
Inhaltsverzeichnis

Erläuterung einiger häufiger verwendeten Abkürzungen	XXIX
Glossar	XXXI
1 Die Geschichte der Vakuumphysik und Vakuumtechnik	1
Literatur	16
2 Anwendungen und Aufgaben der Vakuumtechnik	19
Literatur	27
3 Gasgesetze und kinetische Gastheorie	29
3.1 Beschreibung des Gaszustandes	29
3.1.1 Zustandsgrößen	29
3.1.2 Mengengrößen	33
3.1.3 Zustandsgleichung des idealen Gases	35
3.1.4 Gemisch verschiedener Gase	37
3.2 Kinetische Gastheorie	39
3.2.1 Modellvorstellung	39
3.2.2 Wanddruck als Folge von Teilchenstößen	39
3.2.3 Geschwindigkeitsverteilung von Maxwell und Boltzmann	41
3.2.4 Flächenstoßrate und Effusion	44
3.2.5 Größe der Gasteilchen, freie Weglänge	46
3.3 Transporteigenschaften von Gasen	50
3.3.1 Druckabhängigkeit	50
3.3.2 Transport von Reibungskräften in Gasen und Viskosität	51
3.3.3 Wärmetransport in Gasen und Wärmeleitfähigkeit	55
3.3.4 Diffusion	63
3.4 Reale Gase	65
3.4.1 Zustandsgleichungen	65
3.4.2 Eigenschaften der Gasteilchen und Verhalten des Gases	70

3.5	Dämpfe	75
3.5.1	Sättigungsdampfdruck	75
3.5.2	Verdampfungsrate	79
	Literatur	82
4	Strömung von Gasen	83
4.1	Strömungsarten, Begriffsdefinitionen	83
4.1.1	Charakterisierung von Strömungen, Knudsenzahl, Reynoldszahl	83
4.1.2	Gasstrom, Saugleistung, Saugvermögen	87
4.1.3	Strömungswiderstand, Strömungsleitwert	91
4.1.4	Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe	93
4.2	Reibungsfreie viskose Strömung, Gasdynamik	94
4.2.1	Erhaltungssätze	94
4.2.2	Allmähliche Querschnittsänderung: isentrope Zustandsänderung	96
4.2.3	Kritische Strömung	99
4.2.4	Verblockung bei kleinem Auslassdruck	101
4.2.5	Kontraktion bei Einströmung in Blende und Rohr	103
4.2.6	Beispiele zur Düsenströmung	103
4.2.7	Gerader und schräger Verdichtungsstoß	108
4.2.8	Lavaldüse, Ausströmung bei Gegendruck	110
4.2.9	Strömung um eine Ecke (Prandtl-Meyer)	113
4.3	Reibungsbehaftete viskose Leitungsströmung	116
4.3.1	Laminare und turbulente Strömung durch eine Leitung	116
4.3.2	Leitungsströmung von Luft	121
4.3.3	Luft einströmung in einen Kessel, Beispiele	122
4.3.4	Rohr in der Ansaugleitung einer Pumpe, Beispiele	129
4.3.5	Strömung durch Leitungen mit nicht-kreisförmigem Querschnitt	132
4.3.6	Gasartabhängigkeit der Strömung	134
4.4	Molekulare Strömung im Hoch- und Ultrahochvakuum	135
4.4.1	Strömungsform, Begriffe, Durchlaufwahrscheinlichkeit	135
4.4.2	Molekulare Strömung durch Blende	139
4.4.3	Molekulare Strömung durch Leitung gleichbleibenden Querschnitts	141
4.4.4	Molekulare Strömung durch Kreisrohr	144
4.4.5	Molekulare Strömung durch Leitungen einfachen Querschnitts	145
4.4.6	Rohrbogen und Rohrknie	147
4.4.7	Hintereinanderschaltung von Rohr und Blende	150
4.4.8	Hintereinanderschaltung von Bauelementen	151
4.4.9	Molekularströmung durch konisches Kreisrohr (Trichter)	154
4.4.10	Bauelement in der Ansaugleitung einer Pumpe	155

4.5	Strömung im gesamten Druckbereich	156
4.5.1	Kennzeichnung der Strömung	156
4.5.2	Strömung durch dünne Kreisblende	156
4.5.3	Strömung durch langes Kreisrohr	159
4.6	Strömung bei Temperaturdifferenz, thermische Effusion, Transpiration	164
4.7	Messung von Strömungsleitwerten	168
4.7.1	Notwendigkeit der Messung	168
4.7.2	Messung des charakteristischen Leitwerts (Eigenleitwert)	168
4.7.3	Berechnung des reduzierten Leitwerts (Einbauleitwert)	169
4.7.4	Messung des reduzierten Leitwerts	170
	Literatur	171

