

Inhaltsverzeichnis

1 Geschichte der Vakuumtechnik	1
Karl Jousten	
Literatur	17
2 Anwendung und Aufgaben der Vakuumtechnik	19
Karl Jousten	
Literatur	30
3 Gasgesetze und kinetische Gastheorie	33
Karl Jousten	
1 Beschreibung des Gaszustandes	33
1.1 Zustandsgrößen	33
1.2 Mengengrößen	39
1.3 Zustandsgleichung des idealen Gases	42
1.4 Gemisch verschiedener Gase	44
2 Kinetische Gastheorie	46
2.1 Modellvorstellung	46
2.2 Wanddruck als Folge von Teilchenstößen	47
2.3 Geschwindigkeitsverteilung von Maxwell und Boltzmann	49
2.4 Flächenstoßrate und Effusion	52
2.5 Größe der Gasteilchen, freie Weglänge	54
Literatur	61
4 Transporteigenschaften von Gasen	63
Karl Jousten	
1 Druckabhängigkeit	63
2 Transport von Reibungskräften in Gasen und Viskosität	64
3 Wärmetransport in Gasen und Wärmeleitfähigkeit	68
4 Diffusion	77
5 Reale Gase und Dämpfe	81
Karl Jousten	
1 Zustandsgleichungen	81
2 Eigenschaften der Gasteilchen und Verhalten des Gases	85

3	Sättigungsdampfdruck	92
4	Verdampfungsrate	97
	Literatur	107
6	Strömung von Gasen	109
	Karl Jousten	
1	Strömungsarten, Begriffsdefinitionen	109
1.1	Charakterisierung von Strömungen, Knudsenzahl, Reynoldszahl	109
1.2	Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe	118
2	Messung von Strömungsleitwerten	120
2.1	Notwendigkeit der Messung	120
2.2	Messung des charakteristischen Leitwerts (Eigenleitwert)	120
2.3	Berechnung des reduzierten Leitwerts (Einbauleitwert)	122
2.4	Messung des reduzierten Leitwerts	122
7	Viskose Strömung verdünnter Gase	125
	Karl Jousten	
1	Reibungsfreie viskose Strömung, Gasdynamik	125
1.1	Erhaltungssätze	125
1.2	Allmähliche Querschnittsänderung: isentrope Zustandsänderung	127
1.3	Kritische Strömung	130
1.4	Verblockung bei kleinem Auslassdruck	132
1.5	Kontraktion bei Einströmung in Blende und Rohr	134
1.6	Beispiele zur Düsenströmung	135
1.7	Gerader und schräger Verdichtungsstoß	139
1.8	Lavaldüse, Ausströmung bei Gegendruck	141
1.9	Strömung um eine Ecke (Prandtl–Meyer)	145
2	Reibungsbehaftete viskose Leitungsströmung	148
2.1	Laminare und turbulente Strömung durch eine Leitung	148
2.2	Leitungsströmung von Luft	154
2.3	Luft einströmung in einen Kessel, Beispiele	156
2.4	Rohr in der Ansaugleitung einer Pumpe, Beispiele ...	162
2.5	Strömung durch Leitungen mit nicht- kreisförmigem Querschnitt	165
2.6	Gasartabhängigkeit der Strömung	167
	Literatur	168
8	Molekulare Strömung von Gasen	171
	Karl Jousten	
1	Strömungsform, Begriffe, Durchlaufwahrscheinlichkeit	171
2	Molekulare Strömung durch eine Blende	175

