

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 10. Auflage	V
Vorwort zur 9. Auflage	VI
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
3.4.2 Eigenschaften der Gasteilchen und Verhalten des Gases	59
3.5 Dämpfe	64
3.5.1 Sättigungsdampfdruck	64
3.5.2 Verdampfungsrate	68
3.6 Literatur	70
4 Strömung von Gasen	71
4.1 Strömungsarten, Begriffsdefinitionen	71
4.1.1 Charakterisierung von Strömungen, Knudsenzahl, Reynoldszahl	71
4.1.2 Gasstrom, Saugleistung, Saugvermögen	74
4.1.3 Strömungswiderstand, Strömungsleitwert	78
4.1.4 Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe	79

4.2	Reibungsfreie viskose Strömung, Gasdynamik	80
4.2.1	Erhaltungssätze	80
4.2.2	Allmähliche Querschnittsänderung: isentrope Zustandsänderung	82
4.2.3	Kritische Strömung	85
4.2.4	Verblockung bei kleinem Auslassdruck	87
4.2.5	Kontraktion bei Einströmung in Blende und Rohr	88
4.2.6	Beispiele zur Düsenströmung	89
4.2.7	Gerader und schräger Verdichtungsstoß	92
4.2.8	Lavaldüse, Ausströmung bei Gegendruck	95
4.2.9	Strömung um eine Ecke (Prandtl-Meyer)	97
4.3	Reibungsbehaftete viskose Leitungsströmung	100
4.3.1	Laminare und turbulente Strömung durch eine Leitung	100
4.3.2	Leitungsströmung von Luft	103
4.3.3	Lufteinströmung in einen Kessel, Beispiele	106
4.3.4	Rohr in der Ansaugleitung einer Pumpe, Beispiele	109
4.3.5	Strömung durch Leitungen mit nicht-kreisförmigem Querschnitt	112
4.3.6	Gasartabhängigkeit der Strömung	114
4.4	Molekulare Strömung im Hoch- und Ultrahochvakuum	115
4.4.1	Strömungsform, Begriffe, Durchlaufwahrscheinlichkeit	115
4.4.2	Molekulare Strömung durch Blende	119
4.4.3	Molekulare Strömung durch Leitung gleichbleibenden Querschnitts	120
4.4.4	Molekulare Strömung durch Kreisrohr	122
4.4.5	Molekulare Strömung durch Leitungen einfachen Querschnitts	124
4.4.6	Rohrbogen und Rohrknie	127
4.4.7	Hintereinanderschaltung von Rohr und Blende	128
4.4.8	Hintereinanderschaltung von Bauelementen	129
4.4.9	Molekularströmung durch konisches Kreisrohr (Trichter)	131
4.4.10	Bauelement in der Ansaugleitung einer Pumpe	132
4.5	Strömung im gesamten Druckbereich	134
4.5.1	Kennzeichnung der Strömung	134
4.5.2	Strömung durch dünne Kreisblende	134
4.5.3	Strömung durch langes Kreisrohr	136
4.6	Strömung bei Temperaturdifferenz, thermische Effusion, Transpiration	141
4.7	Messung von Strömungsleitwerten	144
4.7.1	Notwendigkeit der Messung	144
4.7.2	Messung des charakteristischen Leitwerts (Eigenleitwert)	144
4.7.3	Berechnung des reduzierten Leitwerts (Einbauleitwert)	146
4.7.4	Messung des reduzierten Leitwerts	146
4.8	Literatur	148
5	Analytische und numerische Berechnungen von stationären Flüssen	
	verdünnter Gase	149
5.1	Grundkonzept	149
5.1.1	Die Parameter Knudsenzahl und Gasverdünnung	149
5.1.2	Makroskopische Größen	149
5.1.3	Funktion der Geschwindigkeitsverteilung	150
5.1.4	Globales Gleichgewicht	151