5 Analytische und numerische Berechnungen

	von stationären Flüssen verdünnter Gase	173
5.1	Grundkonzept	173
5.1.1	Die Parameter Knudsenzahl und Gasverdünnung	173
5.1.2	Makroskopische Größen	174
5.1.3	Funktion der Geschwindigkeitsverteilung	174
5.1.4	Globales Gleichgewicht	176
5.1.5	Lokales Gleichgewicht	176
5.1.6	Kinetische Boltzmann-Gleichung	177
5.1.7	Transportkoeffizienten	179
5.1.8	Modellgleichungen	181
5.1.9	Wechselwirkung zwischen Gas und Oberfläche	182
5.2	Berechnungsmethoden von Gasströmen	185
5.2.1	Allgemeine Bemerkungen	185
5.2.2	Die deterministische Methode	185
5.2.3	Wahrscheinlichkeitsmethoden	187
5.3	Geschwindigkeitsschlupf und Temperatursprung	189
5.3.1	Viskoser Schlupfkoeffizient	189
5.3.2	Der Koeffizient des thermischen Schlupfs	190
5.3.3	Der Koeffizient für den Temperatursprung	192
5.4	Impuls- und Wärmetransport durch verdünnte Gase	193
5.4.1	Ebene Couette-Strömung	193
5.4.2	Zylindrische Couette-Strömung	196
5.4.3	Wärmetransport zwischen zwei Platten	200
5.4.4	Wärmestrom zwischen zwei koaxialen Zylindern	202
5.5	Gasströme durch lange Rohre	206
5.5.1	Begriffe	206
5.5.2	Molekularer Strömungsbereich	207
5.5.3	Schlupfströmung	208
5.5.4	Strömung im Übergangsbereich	210

5.5.5	Strömung bei beliebigen Druck- und Temperaturdifferenzen . . .	215
5.5.6	Variable Querschnitte	220
5.5.7	Thermomolekulares Druckverhältnis	221
5.6	Durchfluss durch Blenden	224
5.7	Modellierung einer Holweckpumpe	226
	Literatur	228
6	Sorption und Diffusion	233
6.1	Sorptionsphänomene und deren Bedeutung – Begriffe und Terminologie	233
6.2	Adsorptions- und Desorptionskinetik	239
6.2.1	Adsorptionsrate	239
6.2.2	Desorptionsrate	239
6.2.3	Hobsons Modell einer Auspumpkurve	243
6.2.4	Mono-Schicht-Adsorptionsisothermen	245
6.2.5	Mehrschicht-Adsorption und Brunauer-Emmett-Teller-(BET-)Isotherme	248
6.2.6	Mono-Zeit	250
6.2.7	Absorption, Diffusion und Ausgasung	251
6.3	Permeation	256
	Literatur	259
7	Verdrängerpumpen	261
7.1	Einleitung und Übersicht	261
7.2	Oszillationsverdrängerpumpen	264
7.2.1	Kolbenpumpen	265
7.2.2	Membranpumpen	266
7.2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	267
7.2.2.2	Saugvermögen und Enddruck	268
7.2.2.3	Gasballast	270
7.2.2.4	Antriebskonzepte	270
7.2.2.5	Enddruck	271
7.2.2.6	Gasartabhängigkeit des Saugvermögens und des Enddrucks	271
7.2.2.7	Drehzahlabhängigkeit des Enddrucks	271
7.2.2.8	Konstruktionsprinzipien	273
7.2.2.9	Anwendung von Membranpumpen im Chemielabor	274
7.2.2.10	Membranpumpen als Vorpumpen für Turbomolekularpumpen	275
7.2.2.11	Membranpumpen in Kombination mit anderen Vakuumpumpen	278