3	Molekulare Strömung durch Leitung gleichbleibenden Querschnitts	177
4	Molekulare Strömung durch Kreisrohr	180
5	Molekulare Strömung durch Leitungen einfachen Querschnitts	181
6	Rohrbogen und Rohrknie	183
7	Hintereinanderschaltung von Rohr und Blende	186
8	Hintereinanderschaltung von Bauelementen	187
9	Molekularströmung durch konisches Kreisrohr (Trichter)	190
10	Bauelement in der Ansaugleitung einer Pumpe	191
	Literatur	192
9	Grundlagen der exakten Berechnung von stationären Flüssen verdünnter Gase	195
	Karl Jousten und Felix Sharipov	
1	Grundkonzept	195
1.1	Die Parameter Knudsenzahl und Gasverdünnung	195
1.2	Makroskopische Größen	196
1.3	Funktion der Geschwindigkeitsverteilung	197
1.4	Globales Gleichgewicht	198
1.5	Lokales Gleichgewicht	199
1.6	Kinetische Boltzmann-Gleichung	199
1.7	Transportkoeffizienten	201
1.8	Modellgleichungen	203
1.9	Wechselwirkung zwischen Gas und Oberfläche	205
2	Berechnungsmethoden von Gasströmen	207
2.1	Allgemeine Bemerkungen	207
2.2	Die deterministische Methode	208
2.3	Wahrscheinlichkeitsmethoden	209
3	Geschwindigkeitsschlupf und Temperatursprung	211
3.1	Viskoser Schlupfkoeffizient	212
3.2	Der Koeffizient des thermischen Schlupfs	213
3.3	Der Koeffizient für den Temperatursprung	214
4	Impuls- und Wärmetransport durch verdünnte Gase	215
4.1	Ebene Couette-Strömung	215
4.2	Zylindrische Couette-Strömung	219
4.3	Wärmetransport zwischen zwei Platten	224
4.4	Wärmestrom zwischen zwei coaxialen Zylindern	225
	Literatur	230
10	Strömung von Gasen durch Rohre und Blenden	233
	Karl Jousten und Felix Sharipov	
1	Gasströme durch lange Rohre	233
1.1	Begriffe	233
1.2	Molekularer Strömungsbereich	235

1.3	Schlupfströmung	236
1.4	Strömung im Übergangsgebiet	237
1.5	Strömung bei beliebigen Druck- und Temperaturdifferenzen	244
1.6	Variable Querschnitte	249
1.7	Thermomolekulares Druckverhältnis	251
2	Durchfluss durch Blenden	254
3	Modellierung einer Holweckpumpe	257
4	Strömung im gesamten Druckbereich	259
4.1	Kennzeichnung der Strömung	259
4.2	Strömung durch dünne Kreisblende	259
4.3	Strömung durch langes Kreisrohr	262
	Literatur	263
11	Sorption und Diffusion	265
	Karl Jousten	
1	Sorptionsphänomene und deren Bedeutung – Begriffe und Terminologie	265
2	Adsorptions- und Desorptionskinetik	270
2.1	Adsorptionsrate	270
2.2	Desorptionsrate	271
2.3	Hobsons Modell einer Auspumpkurve	274
2.4	Mono-Schicht-Adsorptionsisothermen	278
2.5	Mehrschicht-Adsorption und Brunauer-Emmett- Teller-(BET)-Isotherme	280
2.6	Mono-Zeit	282
2.7	Absorption, Diffusion und Ausgasung	283
3	Permeation	290
	Literatur	293
12	Allgemeine Einteilung der Vakuumpumpen und Grundlagen der Verdrängervakuumpumpen	295
	Karl Jousten	
1	Allgemeine Einteilung der Vakuumpumpen	295
2	Übersicht über die Verdrängerpumpen	298
3	Grundlagen Verdrängerpumpen	302
3.1	Leistungsbedarf	302
3.2	Abpumpen von Dämpfen und Gasballast	306
	Literatur	311
13	Oszillationsverdrängerpumpen	313
	Karl Jousten und Jürgen Dirscherl	
1	Einleitung	313
2	Kolbenpumpen	314
3	Membranpumpen	316
3.1	Aufbau und Funktionsweise	316
3.2	Saugvermögen und Endvakuum	318

