige Behälter	660
16.5	Flexible Verbindungselemente	660
16.6	Durchführungen	662
16.6.1	Durchführungen für Bewegung und für mechanische Energie	662
16.6.1.1	Durchführungen für Linearbewegungen	663
16.6.1.2	Durchführungen für Drehbewegungen	663
16.6.1.3	Manipulatoren	664
16.6.2	Stromdurchführungen	665
16.6.2.1	Durchführungen aus Kunststoff	665
16.6.2.2	Durchführungen aus Keramik	666
16.6.3	Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase	667
16.6.3.1	Sichtfenster	668
16.6.4	Schmierungen im Vakuum	670
16.7	Absperrorgane (Ventile)	670
16.7.1	Allgemeines	670
16.7.1.1	Aufbau, Auslegung und Anforderungen	670
16.7.1.2	Einteilung (Benennung)	671
16.7.1.3	Betätigungsarten	671
16.7.1.4	Abdichtung der Ventile und Werkstoffe	672
16.7.2	Eckventile	673
16.7.3	Durchgangsventile	675

16.7.4	Schieberventile	676
16.7.5	Gaseinlassventile	677
16.8	Vakuumgerechte Fertigung und Oberflächenbehandlung	678
16.8.1	Bearbeitungsverfahren	678
16.8.2	Oberflächenbehandlung	678
16.8.3	Reinigung (Vorreinigung und In-situ)	680
16.8.3.1	Reinigung von Edelstählen	680
16.8.3.2	Reinigen von technischen Gläsern	681
16.8.3.3	Reinigen von Keramik	681
16.8.3.4	Vakuumglühen	681
16.8.3.5	Ausheizen	682
16.8.3.6	In-situ-Reinigung durch Glimmentladung und chemisch aktivem Gas	683
16.9	Literatur	683
17	Arbeitsmethoden mit Vakuumsystemen	684
17.1	Elektronische Anbindung von Vakuumsystem	684
17.1.1	Überwachung durch Prozesssensoren und automatisierte Datenauswertung	684
17.1.1.1	Anforderungen und Anwendungen	684
17.1.2	Integrationslösungen	686
17.1.2.1	Integration mit Windows Winsock	687
17.1.2.2	ASCII-Protokolle	687
17.1.2.3	Standardisierte Bussysteme	688
17.1.2.4	Sensor-Integration nach SECS- und HSMS-Standard	688
17.1.3	Prozessdatenanalyse	690
17.2	Allgemeine Hinweise zum End- und Arbeitsdruck	692
17.2.1	Enddruck p_{end} bzw. Betriebsenddruck $p_{\text{B, end}}$ einer Vakuumpumpe ...	693
17.2.2	Enddruck einer Vakuumapparatur oder -anlage $p_{\text{end, A}}$	693
17.2.3	Arbeitsdruck	694
17.2.4	Arbeitsdruck, bedingt durch den Prozessgasstrom	694
17.2.5	Arbeitsdruck, bedingt durch verdampfende Substanzen	695
17.2.6	Arbeitsdruck, bedingt durch Ausgasung (vgl. Kapitel 5 und Abschnitt 15.3)	697
17.2.7	Arbeitsdruck, bedingt durch den Permeationsgasstrom (Abschnitt 15.3.2)	698
17.2.8	Arbeitsdruck, bedingt durch den Leckgasstrom	699
17.3	Arbeitstechnik im Grobvakuum (101 kPa ... 100 Pa)	699
17.3.1	Überblick	699
17.3.2	Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur	700
17.3.3	Pumpen, Art und Saugvermögen	701
17.3.4	Pumpstände für Grobvakuum	702
17.3.5	Druckmessung im Grobvakuum	704
17.3.6	Auspumpzeit im Grobvakuum	704
17.3.7	Belüften	708
17.4	Arbeitstechnik im Feinvakuum	710
17.4.1	Überblick	710