7.3	Einwellige Rotationsverdrängerpumpen	279
7.3.1	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	279
7.3.1.1	Aufbau und Funktionsweise	280
7.3.1.2	Betriebseigenschaften und Auslegung	281
7.3.1.3	Bauarten	284
7.3.1.4	Pumpstände mit Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	287
7.3.1.5	Hinweise für den wirtschaftlichen Betrieb	288
7.3.2	Drehschieberpumpen	291
7.3.2.1	Wirkungsweise und Aufbau	292
7.3.2.2	Trocken laufende Drehschieberpumpen	293
7.3.2.3	Ölgeschmierte Drehschieberpumpen	294
7.3.2.4	Frischöl geschmierte Drehschieberpumpe	296
7.3.2.5	Betriebsverhalten und Hinweise	297
7.3.2.6	Kennlinien, Kenndaten	300
7.3.3	Sperrschieberpumpen	301
7.3.3.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	301
7.3.3.2	Vergleich zwischen Dreh- und Sperrschieberpumpen	305
7.3.4	Trochoidenpumpen	305
7.3.5	Scroll-Pumpen	307
7.3.5.1	Das Verdichtungsprinzip	307
7.3.5.2	Aufbau	308
7.3.5.3	Anwendungen und Vorteile	309
7.4	Zweiwellige Rotationsverdrängerpumpen	310
7.4.1	Schraubenpumpen	310
7.4.1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	311
7.4.1.2	Wärmeverhalten und technische Hinweise	317
7.4.2	Drehzahnumpen	319
7.4.2.1	Verdichtungsprinzip	320
7.4.2.2	Vergleich mit Wälzkolbenpumpen	323
7.4.2.3	Mehrstufige Drehzahnumpen und Pumpkombinationen	324
7.4.2.4	Drehzahlregelung	325
7.4.2.5	Anwendungsgebiete	325
7.4.3	Wälzkolbenpumpen (Roots-Pumpen)	326
7.4.3.1	Wirkungsweise	326
7.4.3.2	Technischer Aufbau	327
7.4.3.3	Theoretische Grundlagen	329
7.4.3.4	Der effektive Gasstrom	329
7.4.3.5	Kompressionsverhältnis K_0 bei Nulldurchsatz	329
7.4.3.6	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad	331

7.4.3.7	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/Wälzkolbenpumpe	332
7.4.3.8	Saugvermögen und Enddruck	336
7.4.3.9	Installation und Betriebshinweise	338
7.5	Spezifische Eigenschaften ölgedichteter Verdrängerpumpen	338
7.5.1	Saugvermögen und erreichbarer Enddruck	338
7.5.1.1	Saugvermögen und Endpartialdruck	338
7.5.1.2	Enddruck und Ölauswahl	339
7.5.2	Ölrückströmung	343
7.6	Grundlagen Verdrängerpumpen	344
7.6.1	Abpumpen von Dämpfen und Gasballast	344
7.6.2	Leistungsbedarf	348
7.6.2.1	Isotherme Kompression	349
7.6.2.2	Adiabatische Kompression	350
7.6.2.3	Polytrope Kompression	350
7.6.2.4	Kompressionsleistung	351
7.7	Betriebs- und Sicherheitshinweise	352
7.7.1	Aufstellung	352
7.7.2	An- und Abstellen, Saugstutzenventile	353
7.7.3	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise	354
7.7.4	Sicherheitstechnische Hinweise	355
7.8	Spezifisches Zubehör für Verdrängerpumpen	357
7.8.1	Sorptionsfallen	357
7.8.2	Sicherheitsventile	358
7.8.3	Ölfilter und Ölreinigung	360
7.8.4	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider)	361
7.8.5	Staubfilter	362
	Literatur	364
8	Kondensatoren	369
8.1	Kondensationsvorgänge im Vakuum	369
8.1.1	Grundlagen	369
8.1.2	Kondensation reiner Dämpfe	371
8.1.3	Kondensation von Gas-Dampf-Gemischen	375
8.1.4	Kühlmittel	378
8.2	Bauarten von Kondensatoren	379
8.2.1	Oberflächenkondensatoren für Flüssigkeitskondensation	379
8.2.2	Mischkondensatoren	381
8.2.3	Kondensataustrag	383
8.2.4	Oberflächenkondensatoren für Feststoffkondensation	384

8.3	Integration von Kondensatoren in Vakuumsysteme	385
8.3.1	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen	385
8.3.2	Regelung	388
8.4	Berechnungsbeispiele	389
	Literatur	392
9	Treibmittelpumpen	393
9.1	Einleitung, Übersicht	393
9.2	Flüssigkeitsstrahlpumpen	395
9.3	Dampfstrahl-Vakuumpumpen	397
9.3.1	Aufbau und Wirkungsweise	398
9.3.2	Leistungsdaten, Betriebsverhalten und Regelung	399
9.3.3	Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen	403
9.3.4	Organische Dämpfe als Treibmedium	406
9.4	Diffusionspumpen	407
9.4.1	Aufbau und Arbeitsweise	407
9.4.2	Treibmittel	412
9.4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen	413
9.4.4	Fraktionieren, Entgasen	414
9.4.5	Betriebshinweise	416
9.4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen	416
9.4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahlpumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells	419
9.5	Vergleich Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen	427
	Literatur	429
10	Molekular- und Turbomolekularpumpen	431
10.1	Einleitung	431
10.2	Molekularpumpen	434
10.2.1	Gaedepumpstufe	434
10.2.2	Holweckstufe	438
10.2.3	Siegbahnstufe	439
10.3	Physikalische Grundlagen der Turbomolekularpumpstufen	440
10.3.1	Pumpmechanismus	440
10.3.2	Saugvermögen und Kompressionsverhältnis	441
10.3.3	Statistische und Gaedesche Betrachtung des Pumpeffekts	442
10.3.4	Wärmehaushalt	446
10.4	Technik von Turbomolekularpumpen	449
10.4.1	Aufbau und Wirkungsweise	449
10.4.2	Turbomolekularpumpenrotoren	450
10.4.2.1	Rotorgestaltung	450
10.4.2.2	Rotormaterialien und mechanische Anforderungen	452