5.1.5	Lokales Gleichgewicht	152
5.1.6	Kinetische Boltzmann-Gleichung	152
5.1.7	Transportkoeffizienten	154
5.1.8	Modellgleichungen	156
5.1.9	Wechselwirkung zwischen Gas und Oberfläche	157
5.2	Berechnungsmethoden von Gasströmen	159
5.2.1	Allgemeine Bemerkungen	159
5.2.2	Die deterministische Methode	159
5.2.3	Wahrscheinlichkeitsmethoden	160
5.3	Geschwindigkeitsschlupf und Temperatursprung	162
5.3.1	Viskoser Schlupfkoeffizient	163
5.3.2	Der Koeffizient des thermischen Schlupfs	164
5.3.3	Der Koeffizient für den Temperatursprung	165
5.4	Impuls- und Wärmetransport durch verdünnte Gase	166
5.4.1	Ebene Couette-Strömung	166
5.4.2	Zylindrische Couette-Strömung	169
5.4.3	Wärmetransport zwischen zwei Platten	173
5.4.4	Wärmestrom zwischen zwei coaxialen Zylindern	175
5.5	Gasströme durch lange Rohre	178
5.5.1	Begriffe	178
5.5.2	Molekularer Strömungsbereich	180
5.5.3	Schlupfströmung	181
5.5.4	Strömung im Übergangsbereich	182
5.5.5	Strömung bei beliebigen Druck- und Temperaturdifferenzen	187
5.5.6	Variable Querschnitte	191
5.5.7	Thermomolekulares Druckverhältnis	193
5.6	Durchfluss durch Blenden	195
5.7	Modellierung einer Holweckpumpe	197
5.8	Literatur	200
6	Sorption und Diffusion	202
6.1	Sorptionsphänomene und deren Bedeutung – Begriffe und Terminologie	202
6.2	Adsorptions- und Desorptionskinetik	207
6.2.1	Adsorptionsrate	207
6.2.2	Desorptionsrate	208
6.2.3	Hobsons Modell einer Auspumpkurve	209
6.2.4	Mono-Schicht-Adsorptionsisothermen	212
6.2.5	Mehrschicht-Adsorption und Brunauer-Emmett-Teller- (BET)-Isotherme	215
6.2.6	Mono-Zeit	216
6.3	Absorption, Diffusion und Ausgasung	217
6.4	Permeation	222
6.5	Literatur	225
7	Verdrängerpumpen	226
7.1	Einleitung und Übersicht	226
7.2	Oszillationsverdrängerpumpen	228

7.2.1	Kolbenpumpen	228
7.2.2	Membranpumpen	230
7.2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	230
7.2.2.2	Saugvermögen und Enddruck	231
7.2.2.3	Gasballast	233
7.2.2.4	Antriebskonzepte	233
7.2.2.5	Enddruck	234
7.2.2.6	Gasartabhängigkeit des Saugvermögens und des Enddrucks	235
7.2.2.7	Drehzahlabhängigkeit des Enddrucks	235
7.2.2.8	Konstruktionsprinzipien	236
7.2.2.9	Anwendung von Membranpumpen im Chemielabor	238
7.2.2.10	Membranpumpen als Vorpumpen für Turbomolekularpumpen	238
7.2.2.11	Membranpumpen in Kombination mit anderen Vakuumpumpen	241
7.3	Einwellige Rotationsverdrängerpumpen	242
7.3.1	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	242
7.3.1.1	Aufbau und Funktionsweise	243
7.3.1.2	Betriebseigenschaften und Auslegung	244
7.3.1.3	Bauarten	247
7.3.1.4	Pumpstände mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	250
7.3.1.5	Hinweise für den wirtschaftlichen Betrieb	251
7.3.2	Drehschieberpumpen	254
7.3.2.1	Wirkungsweise und Aufbau	254
7.3.2.2	Trocken laufende Drehschieberpumpen	255
7.3.2.3	Ölgeschmierte Drehschieberpumpen	256
7.3.2.4	Frischöl geschmierte Drehschieberpumpe	258
7.3.2.5	Betriebsverhalten und Hinweise	259
7.3.2.6	Kennlinien, Kenndaten	261
7.3.3	Sperrschieberpumpen	262
7.3.3.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	262
7.3.3.2	Vergleich zwischen Dreh- und Sperrschieberpumpen	266
7.3.4	Trochoidenpumpen	266
7.3.5	Scroll-Pumpen	268
7.3.5.1	Das Verdichtungsprinzip	268
7.3.5.2	Aufbau	269
7.3.5.3	Anwendungen und Vorteile	270
7.4	Zweiwellige Rotationsverdrängerpumpen	270
7.4.1	Schraubenpumpen	270
7.4.1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	271
7.4.1.2	Wärmeverhalten und technische Hinweise	277
7.4.2	Drehzahnpumpen	279
7.4.2.1	Verdichtungsprinzip	279
7.4.2.2	Vergleich mit Wälzkolbenpumpen	282
7.4.2.3	Mehrstufige Drehzahnpumpen und Pumpkombinationen	284
7.4.2.4	Drehzahlregelung	284
7.4.2.5	Anwendungsgebiete	285