3.3	Gasballast	320
3.4	Antriebskonzepte	320
3.5	Gasartabhängigkeit des Saugvermögens und des Endvakuaums	321
3.6	Drehzahlabhängigkeit des Endvakuaums	322
3.7	Konstruktionsprinzipien	322
3.8	Anwendung von Membranpumpen im Chemielabor	325
3.9	Membranpumpen als Vorpumpen für Turbomolekularpumpen	326
3.10	Membranpumpen in Kombination mit anderen Vakuumpumpen	330
	Literatur	331
14	Einwellige Rotationsverdrängerpumpen	333
	Karl Jousten, Alfons Jünemann und Boris Kossek	
1	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	333
1.1	Aufbau und Funktionsweise	334
1.2	Betriebseigenschaften und Auslegung	335
1.3	Bauarten	339
1.4	Pumpstände mit Flüssigkeitsring- Vakuumpumpen	340
1.5	Hinweise für den wirtschaftlichen Betrieb	342
2	Drehschieberpumpe	345
2.1	Wirkungsweise und Aufbau	345
2.2	Trockenlaufende Drehschieberpumpe	348
2.3	Ölgeschmierte Drehschieberpumpen	349
2.4	Frischölgeschmierte Drehschieberpumpe	351
2.5	Betriebsverhalten und Hinweise	352
2.6	Kennlinien, Kenndaten	355
3	Sperrschieberpumpen	356
3.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	356
3.2	Vergleich zwischen Dreh- und Sperrschieberpumpen	360
4	Trochoidenpumpen	361
5	Scroll-Pumpen (Spiralpumpen)	362
5.1	Das Verdichtungsprinzip	363
5.2	Aufbau	364
5.3	Anwendungen und Vorteile	365
	Literatur	366
15	Zweiwellige Rotationsverdrängerpumpen	369
	Karl Jousten, Uwe Friedrichsen und Erik Lippelt	
1	Schraubenpumpen	369
1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	370
1.2	Wärmeverhalten und technische Hinweise	376

2	Klauen- oder Drehzahnumpen	378
2.1	Verdichtungsprinzip	379
2.2	Vergleich mit Wälzkolbenumpen	381
2.3	Mehrstufige Klauenumpen und Pumpkombinationen	382
2.4	Drehzahlregelung	383
2.5	Anwendungsgebiete	384
3	Wälzkolbenumpen (Roots-Pumpen)	384
3.1	Wirkungsweise	385
3.2	Technischer Aufbau	386
3.3	Theoretische Grundlagen	388
3.4	Der effektive Gasstrom	388
3.5	Kompressionsverhältnis K bei Nulldurchsatz bei Nulldurchsatz	389
3.6	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad [16]	390
3.7	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/ Wälzkolbenpumpe	392
3.8	Saugvermögen und Enddruck	394
3.9	Installation und Betriebshinweise	397
	Literatur	397
16	Betrieb von Verdängerumpen	399
	Karl Jousten und Uwe Friedrichsen	
1	Spezifische Eigenschaften ölgedichteter Verdrängerumpen	399
1.1	Saugvermögen und erreichbarer Enddruck	399
1.2	Ölrückströmung	404
2	Betriebs- und Sicherheitshinweise	405
2.1	Aufstellung	405
2.2	An- und Abstellen, Saugstutzenventile	405
2.3	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise	407
2.4	Sicherheitstechnische Hinweise	408
3	Spezifisches Zubehör für Verdrängerumpen	410
3.1	Sorptionsfallen	410
3.2	Sicherheitsventile	410
3.3	Ölfilter und Ölreinigung	411
3.4	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider)	413
3.5	Staubfilter	415
	Literatur	416
17	Kondensatoren	419
	Harald Grave	
1	Kondensationsvorgänge im Vakuum	419
1.1	Grundlagen	419

1.2	Kondensation reiner Dämpfe	421
1.3	Kondensation von Gas-Dampf-Gemischen	425
1.4	Kühlmittel	429
2	Bauarten von Kondensatoren	429
2.1	Oberflächenkondensatoren für Flüssigkeitskondensation	429
2.2	Mischkondensatoren	432
2.3	Kondensataustrag	434
2.4	Oberflächenkondensatoren für Feststoffkondensation	436
3	Integration von Kondensatoren in Vakuumsysteme	436
3.1	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen	436
3.2	Regelung	440
4	Berechnungsbeispiele	441
	Literatur	443
18	Treibmittelpumpen	445
	Karl Jousten und Klaus Galda	
1	Einleitung, Übersicht	445
2	Flüssigkeitsstrahlpumpen	447
3	Dampfstrahl-Vakuumpumpen	449
3.1	Aufbau und Wirkungsweise	450
3.2	Leistungsdaten, Betriebsverhalten und Regelung	452
3.3	Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen	456
3.4	Organische Dämpfe als Treibmedium	459
4	Diffusionspumpen	461
4.1	Aufbau und Arbeitsweise	461
4.2	Treibmittel	465
4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen	468
4.4	Fraktionieren, Entgasen	469
4.5	Betriebshinweise	471
4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen	471
4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahlpumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells	474
5	Vergleich Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen	482
	Literatur	485
19	Molekular- und Turbomolekularpumpen	487
	Karl Jousten	
1	Einleitung	487