10.4.3	Sicherheitsanforderungen	452
10.4.4	Lagerung von Turbomolekularpumpenrotoren	453
10.4.4.1	Welle mit zwei Kugellagern	454
10.4.4.2	Welle mit Permanentmagnetlager und Kugellager	455
10.4.4.3	Magnetlagerung	455
10.4.5	Antriebe und Bedienung	457
10.4.6	Heizung und Kühlung	458
10.4.7	Sonderausführungen	458
10.5	Leistungsdaten von Turbomolekularpumpen	460
10.5.1	Saugvermögen	460
10.5.2	Kompressionsverhältnis, Enddruck und Basisdruck	461
10.5.3	Auspumpzeiten von Behältern	463
10.5.4	Pumpen hoher Gaslasten	464
10.6	Betrieb und Wartung von Turbomolekularpumpen	466
10.6.1	Wahl der Vorpumpe	466
10.6.2	Allgemeine Hinweise	466
10.6.3	Einschalten	466
10.6.4	Erreichen des Basisdruckes	466
10.6.5	Betrieb in Magnetfeldern	467
10.6.6	Belüften	467
10.6.7	Wartung	467
10.7	Anwendungen	468
	Literatur	470
11	Sorptionspumpen	473
11.1	Einleitung	473
11.2	Adsorptionspumpen	475
11.2.1	Wirkungsweise	475
11.2.2	Aufbau	477
11.2.3	Endvakuum und Saugvermögen	478
11.2.3.1	Enddruck mit einer Adsorptionspumpe	478
11.2.3.2	Enddruck mit zwei oder mehr Adsorptionspumpen	480
11.2.4	Arbeits- und Betriebshinweise	481
11.3	Getter	483
11.3.1	Wirkungsweise und Getterarten	483
11.3.2	NEG-Pumpen	484
11.3.2.1	Grundlagen der Volumengetter/NEG	484
11.3.2.2	Aufbau von NEG-Pumpen	489
11.3.2.3	Saugvermögen und Getterkapazität	490
11.3.2.4	Anwendung von NEG-Pumpen	492
11.3.2.5	Sicherheits- und Betriebshinweise	492

11.3.3	Verdampferpumpen	494
11.3.3.1	Materialien der Verdampfer	494
11.3.3.2	Saugvermögen	495
11.3.3.3	Getterkapazität	498
11.3.3.4	Aufbau der Verdampfergetterpumpen	499
11.4	Ionenzerstäuberpumpen	504
11.4.1	Wirkungsweise	504
11.4.2	Technischer Aufbau (Diodentyp)	509
11.4.3	Saugvermögen	509
11.4.4	Die differentielle Diodenpumpe	512
11.4.5	Die Triodenpumpe	513
11.4.6	Lineare Zerstäuberpumpen (Distributed ion pump)	516
11.4.7	Restgasspektrum	516
11.4.8	Arbeitstechnik	517
11.5	Die Orbitronpumpe	519
	Literatur	520
12	Kryotechnik und Kryopumpen	523
12.1	Einleitung	523
12.2	Kühlverfahren	524
12.2.1	Gaskälteverfahren	525
12.2.1.1	Stirling-Verfahren	527
12.2.1.2	Gifford-McMahon-Verfahren	528
12.2.1.3	Pulsrohr-Verfahren	530
12.2.2	Kryostate mit flüssigen Kältemitteln	532
12.2.3	Messung tiefer Temperaturen	533
12.3	Arbeitsprinzipien von Kryopumpen	533
12.3.1	Gaskondensation	536
12.3.2	Kryosorption	539
12.3.2.1	Feste Adsorptionsmittel	541
12.3.2.2	Kryotrapping	544
12.4	Auslegung von Kryopumpen	544
12.4.1	Kryotechnisch konstruktive Merkmale	544
12.4.1.1	Strahlung	546
12.4.1.2	Wärmeleitung	549
12.4.2	Vakuumtechnisch konstruktive Merkmale	552
12.4.3	Konstruktionsprinzipien	554
12.4.3.1	Bad-Kryopumpen	555
12.4.3.2	Refrigerator-Kryopumpen	555
12.5	Kenngößen einer Kryopumpe	561
12.5.1	Startdruck	561
12.5.2	Enddruck	562