7.4.3	Wälzkolbenpumpen (Roots-Pumpen)	285
7.4.3.1	Wirkungsweise	285
7.4.3.2	Technischer Aufbau	286
7.4.3.3	Theoretische Grundlagen	288
7.4.3.4	Der effektive Gasstrom	288
7.4.3.5	Kompressionsverhältnis K_0 bei Nulldurchsatz	289
7.4.3.6	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad [51]	290
7.4.3.7	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/Wälzkolbenpumpe	291
7.4.3.8	Saugvermögen und Enddruck	295
7.4.3.9	Installation und Betriebshinweise	297
7.5	Spezifische Eigenschaften ölgedichteter Verdrängerpumpen	298
7.5.1	Saugvermögen und erreichbarer Enddruck	298
7.5.1.1	Saugvermögen und Endpartialdruck	298
7.5.1.2	Enddruck und Ölauswahl	299
7.5.2	Ölrückströmung	301
7.6	Grundlagen Verdrängerpumpen	303
7.6.1	Abpumpen von Dämpfen – Gasballast	303
7.6.2	Leistungsbedarf	307
7.6.2.1	Isotherme Kompression	308
7.6.2.2	Adiabatische Kompression	308
7.6.2.3	Polytrope Kompression	309
7.6.2.4	Kompressionsleistung	309
7.7	Betriebs- und Sicherheitshinweise	311
7.7.1	Aufstellung	311
7.7.2	An- und Abstellen, Saugstutzenventile	311
7.7.3	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise	312
7.7.4	Sicherheitstechnische Hinweise	313
7.8	Spezifisches Zubehör für Verdrängerpumpen	315
7.8.1	Sorptionsfallen	315
7.8.2	Sicherheitsventile	316
7.8.3	Ölfilter und Ölreinigung	317
7.8.4	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider)	318
7.8.5	Staubfilter	319
7.9	Literatur	320
8	Kondensatoren	324
8.1	Kondensationsvorgänge im Vakuum	324
8.1.1	Grundlagen	324
8.1.2	Kondensation reiner Dämpfe	326
8.1.3	Kondensation von Gas-Dampf-Gemischen	328
8.1.4	Kühlmittel	331
8.2	Bauarten von Kondensatoren	332
8.2.1	Oberflächenkondensatoren für Flüssigkeitskondensation	332
8.2.2	Mischkondensatoren	335

8.2.3	Kondensataustrag	336
8.2.4	Oberflächenkondensatoren für Feststoffkondensation	337
8.3	Integration von Kondensatoren in Vakuumsysteme	338
8.3.1	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen	338
8.3.2	Regelung	341
8.4	Berechnungsbeispiele	341
8.5	Literatur	343
9	Treibmittelpumpen	344
9.1	Einleitung, Übersicht	344
9.2	Flüssigkeitsstrahlpumpen	345
9.3	Dampfstrahl-Vakuumpumpen	347
9.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	348
9.3.2	Leistungsdaten, Betriebsverhalten und Regelung	349
9.3.3	Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen	353
9.3.4	Organische Dämpfe als Treibmedium	355
9.4	Diffusionspumpen	356
9.4.1	Aufbau und Arbeitsweise	356
9.4.2	Treibmittel	360
9.4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen	361
9.4.4	Fraktionieren, Entgasen	362
9.4.5	Betriebshinweise	364
9.4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen	364
9.4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahlpumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells	367
9.5	Vergleich Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen	374
9.6	Literatur	377
10	Molekular- und Turbomolekularpumpen	378
10.1	Einleitung	378
10.2	Molekularpumpen	380
10.2.1	Gaedepumpstufe	380
10.2.2	Holweckstufe	384
10.2.3	Siegbahnstufe	384
10.3	Physikalische Grundlagen der Turbomolekularpumpstufen	385
10.3.1	Pumpmechanismus	385
10.3.2	Saugvermögen und Kompressionsverhältnis	386
10.3.3	Statistische und Gaedesche Betrachtung des Pumpeffekts	387
10.3.4	Wärmehaushalt	390
10.4	Turbomolekularpumpen	393
10.4.1	Aufbau	393
10.4.2	Wirkungsweise	394
10.4.3	Rotormaterialien und mechanische Anforderungen	395
10.4.4	Heizung und Kühlung	396
10.4.5	Sonderausführungen	396
10.4.6	Sicherheitsanforderungen	398
10.4.7	Lagerung von Turbomolekularpumpenrotoren	399

10.4.7.1	Welle mit zwei Kugellagern	399
10.4.7.2	Welle mit Permanentmagnetlager und Kugellager	400
10.4.7.3	Magnetlagerung	400
10.4.8	Antriebe und Bedienung	402
10.4.9	Leistungsdaten	403
10.4.9.1	Saugvermögen	403
10.4.9.2	Kompressionsverhältnis, Enddruck und Basisdruck	404
10.4.9.3	Auspumpzeiten von Behältern	405
10.4.9.4	Pumpen hoher Gaslasten	406
10.4.10	Betrieb und Wartung	408
10.4.10.1	Wahl der Vorpumpe	408
10.4.10.2	Allgemeine Hinweise	408
10.4.10.3	Einschalten	408
10.4.10.4	Erreichen des Basisdruckes	408
10.4.10.5	Betrieb in Magnetfeldern	409
10.4.10.6	Belüften	409
10.4.10.7	Wartung	409
10.4.11	Anwendungen	410
10.5	Literatur	413
11	Sorptionspumpen	414
11.1	Einleitung	414
11.2	Adsorptionspumpen	415
11.2.1	Wirkungsweise	415
11.2.2	Aufbau	417
11.2.3	Endvakuum und Saugvermögen	418
11.2.3.1	Enddruck mit einer Adsorptionspumpe	418
11.2.3.2	Enddruck mit zwei oder mehr Adsorptionspumpen	420
11.2.4	Verbesserung des Endvakuums durch Vorevakuieren oder Füllen mit einem Fremdgas	421
11.3	Getter	422
11.3.1	Wirkungsweise und Getterarten	422
11.3.2	NEG-Pumpen	424
11.3.2.1	Grundlagen der Volumengetter/NEG	424
11.3.2.2	Aufbau von NEG-Pumpen	427
11.3.2.3	Saugvermögen und Getterkapazität	429
11.3.2.4	Anwendung von NEG-Pumpen	430
11.3.2.5	Sicherheits- und Betriebshinweise	431
11.3.3	Verdampferpumpen	432
11.3.3.1	Materialien der Verdampfer	432
11.3.3.2	Saugvermögen	433
11.3.3.3	Getterkapazität	435
11.3.3.4	Aufbau der Verdampfergetterpumpen	436
11.4	Ionenzerstäuberpumpen	441
11.4.1	Wirkungsweise	441
11.4.2	Technischer Aufbau (Diodentyp)	444
11.4.3	Saugvermögen	445