2	Molekularpumpen	490
2.1	Gaedepumpstufe	492
2.2	Holweckstufe	496
2.3	Siegbahnstufe	498
3	Kombination von Molekular- und Seitenkanalpumpstufen	498
3.1	Der regenerative oder Seitenkanal-Pumpmechanismus	499
3.2	Pumpkonstruktion und Anwendungen	500
4	Physikalische Grundlagen der Turbomolekularpumpstufen	501
4.1	Pumpmechanismus	502
4.2	Saugvermögen und Kompressionsverhältnis	502
4.3	Statistische und Gaedesche Betrachtung des Pumpeffekts	504
4.4	Statistische Betrachtung	506
4.5	Wärmehaushalt	508
5	Technik von Turbomolekularpumpen	511
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	512
5.2	Turbomolekularpumpenrotoren	513
5.3	Sicherheitsanforderungen	514
5.4	Lagerung von Turbomolekularpumpenrotoren	516
5.5	Antriebe und Bedienung	519
5.6	Heizung und Kühlung	520
5.7	Sonderausführungen	521
6	Leistungsdaten von Turbomolekularpumpen	523
6.1	Saugvermögen	523
6.2	Kompressionsverhältnis, Enddruck und Basisdruck	524
6.3	Auspumpzeiten von Behältern	524
6.4	Pumpen hoher Gaslasten	526
7	Betrieb und Wartung von Turbomolekularpumpen	528
7.1	Wahl der Vorpumpe	528
7.2	Allgemeine Hinweise	528
7.3	Einschalten	528
7.4	Erreichen des Basisdruckes	529
7.5	Betrieb in Magnetfeldern	529
7.6	Belüften	529
7.7	Wartung	529
8	Anwendungen	530
	Literatur	532
20	Passive Sorptionspumpen	535
	Karl Jousten und Paolo Manini	
1	Einleitung	535
2	Adsorptionspumpen	536
2.1	Wirkungsweise	536
2.2	Aufbau	538

2.3	Endvakuum und Saugvermögen	539
2.4	Arbeits- und Betriebshinweise	543
3	Getter	544
3.1	Wirkungsweise und Getterarten	544
3.2	NEG-Pumpen	546
3.3	Verdampferpumpen	561
	Literatur	573
21	Aktive Sorptionspumpen	575
	Karl Jousten	
1	Einleitung	575
2	Ionenzerstäuberpumpen	576
2.1	Wirkungsweise	576
2.2	Technischer Aufbau (Diodentyp)	580
2.3	Saugvermögen	581
2.4	Die differenzielle Diodenpumpe	584
2.5	Die Triodenpumpe	585
2.6	Lineare Zerstäuberpumpen (Distributed ion pump)	586
2.7	Restgasspektrum	587
2.8	Arbeitstechnik	589
3	Die Orbitronpumpe	591
	Literatur	592
22	Kryotechnik und Kryopumpen	595
	Christian Day	
1	Einleitung	595
2	Kühlverfahren	596
2.1	Gaskälteverfahren	597
2.2	Kryostate mit flüssigen Kältemitteln	604
2.3	Messung tiefer Temperaturen	606
3	Arbeitsprinzipien von Kryopumpen	606
3.1	Gaskondensation	608
3.2	Kryosorption	611
4	Auslegung von Kryopumpen	617
4.1	Kryotechnisch konstruktive Merkmale	617
4.2	Vakuumtechnisch konstruktive Merkmale	625
4.3	Konstruktionsprinzipien	627
	Literatur	633
23	Kenngrößen und Anwendungen von Kryopumpen	635
	Christian Day	
1	Einleitung	635
2	Startdruck	636
3	Enddruck	637
4	Saugvermögen	638