17.4.2	Aufbau einer Feinvakuum-Apparatur	711
17.4.3	Pumpen: Art und Saugvermögen	711
17.4.4	Druckmessung	712
17.4.5	Auspumpzeit und Enddruck	712
17.4.6	Belüften	716
17.4.7	Feinvakuumpumpstände	716
17.5	Arbeitstechnik im Hochvakuum	720
17.5.1	Pumpen: Art und Saugvermögen	720
17.5.2	Behandlung der Vakuummeter (Reinigung)	721
17.5.3	Hochvakuum-pumpstände	721
17.5.3.1	Hochvakuum-pumpstand mit Diffusionspumpe (siehe auch Abschnitt 8.4.6)	722
17.5.3.2	Hochvakuum-pumpstand mit Turbomolekularpumpe	728
17.5.3.3	Der vollautomatische Hochvakuum-pumpstand	731
17.5.4	Auspumpzeit und Belüften	732
17.6	Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum	733
17.6.1	Überblick	733
17.6.2	Aufbau einer UHV-Apparatur	734
17.6.3	UHV-Pumpen: Betriebshinweise	735
17.6.3.1	Adsorptionspumpen	735
17.6.3.2	Ionenzerstäuberpumpen	736
17.6.3.3	Titanverdampferpumpen	737
17.6.3.4	Turbomolekularpumpen	737
17.6.3.5	Kryopumpen	738
17.6.3.6	Volumengetter-(NEG-)Pumpen	738
17.6.4	Druckmessung	738
17.6.5	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik	738
17.6.6	Belüften	739
17.6.7	Ultrahochvakuum-Systeme	739
17.6.8	Ultrahochvakuum-(UHV-)Bauelemente	740
17.6.9	Ultrahochvakuum-(UHV-)Pumpstände	740
17.6.9.1	Ultrahochvakuum-(UHV-)Großanlagen	743
17.7	Literatur	745
18	Lecksuchtechniken	746
18.1	Überblick	746
18.1.1	Vakuumlecksuche	746
18.1.2	Überdrucklecksuche	747
18.1.3	Prüfgasverteilung vor einem Leck in der Atmosphäre	747
18.1.4	Messergebnisse mit der Schnüffelmethode	748
18.1.5	Prüfgase	749
18.1.5.1	Helium	750
18.1.5.2	Andere Edelgase als Helium	750
18.1.5.3	Wasserstoff H ₂	750
18.1.5.4	Methan CH ₄	750
18.1.5.5	Kohlendioxid CO ₂	750
18.1.5.6	Schwefelhexafluorid SF ₆	750

18.2	Eigenschaften von Lecks	751
18.2.1	Leckrate, Einheiten	751
18.2.2	Leckarten	752
18.2.2.1	Eigenschaften von Porenlecks	752
18.2.2.2	Permeationslecks	754
18.2.2.3	Virtuelle Lecks in Vakuumkammern	755
18.2.2.4	Flüssigkeitslecks	755
18.3	Überblick über die Lecksuchverfahren (siehe auch DIN EN 1779)	756
18.3.1	Allgemeine Hinweise zur Dichtheitsprüfung	756
18.3.2	Verfahren ohne Prüfgas (Druckprüfungen)	758
18.3.2.1	Allgemeines	758
18.3.2.2	Druckabfallmessung	758
18.3.2.3	Druckanstiegsmessung	758
18.3.2.4	Sonstige Verfahren	760
18.3.3	Prüfgasverfahren ohne Helium	760
18.3.3.1	Allgemeines	760
18.3.3.2	Vakuumlecksuche mit Prüfgasen außer Helium	761
18.3.3.3	Überdrucklecksuche mit Prüfgasen außer Helium	762
18.4	Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektoren	763
18.4.1	Eigenschaften des Heliumleckdetektors	763
18.4.2	Prüfung von Komponenten	763
18.4.2.1	Prüfablauf, integrale Prüfung	764
18.4.2.2	Vorgehen zur Lecklokalisierung	765
18.4.3	Prüfung von Vakuumanlagen	767
18.4.3.1	Allgemeines zum Teilstromverfahren	767
18.4.3.2	Anschlusspunkte des Lecksuchers an der Anlage	768
18.4.3.3	Nachweisempfindlichkeit und Ansprechzeit	771
18.4.4	Überdruck-(Schnüffel-)Lecksuche mit dem Heliumleckdetektor	773
18.4.4.1	Integrales Verfahren (total oder partiell)	773
18.4.4.2	Lecklokalisierung mit dem Schnüffler	774
18.5	Lecksuchverfahren mit anderen Prüfgasen	774
18.5.1	Allgemeines	774
18.5.2	Schnüffellecksuche an Kälte-/Klimaanlagen	774
18.6	Industrielle Dichtheitsprüfung von Bauteilen in der Serienfertigung	775
18.6.1	Allgemeines	775
18.6.2	Industrielle Prüfung von Serienbauteilen	775
18.6.2.1	Hüllenverfahren für Vakuumkomponenten (Methode A1 in DIN EN 1779)	776
18.6.2.2	Vakuumkammerverfahren für Überdruckbauteile (Methode B6 in DIN EN 1779)	776
18.6.3	Prüfung von hermetisch verschlossenen Komponenten durch Drucklagerung („Bombing“, Methode B5 in DIN EN 1779)	778
18.6.4	Prüfung von Lebensmittelverpackungen in der Folienprüfkammer	779
18.7	Literatur	780

19 Anhang	781
19.A Tabellen	781
19.B Diagramme	810
19.C Erläuterung einiger häufiger verwendeter Abkürzungen	826
19.D Größen und Einheiten	827
19.E Glossar	829
 Sachwortregister	 835
 Bezugsquellenverzeichnis	 850