11.4.4	Die differentielle Diodenpumpe	448
11.4.5	Die Triodenpumpe	448
11.4.6	Lineare Zerstäuberpumpen (Distributed ion pump)	451
11.4.7	Restgasspektrum	451
11.4.8	Arbeitstechnik	452
11.5	Die Orbitronpumpe	453
11.6	Literatur	454
12	Kryotechnik und Kryopumpen	456
12.1	Einleitung	456
12.2	Kühlverfahren	457
12.2.1	Begriffe und Hauptsätze der Thermodynamik	457
12.2.2	Spezielle Kühlprozesse	459
12.2.2.1	Joule-Thomson-Entspannung; Linde-Verfahren	459
12.2.2.2	Expansionsmaschinen	462
12.2.2.3	Claude-Verfahren	463
12.2.2.4	Stirling-Verfahren	463
12.2.2.5	Gifford-McMahon-Verfahren	464
12.2.2.6	Allgemeine Kriterien für Kälteanlagen	465
12.2.2.7	Messung tiefer Temperaturen	467
12.3	Kryostatentechnik	468
12.3.1	Kryostate	468
12.3.2	Vakuumisolierte Leitungen [17]	471
12.3.3	Nachfüllvorrichtungen	472
12.3.4	Kältemittelverluste	476
12.4	Kryopumpen	480
12.4.1	Die Bindung von Gasen an Kaltflächen	480
12.4.1.1	Gaskondensation	481
12.4.1.2	Kryotrapping und Kryosorption	481
12.4.2	Kenngrößen einer Kryopumpe	484
12.4.2.1	Startdruck p_{St}	484
12.4.2.2	Enddruck p_{end}	485
12.4.2.3	Saugvermögen	486
12.4.2.4	Standzeit \bar{t}_B	487
12.4.2.5	Kapazität (maximale Gasaufnahme)	488
12.4.2.6	Wärmeübertragung auf die Kaltfläche	488
12.4.2.7	Wärmeleitfähigkeit der Kondensate	489
12.4.2.8	Wachstumsgeschwindigkeit der Kondensatschicht	490
12.4.2.9	„Cross-over“-Wert	491
12.4.2.10	Maximal zulässiger pV -Durchfluß	491
12.4.3	Konstruktionsprinzipien	492
12.4.3.1	Bad-Kryopumpen	492
12.4.3.2	Verdampfer-Kryopumpen	492
12.4.3.3	Kryopumpen mit Kältemaschine (Refrigerator-Kryopumpen)	495
12.4.3.4	Anwendungsbeispiele	498
12.4.3.5	Kryopumpen in der Kernfusionstechnik	498