5	Standzeit	639
6	Kapazität (maximale Gasaufnahme)	641
7	Cross-over-Wert	641
8	Maximal zulässiger p V -Durchfluss	641
9	Beständigkeit gegen thermische Strahlung	641
10	Regeneration	642
11	Leistungsvergleich	643
12	Anwendungsbeispiele	644
12.1	Die Refrigerator-Kryopumpe	645
12.2	Kryopumpen mit Zwangskühlung durch superkritisches Helium	645
12.3	Kombinierte Refrigerator/Flüssig-Kryopumpen	647
12.4	Kryopumpen mit zwangsgeführter Flüssigkühlung	648
12.5	Kryopumpen in Großforschungsanwendungen	650
12.6	Kryopumpen in industriellen Anlagen	651
12.7	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe	651
	Literatur	652
24	Vakuummessgeräte vom Grob- bis Hochvakuum	655
	Karl Jousten	
1	Einleitung	655
2	Mechanische Vakuummeter	658
2.1	Prinzip und Einteilung	658
2.2	Plattenfedervakuummeter	659
2.3	Kapselfedervakuummeter	659
2.4	Röhrenfedervakuummeter	661
2.5	Membranvakuummeter	663
2.6	Druckschalter und Druckregler	674
3	Gasreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge)	675
3.1	Messanordnung und Messprinzip	676
3.2	Bremmung durch Gasreibung	678
3.3	Durchführung der Messung	683
3.4	Erweiterung des Messbereichs zu höheren Drücken	684
3.5	Messunsicherheit	685
4	Direkte elektrische Druckmessumformer	686
5	Wärmeleitungsvakuummeter	686
5.1	Prinzip	686
5.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur	690
5.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung	694
5.4	Gepulste Wärmeleitungsvakuummeter	696
5.5	Thermoelementvakuummeter (Thermocouple)	697
5.6	Thermistoren	697

5.7	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern	698
6	Gasflussmessgeräte	700
	Literatur	702
25	Ionisationsvakuummeter	705
	Karl Jousten	
1	Prinzip und Einteilung	705
2	Geschichtliche Entwicklung der Ionisationsvakuummeter	706
3	Ionisationsvakuummeter mit Emissionskathode	708
3.1	Messprinzip	708
3.2	Aufbau der Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	712
3.3	Konzentrische Triode	712
3.4	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter	713
3.5	Ionisationsvakuummeter nach Bayard und Alpert	715
3.6	Extraktor-Ionisationsvakuummeter	719
3.7	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	723
3.8	Betriebshinweise für Emissionskathoden- Ionisationsvakuummeter	724
4	Ionisationsvakuummeter mit gekreuzten elektromagnetischen Feldern	725
4.1	Penning-Vakuummeter	725
5	Vergleichende Betrachtung zwischen den beiden Arten von Ionisationsvakuummetern	732
6	Allgemeine Hinweise	734
7	Kombinationsmessgeräte	739
	Literatur	740
26	Partialdruckmessung	743
	Karl Jousten und Robert Ellefson	
1	Einleitung	743
2	Partialdruckmessgeräte (Massenspektrometer)	744
2.1	Ionenquellen	749
2.2	Heizfaden-Materialien	754
2.3	Ionenquellenbedingte Artefakte im Massenspektrum	755
2.4	Massen-Analysatoren	757
2.5	Ionenfallen-Massenspektrometer	767
2.6	Ionendetektoren	769
2.7	Steuersoftware für Massenspektrometer	774
2.8	Weitere Einsatzmöglichkeiten von Massenspektrometern	776
3	Partialdruckmessung mit optischen Methoden	777
	Literatur	779