12.5.3	Saugvermögen	563
12.5.4	Standzeit	564
12.5.5	Kapazität (maximale Gasaufnahme)	565
12.5.6	Cross-over-Wert	565
12.5.7	Maximal zulässiger pV -Durchfluß	566
12.5.8	Beständigkeit gegen thermische Strahlung	566
12.5.9	Regeneration	567
12.5.10	Leistungsvergleich	569
12.6	Anwendungsbeispiele	570
12.6.1	Kryopumpen mit Zwangskühlung durch superkritisches Helium	570
12.6.2	Kombinierte Refrigerator/Flüssig-Kryopumpen	572
12.6.3	Kryopumpen mit zwangsgeführter Flüssigkühlung	573
12.6.4	Kryopumpen in Großforschungsanwendungen	575
12.6.5	Kryopumpen in industriellen Anlagen	575
12.6.6	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe	575
	Literatur	576
13	Vakuummessgeräte für Totaldruck	579
13.1	Einleitung	579
13.2	Mechanische Vakuummeter	581
13.2.1	Prinzip und Einteilung	581
13.2.2	Plattenfedervakuummeter	582
13.2.3	Kapselfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa–100 kPa)	582
13.2.4	Röhrenfedervakuummeter (Messbereich 1 kPa–100 kPa)	583
13.2.4.1	Quarz-Bourdon-Vakuummeter	584
13.2.5	Membranvakuummeter	585
13.2.5.1	Membranvakuummeter mit mechanischer Anzeige (Messbereich 0,1 kPa–100 kPa)	585
13.2.5.2	Membranvakuummeter mit elektrischem Umformer	586
13.2.5.3	Membranvakuummeter nach dem piezo-resistiven Prinzip	587
13.2.5.4	Piezo-elektrische Vakuummeter	589
13.2.5.5	Resonanz-Membranvakuummeter	589
13.2.5.6	Kapazitätsvakuummeter	591
13.2.5.7	Thermische Transpiration	594
13.2.6	Druckschalter und Druckregler	596
13.3	Gasreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge)	598
13.3.1	Messanordnung und Messprinzip	599
13.3.2	Bremmung durch Gasreibung	600
13.3.3	Durchführung der Messung	605
13.3.4	Erweiterung des Messbereichs zu höheren Drücken	606
13.3.5	Messunsicherheit	607

13.4	Direkte elektrische Druckmessumformer	608
13.5	Wärmeleitungsvakuummeter	608
13.5.1	Prinzip	608
13.5.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur	612
13.5.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung	616
13.5.4	Thermoelementvakuummeter (Thermocouple)	617
13.5.5	Thermistoren	618
13.5.6	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern	618
13.6	Gasflussmessgeräte	620
13.7	Ionisationsvakuummeter	623
13.7.1	Prinzip und Einteilung	623
13.7.2	Geschichtliche Entwicklung der Ionisationsvakuummeter	624
13.7.3	Ionisationsvakuummeter mit Emissionskathode	626
13.7.3.1	Messprinzip	626
13.7.3.2	Aufbau der Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	629
13.7.3.3	Konzentrische Triode	629
13.7.3.4	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter	630
13.7.3.5	Ionisationsvakuummeter nach Bayard und Alpert	632
13.7.3.6	Extraktor-Ionisationsvakuummeter	636
13.7.3.7	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	639
13.7.3.8	Betriebshinweise für Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	640
13.7.4	Ionisationsvakuummeter mit gekreuzten elektromagnetischen Feldern	641
13.7.4.1	Penning-Vakuummeter	641
13.7.4.2	Magnetron und invertiertes Magnetron	646
13.7.5	Vergleichende Betrachtung zwischen den beiden Arten von Ionisationsvakuummetern	648
13.7.6	Allgemeine Hinweise	650
13.8	Kombinationsmessgeräte	654
	Literatur	655
14	Partialdruckmessgeräte und Leckdetektoren	661
14.1	Einleitung	661
14.2	Partialdruckmessgeräte (Massenspektrometer)	662
14.2.1	Ionenquellen	667
14.2.1.1	Offene Ionenquelle OIS	668
14.2.1.2	Geschlossene Ionenquellen	670
14.2.1.3	Crossbeam-Ionenquelle	671
14.2.2	Heizfaden-Materialien	672
14.2.3	Ionenquellenbedingte Artefakte im Massenspektrum	673