12.4.3.6	Kryopumpen in der Raumfahrttechnik	499
12.4.3.7	Kryopumpen in Teilchenbeschleunigern	500
12.4.3.8	Kryopumpen in industriellen Anlagen	500
12.4.3.9	Kryopumpen für UHV-Anlagen	500
12.4.4	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe	502
12.5	Literatur	503
13	Vakuummessgeräte für Totaldruck	505
13.1	Einleitung	505
13.2	Mechanische Vakuummeter	506
13.2.1	Prinzip und Einteilung	506
13.2.2	Plattenfedervakuummeter	507
13.2.3	Kapselfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa)	508
13.2.4	Röhrenfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa ... 100 kPa)	509
13.2.4.1	Quarz-Bourdon-Vakuummeter	509
13.2.5	Membranvakuummeter	510
13.2.5.1	Membranvakuummeter mit mechanischer Anzeige (Messbereich 0,1 kPa ... 100 kPa)	511
13.2.5.2	Membranvakuummeter mit elektrischem Umformer	512
13.2.5.3	Membranvakuummeter nach dem piezo-resistiven Prinzip ...	513
13.2.5.4	Piezo-elektrische Vakuummeter	514
13.2.5.5	Resonanz-Membranvakuummeter	515
13.2.5.6	Kapazitätsvakuummeter	516
13.2.5.7	Thermische Transpiration	518
13.2.6	Druckschalter und Druckregler	520
13.3	Gasreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge)	521
13.3.1	Messanordnung und Messprinzip	523
13.3.2	Bremmung durch Gasreibung	524
13.3.3	Durchführung der Messung	528
13.3.4	Erweiterung des Messbereichs zu höheren Drücken	529
13.3.5	Messunsicherheit	530
13.4	Direkte elektrische Druckmessumformer	531
13.5	Wärmeleitungsvakuummeter	531
13.5.1	Prinzip	531
13.5.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur	535
13.5.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung	538
13.5.4	Thermoelementvakuummeter (Thermocouple)	540
13.5.5	Thermistoren	540
13.5.6	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern	541
13.6	Gasflussmessgeräte	542
13.7	Ionisationsvakuummeter	544
13.7.1	Prinzip und Einteilung	544
13.7.2	Geschichtliche Entwicklung der Ionisationsvakuummeter	545
13.7.3	Ionisationsvakuummeter mit Emissionskathode	547
13.7.3.1	Messprinzip	547
13.7.3.2	Aufbau der Emissionskathoden-Ionisationsvakuummeter	551

13.7.3.3	Konzentrische Triode	551
13.7.3.4	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter	552
13.7.3.5	Ionisationsvakuummeter nach Bayard und Alpert	553
13.7.3.6	Extraktor-Ionisationsvakuummeter	557
13.7.3.7	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	560
13.7.3.8	Betriebshinweise für Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	561
13.7.4	Ionisationsvakuummeter mit gekreuzten elektromagnetischen Feldern	562
13.7.4.1	Penning-Vakuummeter	562
13.7.4.2	Magnetron und invertiertes Magnetron	567
13.7.5	Vergleichende Betrachtung zwischen den beiden Arten von Ionisationsvakuummetern	568
13.7.6	Allgemeine Hinweise	570
13.8	Kombinationsmessgeräte	574
13.9	Literatur.....	574
14	Partialdruckmessgeräte und Leckdetektoren	577
14.1	Einleitung	577
14.2	Partialdruckmessgeräte (Massenspektrometer)	577
14.2.1	Ionenquellen	582
14.2.1.1	Offene Ionenquelle OIS	583
14.2.1.2	Geschlossene Ionenquellen	584
14.2.1.3	Crossbeam-Ionenquelle	585
14.2.2	Heizfaden-Materialien	586
14.2.3	Ionenquellenbedingte Artefakte im Massenspektrum.	587
14.2.4	Massen-Analysatoren	589
14.2.4.1	Quadrupol-Massenanalysator	589
14.2.4.2	Miniaturisierte Quadrupol-Massenspektrometer	593
14.2.4.3	Magnetische Sektorfeld Massenspektrometer	595
14.2.5	Ionendetektoren	598
14.2.5.1	Faraday-Detektor	598
14.2.5.2	Sekundärelektronen-Vervielfacher	599
14.2.5.3	SEV mit diskreten Dynoden	600
14.2.5.4	SEV mit kontinuierlicher Dynode	602
14.2.5.5	Microchannel Plate Detektor	602
14.2.6	Steuersoftware für Massenspektrometer	604
14.2.6.1	Analoger Scan, Ionenstrom in Abhängigkeit von der Masse	604
14.2.6.2	Messung ausgewählter Massenzahlen	604
14.2.6.3	Lecksuch-Modus	605
14.2.7	Weitere Einsatzmöglichkeiten von Massenspektrometern	605
14.3	Partialdruckmessung mit optischen Methoden	606
14.4	Leckdetektoren	608
14.4.1	Grundprinzipien und geschichtliche Entwicklung	608

14.4.2	Heliumleckdetektoren	609
14.4.2.1	Anforderungen und Grundfunktion bei der Vakuumlecksuche	609
14.4.2.2	Heliumsektorfeldmassenspektrometer	610
14.4.2.3	Einlassdruck von Heliumleckdetektoren	611
14.4.2.4	Zeitverhalten von Heliumleckdetektoren	612
14.4.2.5	Arbeitsprinzipien von Heliumleckdetektoren	613
14.4.2.6	Schnüffleinrichtungen für Heliumleckdetektoren	617
14.4.2.7	Anwendungsfelder der massenspektrometrischen Heliumleckdetektoren	618
14.4.3	Kältemittelleckdetektoren	619
14.4.3.1	Aufbau und Funktion	619
14.4.3.2	Anwendungsfelder	620
14.4.4	Prüflecks	620
14.4.4.1	Permeationslecks	620
14.4.4.2	Leitwertlecks	621
14.4.4.3	Praktische Ausführungen von Prüflecks	621
14.4.4.4	Kalibrierung von Prüflecks	622
14.4.5	Messeigenschaften und Kalibrierung von Leckdetektoren	622
14.4.5.1	Leckdetektoren als Prüfmittel im Sinne der DIN/ISO 9001 ..	622
14.4.5.2	Unsicherheit der Kalibrierung	622
14.4.6	Leckdetektoren mit anderen Sensorprinzipien	623
14.4.6.1	Heliumschnüffler mit Quarzglasmembrane	623
14.4.6.2	Halogenleckdetektoren mit Alkali-Ionen-Sensor	624
14.4.6.3	Halogenleckdetektoren mit Infrarot-Sensor	624
14.5	Literatur	625
15	Kalibrierungen und Normen	627
15.1	Einleitung	627
15.2	Kalibrierung von Vakuummessgeräten	630
15.2.1	Primärnormale	630
15.2.1.1	Flüssigkeitsmanometer	631
15.2.1.2	Kompressionsmanometer nach McLeod	634
15.2.1.3	Drehkolbenmanometer und Druckwaagen	636
15.2.1.4	Statisches Expansionsverfahren	638
15.2.1.5	Kontinuierliches Expansionsverfahren	644
15.2.1.6	Sonstige Primärnormale	651
15.2.2	Das Vergleichsmessverfahren	651
15.2.3	Kapazitätsvakuummeter	653
15.2.4	Gasreibungsvakuummeter	656
15.2.5	Ionisationsvakuummeter	659
15.3	Kalibrierungen von Partialdruckmessgeräten	661
15.4	Kalibrierungen von Testlecks	663
15.5	Normen für die Bestimmung von Kenngrößen von Vakuumpumpen	666
15.6	Literatur	669

16 Werkstoffe	672
16.1 Anforderungen und Überblick über die Werkstoffe	672
16.2 Werkstoffe der Vakuumtechnik	673
16.2.1 Metalle	673
16.2.1.1 Die wichtigsten Metalle und Metalllegierungen	674
16.2.2 Technische Gläser	678
16.2.2.1 Allgemeines	678
16.2.2.2 Eigenschaften der wichtigsten Gläser	680
16.2.3 Keramische Werkstoffe	682
16.2.3.1 Allgemeines	682
16.2.3.2 Eigenschaften der wichtigsten keramischen Werkstoffe	683
16.2.3.3 Keramik in der Vakuumtechnik	684
16.2.3.4 Verbindungstechnologien für Keramiken mit Metallen	684
16.2.3.5 Zeolithe	684
16.2.4 Kunststoffe	684
16.2.4.1 Allgemeines	684
16.2.4.2 Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffe	684
16.2.5 Vakuumfette	686
16.2.6 Öle	687
16.2.7 Kühlmittel	687
16.3 Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen	687
16.3.1 Allgemeines	687
16.3.2 Gasdurchlässigkeit	688
16.3.2.1 Gasdurchlässigkeit von Metallen	688
16.3.2.2 Gasdurchlässigkeit von Gläsern und Keramiken	689
16.3.2.3 Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen [4]	690
16.3.3 Gasabgabe	692
16.3.3.1 Allgemeines	692
16.3.3.2 Sättigungsdampfdruck (siehe auch Abschnitt 3.5.1)	692
16.3.3.3 Desorption von der Oberfläche, Gasdiffusion aus dem Materialinnern und Richtwerte für die Gasabgabe [6], [5], [13]	694
16.3.3.4 Diffusion aus dem Inneren	694
16.3.3.5 Richtwerte für die Gesamtgasabgaberate [6, 13]	698
16.4 Literatur	698
17 Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen	699
17.1 Einleitung	699
17.2 Nichtlösbare Verbindungen	699
17.2.1 Schweißverbindungen [2], [3], [4]	700
17.2.1.1 Das WIG-(Wolfram-Inert-Gas-)Schweißen	700
17.2.1.2 Das Mikroplasma-, das Elektronenstrahl-Schweißen und das Reib-Schweißen	700
17.2.2 Lötverbindungen	701
17.2.3 Verschmelzungen [9]	703
17.2.4 Verbindungen mit Metallisierung [9]	705
17.2.5 Verbindungen durch Kleben [10]	705