14.2.4	Massen-Analysatoren	675
14.2.4.1	Quadrupol-Massenanalysator	675
14.2.4.2	Miniaturisierte Quadrupol-Massenspektrometer	679
14.2.4.3	Magnetische Sektorfeld Massenspektrometer	681
14.2.5	Ionendetektoren	685
14.2.5.1	Faraday-Detektor	685
14.2.5.2	Sekundärelektronen-Vervielfacher	685
14.2.5.3	SEV mit diskreten Dynoden	687
14.2.5.4	SEV mit kontinuierlicher Dynode	689
14.2.5.5	Microchannel Plate Detektor	689
14.2.6	Steuersoftware für Massenspektrometer	691
14.2.6.1	Analoger Scan, Ionenstrom in Abhängigkeit von der Masse	691
14.2.6.2	Messung ausgewählter Massenzahlen	692
14.2.6.3	Lecksuch-Modus	692
14.2.7	Weitere Einsatzmöglichkeiten von Massenspektrometern	693
14.3	Partialdruckmessung mit optischen Methoden	693
14.4	Leckdetektoren	696
14.4.1	Grundprinzipien und geschichtliche Entwicklung	696
14.4.2	Heliumleckdetektoren	696
14.4.2.1	Anforderungen und Grundfunktion bei der Vakuumlecksuche	696
14.4.2.2	Heliumsektorfeldmassenspektrometer	697
14.4.2.3	Einlassdruck von Heliumleckdetektoren	699
14.4.2.4	Zeitverhalten von Heliumleckdetektoren	700
14.4.2.5	Arbeitsprinzipien von Heliumleckdetektoren	700
14.4.2.6	Schnüffleinrichtungen für Heliumleckdetektoren	706
14.4.2.7	Anwendungsfelder der massenspektrometrischen Heliumleckdetektoren	706
14.4.3	Kältemittelleckdetektoren	707
14.4.3.1	Aufbau und Funktion	707
14.4.3.2	Anwendungsfelder	708
14.4.4	Prüflecks	709
14.4.4.1	Permeationslecks	709
14.4.4.2	Leitwertlecks	709
14.4.4.3	Praktische Ausführungen von Prüflecks	710
14.4.5	Messeigenschaften und Kalibrierung von Leckdetektoren	711
14.4.5.1	Leckdetektoren als Prüfmittel im Sinne der DIN/ISO 9001	711
14.4.5.2	Unsicherheit der Kalibrierung	711

14.4.6	Leckdetektoren mit anderen Sensorprinzipien	712
14.4.6.1	Heliumschnüffler mit Quarzglasmembrane	712
14.4.6.2	Halogenleckdetektoren mit Alkali-Ionen-Sensor	713
14.4.6.3	Halogenleckdetektoren mit Infrarot-Sensor	714
	Literatur	714
15	Kalibrierungen und Normen	719
15.1	Einleitung	719
15.2	Kalibrierung von Vakuummessgeräten	722
15.2.1	Primärnormale	722
15.2.1.1	Flüssigkeitsmanometer	724
15.2.1.2	Kompressionsmanometer nach McLeod	727
15.2.1.3	Drehkolbenmanometer und Druckwaagen	729
15.2.1.4	Statisches Expansionsverfahren	732
15.2.1.5	Kontinuierliches Expansionsverfahren	738
15.2.1.6	Sonstige Primärnormale	746
15.2.2	Das Vergleichsmessverfahren	746
15.2.3	Kapazitätsvakuummeter	748
15.2.4	Gasreibungvakuummeter	752
15.2.5	Ionisationsvakuummeter	755
15.3	Kalibrierungen von Partialdruckmessgeräten	757
15.4	Kalibrierungen von Testlecks	760
15.5	Normen für die Bestimmung von Kenngrößen von Vakuumpumpen	763
	Literatur	767
16	Werkstoffe	773
16.1	Anforderungen und Überblick über die Werkstoffe	773
16.2	Werkstoffe der Vakuumtechnik	775
16.2.1	Metalle	775
16.2.1.1	Die wichtigsten Metalle und Metalllegierungen	776
16.2.2	Technische Gläser	780
16.2.2.1	Allgemeines	780
16.2.2.2	Eigenschaften der wichtigsten Gläser	783
16.2.3	Keramische Werkstoffe	785
16.2.3.1	Allgemeines	785
16.2.3.2	Eigenschaften der wichtigsten keramischen Werkstoffe	785
16.2.3.3	Keramik in der Vakuumtechnik	786
16.2.3.4	Verbindungstechnologien für Keramiken mit Metallen	787
16.2.3.5	Zeolithe	787