17.3	Lösbare Verbindungen	706
17.3.1	Dichtungen und Dichtflächen	706
17.3.2	Kraftbedarf	707
17.3.3	Schlifflöcher	707
17.3.4	Flanschverbindungen	708
17.3.4.1	Swagelok- und Swagelok-VCR-Verbindungen	708
17.3.4.2	Kleinflanschbauteile und Dichtungen nach DIN 28403 [11], [12]	710
17.3.4.3	ISO-K Bauteile und Dichtungen nach DIN 28404	710
17.3.4.4	CF-Bauteile und Dichtungen	711
17.3.4.5	COF-Bauteile	712
17.3.4.6	Sonderflansche und Sonderdichtungen	712
17.3.4.7	Vakuumbauteile und -kammern	713
17.3.4.8	Steckverbindungen	714
17.4	Vakuumbehälter	715
17.4.1	Auslegung	715
17.4.1.1	Dimensionierung von Vakuumbehältern und Berechnungsbeispiele	715
17.4.2	Doppelwandige Behälter	718
17.5	Flexible Verbindungselemente	718
17.6	Durchführungen	720
17.6.1	Durchführungen für Bewegung und für mechanische Energie	720
17.6.1.1	Durchführungen für Linearbewegungen	721
17.6.1.2	Durchführungen für Drehbewegungen	721
17.6.1.3	Manipulatoren	722
17.6.2	Stromdurchführungen	723
17.6.2.1	Durchführungen aus Kunststoff	723
17.6.2.2	Durchführungen aus Keramik	724
17.6.3	Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase	725
17.6.3.1	Sichtfenster	726
17.6.4	Schmiermittel im Vakuum	728
17.7	Absperrorgane (Ventile)	728
17.7.1	Allgemeines	728
17.7.1.1	Aufbau, Auslegung und Anforderungen	728
17.7.1.2	Einteilung (Benennung)	729
17.7.1.3	Betätigungsarten	729
17.7.1.4	Abdichtung der Ventile und Werkstoffe	730
17.7.2	Eckventile	731
17.7.3	Durchgangsventile	732
17.7.4	Schieberventile	734
17.7.5	Gaseinlassventile	735
17.8	Vakuumbereitete Fertigung und Oberflächenbehandlung	736
17.8.1	Bearbeitungsverfahren	736
17.8.2	Oberflächenbehandlung	736
17.8.3	Reinigung (Vorreinigung und In-situ)	738
17.8.3.1	Reinigung von Edelstählen	738
17.8.3.2	Reinigen von technischen Gläsern	739

17.8.3.3	Reinigen von Keramik	739
17.8.3.4	Vakuumglühen	739
17.8.3.5	Ausheizen	740
17.8.3.6	In-situ-Reinigung durch Glimmentladung und chemisch aktivem Gas	741
17.9	Literatur	741
18	Arbeitsmethoden mit Vakuumsystemen	742
18.1	Elektronische Anbindung von Vakuumsystem	742
18.1.1	Überwachung durch Prozesssensoren und automatisierte Datenauswertung	742
18.1.1.1	Anforderungen und Anwendungen	742
18.1.2	Integrationslösungen	744
18.1.2.1	Integration mit Windows Winsock	745
18.1.2.2	ASCII-Protokolle	745
18.1.2.3	Standardisierte Bussysteme	746
18.1.2.4	Sensor-Integration nach SECS- und HSMS-Standard	746
18.1.3	Prozessdatenanalyse	748
18.2	Allgemeine Hinweise zum End- und Arbeitsdruck	750
18.2.1	Enddruck p_{end} bzw. Betriebsenddruck $p_{\text{B, end}}$ einer Vakuumpumpe ...	751
18.2.2	Enddruck einer Vakuumanlage oder -anlage $p_{\text{end, A}}$	751
18.2.3	Arbeitsdruck	752
18.2.4	Arbeitsdruck, bedingt durch den Prozessgasstrom	752
18.2.5	Arbeitsdruck, bedingt durch verdampfende Substanzen	753
18.2.6	Arbeitsdruck, bedingt durch Ausgasung (vgl. Kapitel 5 und Abschnitt 15.3)	755
18.2.7	Arbeitsdruck, bedingt durch den Permeationsgasstrom (Abschnitt 15.3.2)	756
18.2.8	Arbeitsdruck, bedingt durch den Leckgasstrom	757
18.3	Arbeitstechnik im Grobvakuum (101 kPa ... 100 Pa)	757
18.3.1	Überblick	757
18.3.2	Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur	758
18.3.3	Pumpen, Art und Saugvermögen	759
18.3.4	Pumpstände für Grobvakuum	760
18.3.5	Druckmessung im Grobvakuum	762
18.3.6	Auspumpzeit im Grobvakuum	762
18.3.7	Belüften	766
18.4	Arbeitstechnik im Feinvakuum	768
18.4.1	Überblick	768
18.4.2	Aufbau einer Feinvakuum-Apparatur	769
18.4.3	Pumpen: Art und Saugvermögen	769
18.4.4	Druckmessung	770
18.4.5	Auspumpzeit und Enddruck	770
18.4.6	Belüften	774
18.4.7	Feinvakuumpumpstände	774
18.5	Arbeitstechnik im Hochvakuum	778
18.5.1	Pumpen: Art und Saugvermögen	778