16.2.4	Kunststoffe	787
16.2.4.1	Allgemeines	787
16.2.4.2	Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffe	787
16.2.5	Vakuumfette	789
16.2.6	Öle	790
16.2.7	Kühlmittel	790
16.3	Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen	791
16.3.1	Allgemeines	791
16.3.2	Gasdurchlässigkeit	791
16.3.2.1	Gasdurchlässigkeit von Metallen	793
16.3.2.2	Gasdurchlässigkeit von Gläsern und Keramiken	793
16.3.2.3	Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen	794
16.3.3	Gasabgabe	796
16.3.3.1	Allgemeines	796
16.3.3.2	Sättigungsdampfdruck	796
16.3.3.3	Desorption von der Oberfläche, Gasdiffusion aus dem Materialinnern und Richtwerte für die Gasabgabe	798
16.3.3.4	Diffusion aus dem Inneren	799
16.3.3.5	Richtwerte für die Gesamtgasabgaberate	803
Literatur		803
17	Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen	805
17.1	Einleitung	805
17.2	Vakuumgerechtes Konstruieren und Fügen	806
17.2.1	Auslegung	806
17.2.2	Dimensionierung von Vakuumbehältern und Berechnungsbeispiele	808
17.2.3	Doppelwandige Behälter	811
17.2.4	Besonderheiten der Konstruktion von Vakuumbauteilen	811
17.2.5	Schweißverbindungen	812
17.2.6	Lötverbindungen	814
17.2.7	Klebeverbindungen	816
17.2.8	Sonstige Fügetechniken	816
17.3	Optimierung des Ausgasverhaltens durch Oberflächenbehandlung und Reinigung	819
17.3.1	Methoden der Oberflächenbehandlung und ihre Wirkungsweise	819
17.3.2	Reinigungsverfahren für Vakuumbauteile	821
17.3.3	Partikelarme Vakuumbauteile	824
17.4	Verbindungsstandards und ihre Funktionsprinzipien	824
17.4.1	KF- und ISO-Verbindungen	825
17.4.2	CF Verbindungen	827

17.4.3	Spannketten für UHV-Verbindungen	828
17.4.4	Dichtungen	828
17.5	Bauelemente der Vakuumtechnik	835
17.5.1	Mechanische, elektrische und optische Durchführungen; Gas- und Flüssigkeitsdurchführungen	835
17.5.1.1	Mechanische Durchführungen	835
17.5.1.2	Durchführungen für Drehbewegungen	835
17.5.1.3	Manipulatoren	837
17.5.1.4	Elektrische Durchführungen	838
17.5.1.5	Optische Durchführungen	839
17.5.1.6	Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase	841
17.5.2	Flexible Verbindungselemente	841
17.5.2.1	Spiralverstärkte Schläuche aus PVC	841
17.5.2.2	Metallbälge und -schläuche	842
17.5.3	Sichtfenster	844
17.5.4	Absperrorgane (Ventile)	846
Literatur		852
18	Vakuumsysteme	855
18.1	Elektronische Anbindung von Vakuumsystemen	855
18.1.1	Überwachung durch Prozesssensoren und automatisierte Datenauswertung	855
18.1.1.1	Anforderungen und Anwendungen	855
18.1.2	Integrationslösungen	858
18.1.2.1	ASCII-Protokolle	858
18.1.2.2	Standardisierte Bussysteme	858
18.1.2.3	Sensor-Integration nach SECS- und HSMS-Standard	859
18.1.2.4	Prozessdatenanalyse	861
18.2	Berechnung von Vakuumsystemen	864
18.2.1	Analytische und numerische Berechnung	864
18.2.2	Berechnung mit Netzwerken	865
18.2.3	End- und Arbeitsdruck in Vakuumsystemen	867
18.2.3.1	Enddruck	867
18.2.3.2	Arbeitsdruck	868
18.3	Druckregelung	872
18.4	Arbeitstechnik im Grobvakuum	873
18.4.1	Überblick	873
18.4.2	Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur	875
18.4.3	Pumpen, Art und Saugvermögen	875
18.4.4	Pumpstände für Grobvakuum	877
18.4.5	Druckmessung im Grobvakuum	878

18.4.6	Druck und Auspumpzeit im Grobvakuum	878
18.4.7	Belüften	883
18.5	Arbeitstechnik im Feinvakuum	885
18.5.1	Überblick	885
18.5.2	Aufbau einer Feinvakuum-Apparatur	885
18.5.3	Pumpen: Art und Saugvermögen	885
18.5.4	Druckmessung	886
18.5.5	Auspumpzeit und Enddruck	886
18.5.6	Belüften	892
18.5.7	Feinvakuumpumpstände	892
18.6	Arbeitstechnik im Hochvakuum	895
18.6.1	Pumpen: Art und Saugvermögen	895
18.6.2	Reinigung der Vakuummeter	895
18.6.3	Hochvakuum pumpstände	897
18.6.3.1	Hochvakuum pumpstand mit Diffusionspumpe	897
18.6.3.2	Hochvakuum pumpstand mit Turbomolekularpumpe	904
18.6.3.3	Der vollautomatische Hochvakuum pumpstand	906
18.6.4	Auspumpzeit und Belüften	908
18.7	Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum	910
18.7.1	Überblick	910
18.7.2	UHV-Pumpen: Betriebshinweise	911
18.7.2.1	Adsorptionspumpen	911
18.7.2.2	Ionenzerstäuberpumpen	911
18.7.2.3	Titanverdampferpumpen	912
18.7.2.4	Turbomolekularpumpen	913
18.7.2.5	Kryopumpen	913
18.7.2.6	Volumengetter-(NEG-)Pumpen	914
18.7.3	Druckmessung	914
18.7.4	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik	914
18.7.5	Belüften	915
18.7.6	Ultrahochvakuum-Systeme	915
18.7.7	Ultrahochvakuum-(UHV-)Bauelemente	916
18.7.8	Ultrahochvakuum-(UHV-)Pumpstände	916
18.7.8.1	Ultrahochvakuum-(UHV-)Großanlagen	920
Literatur		921
19	Lecksuchtechniken	923
19.1	Überblick	923
19.1.1	Vakuumlecksuche	924
19.1.2	Überdrucklecksuche	924
19.1.3	Prüfgasverteilung vor einem Leck in der Atmosphäre	925
19.1.4	Messergebnisse mit der Schnüffelmethode	926