18.5.2	Behandlung der Vakuummeter (Reinigung)	779
18.5.3	Hochvakuumumpumpstände	779
18.5.3.1	Hochvakuumumpumpstand mit Diffusionspumpe (siehe auch Abschnitt 8.4.6)	780
18.5.3.2	Hochvakuumumpumpstand mit Turbomolekularpumpe	786
18.5.3.3	Der vollautomatische Hochvakuumumpumpstand	789
18.5.4	Auspumpzeit und Belüften	790
18.6	Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum	791
18.6.1	Überblick	791
18.6.2	Aufbau einer UHV-Apparatur	792
18.6.3	UHV-Pumpen: Betriebshinweise	793
18.6.3.1	Adsorptionspumpen	793
18.6.3.2	Ionenzerstäuberpumpen	794
18.6.3.3	Titanverdampferpumpen	795
18.6.3.4	Turbomolekularpumpen	795
18.6.3.5	Kryopumpen	796
18.6.3.6	Volumengetter-(NEG-)Pumpen	796
18.6.4	Druckmessung	796
18.6.5	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik	796
18.6.6	Belüften	797
18.6.7	Ultrahochvakuum-Systeme	797
18.6.8	Ultrahochvakuum-(UHV-)Bauelemente	798
18.6.9	Ultrahochvakuum-(UHV-)Pumpstände	798
18.6.9.1	Ultrahochvakuum-(UHV-)Großanlagen	801
18.7	Literatur	803
19	Lecksuchtechniken	804
19.1	Überblick	804
19.1.1	Vakuumlecksuche	804
19.1.2	Überdrucklecksuche	805
19.1.3	Prüfgasverteilung vor einem Leck in der Atmosphäre	805
19.1.4	Messergebnisse mit der Schnüffelmethode	806
19.1.5	Prüfgase	807
19.1.5.1	Helium	808
19.1.5.2	Andere Edelgase als Helium	808
19.1.5.3	Wasserstoff H ₂	808
19.1.5.4	Methan CH ₄	808
19.1.5.5	Kohlendioxid CO ₂	808
19.1.5.6	Schwefelhexafluorid SF ₆	808
19.2	Eigenschaften von Lecks	809
19.2.1	Leckrate, Einheiten	809
19.2.2	Leckarten	810
19.2.2.1	Eigenschaften von Porenlecks	810
19.2.2.2	Permeationslecks	812
19.2.2.3	Virtuelle Lecks in Vakuumkammern	813
19.2.2.4	Flüssigkeitslecks	813

19.3 Überblick über die Lecksuchverfahren (siehe auch DIN EN 1779)	814
19.3.1 Allgemeine Hinweise zur Dichtheitsprüfung	814
19.3.2 Verfahren ohne Prüfgas (Druckprüfungen)	816
19.3.2.1 Allgemeines	816
19.3.2.2 Druckabfallmessung	816
19.3.2.3 Druckanstiegsmessung	816
19.3.2.4 Sonstige Verfahren	818
19.3.3 Prüfgasverfahren ohne Helium	818
19.3.3.1 Allgemeines	818
19.3.3.2 Vakuumlecksuche mit Prüfgasen außer Helium	819
19.3.3.3 Überdrucklecksuche mit Prüfgasen außer Helium	820
19.4 Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektoren	821
19.4.1 Eigenschaften des Heliumleckdetektors	821
19.4.2 Prüfung von Komponenten	821
19.4.2.1 Prüfablauf, integrale Prüfung	822
19.4.2.2 Vorgehen zur Lecklokalisierung	823
19.4.3 Prüfung von Vakuumanlagen	825
19.4.3.1 Allgemeines zum Teilstromverfahren	825
19.4.3.2 Anschlusspunkte des Lecksuchers an der Anlage	828
19.4.3.3 Nachweisempfindlichkeit und Ansprechzeit	829
19.4.4 Überdruck-(Schnüffel-)Lecksuche mit dem Heliumleckdetektor	831
19.4.4.1 Integrales Verfahren (total oder partiell)	831
19.4.4.2 Lecklokalisierung mit dem Schnüffler	832
19.5 Lecksuchverfahren mit anderen Prüfgasen	832
19.5.1 Allgemeines	832
19.5.2 Schnüffellecksuche an Kälte-/Klimaanlagen	832
19.6 Industrielle Dichtheitsprüfung von Bauteilen in der Serienfertigung	833
19.6.1 Allgemeines	833
19.6.2 Industrielle Prüfung von Serienbauteilen	833
19.6.2.1 Hüllenverfahren für Vakuumkomponenten (Methode A1 in DIN EN 1779)	834
19.6.2.2 Vakuumkammerverfahren für Überdruckbauteile (Methode B6 in DIN EN 1779)	834
19.6.3 Prüfung von hermetisch verschlossenen Komponenten durch Drucklagerung („Bombing“, Methode B5 in DIN EN 1779)	836
19.6.4 Prüfung von Lebensmittelverpackungen in der Folienprüfkammer	837
19.7 Literatur	838
20 Anhang	839
20.A Tabellen	839
20.B Diagramme	870
20.C Erläuterung einiger häufiger verwendeter Abkürzungen	886
20.D Größen und Einheiten	887
20.E Glossar	889
Sachwortregister	894
Produktmatrix	909
Bezugsquellenverzeichnis	910