19.1.5	Prüfgase	927
19.1.5.1	Helium	928
19.1.5.2	Andere Edelgase als Helium	928
19.1.5.3	Wasserstoff H ₂	928
19.1.5.4	Methan CH ₄	928
19.1.5.5	Kohlendioxid CO ₂	928
19.1.5.6	Schwefelhexafluorid SF ₆	929
19.2	Eigenschaften von Lecks	929
19.2.1	Leckrate, Einheiten	929
19.2.2	Leckarten	930
19.2.3	Eigenschaften von Porenlecks	931
19.2.3.1	Permeationslecks	933
19.2.3.2	Virtuelle Lecks in Vakuumkammern	934
19.2.3.3	Flüssigkeitslecks	934
19.3	Überblick über die Lecksuchverfahren (siehe auch DIN EN 1779)	935
19.3.1	Allgemeine Hinweise zur Dichtheitsprüfung	935
19.3.2	Verfahren ohne Prüfgas (Druckprüfungen)	937
19.3.2.1	Allgemeines	937
19.3.2.2	Druckabfallmessung	938
19.3.2.3	Druckanstiegsmessung	938
19.3.2.4	Sonstige Verfahren	939
19.3.3	Prüfgasverfahren ohne Helium	940
19.3.3.1	Allgemeines	940
19.3.3.2	Vakuumlecksuche mit Prüfgasen außer Helium	940
19.3.3.3	Überdrucklecksuche mit Prüfgasen außer Helium	942
19.4	Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektoren	943
19.4.1	Eigenschaften des Heliumleckdetektors	943
19.4.2	Prüfung von Komponenten	944
19.4.2.1	Prüfablauf, integrale Prüfung	944
19.4.2.2	Vorgehen zur Lecklokalisierung	945
19.4.3	Prüfung von Vakuumanlagen	947
19.4.3.1	Allgemeines zum Teilstromverfahren	948
19.4.3.2	Anschlusspunkte des Lecksuchers an der Anlage	949
19.4.3.3	Nachweisempfindlichkeit und Ansprechzeit	951
19.4.4	Überdruck-(Schnüffel-)Lecksuche mit dem Heliumleckdetektor	953
19.4.4.1	Integrales Verfahren (total oder partiell)	953
19.4.4.2	Lecklokalisierung mit dem Schnüffler	954
19.5	Lecksuchverfahren mit anderen Prüfgasen	955
19.5.1	Allgemeines	955
19.5.2	Schnüffellecksuche an Kälte-/Klimaanlagen	955

19.6 Industrielle Dichtheitsprüfung von Bauteilen in der Serienfertigung . . .	956
19.6.1 Allgemeines	956
19.6.2 Industrielle Prüfung von Serienbauteilen	956
19.6.2.1 Hüllenverfahren für Vakuumkomponenten (Methode A1 in DIN EN 1779)	956
19.6.2.2 Vakuumkammerverfahren für Überdruckbauteile (Methode B6 in DIN EN 1779)	957
19.6.3 Prüfung von hermetisch verschlossenen Komponenten durch Drucklagerung („Bombing“, Methode B5 in DIN EN 1779) . . .	959
19.6.4 Prüfung von Lebensmittelverpackungen in der Folienprüfkammer	960
Literatur	961
20 Anhang	963
20.1 Tabellen	964
20.2 Diagramme	1010
20.3 Größen und Einheiten	1031
20.3.1 Physikalische Größe	1031
20.3.2 Größengleichung, Kohärente Einheiten	1032
20.3.3 Zugeschnittene Größengleichung	1032
20.3.4 Zahlenwertgleichung	1033
Produktmatrix	1035
Bezugsquellenverzeichnis	1037
Sachverzeichnis	1041