27	Leckdetektoren	783
	Werner Große-Bley	
1	Grundprinzipien und geschichtliche Entwicklung	783
2	Leckdetektoren für Druckanstiegsmethode	784
2.1	Allgemeines	784
2.2	Druckanstiegsleckdetektor mit Folienkammer	784
3	Heliumleckdetektoren	785
3.1	Allgemeines	785
3.2	Anforderungen und Grundfunktion bei der Vakuumlecksuche	785
3.3	Heliumsektorfeldmassenspektrometer	786
3.4	Einlassdruck von Heliumleckdetektoren	788
3.5	Zeitverhalten von Heliumleckdetektoren	788
3.6	Arbeitsprinzipien von Heliumleckdetektoren	789
3.7	Schnüffleinrichtungen für Heliumleckdetektoren	795
3.8	Anwendungsfelder der massenspektrometrischen Heliumleckdetektoren	795
4	Kältemittelleckdetektoren	796
4.1	Aufbau und Funktion	796
4.2	Anwendungsfelder	797
5	Prüflecks	799
5.1	Permeationslecks	799
5.2	Leitwertlecks	800
5.3	Praktische Ausführungen von Prüflecks	800
6	Messeigenschaften und Kalibrierung/Justierung von Leckdetektoren	801
6.1	Leckdetektoren als Prüfmittel im Sinne der DIN/EN/ISO 9001	801
6.2	Unsicherheit der Kalibrierung/Justierung	802
7	Leckdetektoren mit anderen Sensorprinzipien	803
7.1	Heliumschnüffler mit Quarzglasmembrane	803
7.2	Halogenleckdetektoren mit Alkali-Ionen- Sensor	803
7.3	Halogenleckdetektoren mit Infrarot-Sensor	804
	Literatur	805
28	Primärnormale für das Vakuum	807
	Karl Jousten	
1	Das internationale Einheitensystem	807
2	Primärnormale für Vakuum: Überblick	808
3	Flüssigkeitsmanometer	811
4	Kompressionsmanometer nach McLeod	814
5	Drehkolbenmanometer und Druckwaagen	817
6	Statisches Expansionsverfahren	819
7	Kontinuierliches Expansionsverfahren	826

8	Sonstige Primärnormale	833
	Literatur	835
29	Kalibrierung von Vakuummessgeräten	839
	Karl Jousten	
1	Einleitung	839
2	Das Vergleichsmessverfahren	841
2.1	Kapazitätsvakuummeter	842
2.2	Gasreibungsvakuummeter	847
2.3	Ionisationsvakuummeter	850
3	Kalibrierungen von Partialdruckmessgeräten	852
4	Kalibrierungen von Standardlecks	854
	Literatur	858
30	Normen der Vakuumtechnik	861
	Karl Jousten	
1	Normen für Bezeichnungen	861
2	Geometrische Normen	861
3	Normen für Vakuumpumpen	862
4	Normen der Vakuummessung	872
5	Tabelle der Normen	872
	Literatur	872
31	Werkstoffe in der Vakuumtechnik	873
	Karl Jousten	
1	Anforderungen und Überblick über die Werkstoffe	873
2	Werkstoffe der Vakuumtechnik	874
2.1	Metalle	874
2.2	Technische Gläser	881
2.3	Keramische Werkstoffe	885
2.4	Kunststoffe	887
2.5	Vakuurfette	889
2.6	Öle	890
2.7	Kühlmittel	890
3	Gasdurchlässigkeit und Gasabgabe von Werkstoffen	890
3.1	Allgemeines	890
3.2	Gasdurchlässigkeit	891
3.3	Gasabgabe	897
	Literatur	906
32	Verbindungen der Vakuumtechnik	909
	Ute Bergner	
1	Einleitung	909
2	Verbindungstechnologien in der Vakuumtechnik	910
2.1	Unlösbare Verbindungen	910
2.2	Lösbare Verbindungen	924
	Literatur	939

33 Bauelemente der Vakuumtechnik	941
Ute Bergner	
1 Einleitung	941
2 Vakuumhygiene	942
3 Komponenten	947
3.1 Standardkomponenten und Kammern	947
3.2 Mechanische Durchführungen	956
3.3 Ventile	958
4 Elektrische Durchführungen	965
4.1 Isolierwerkstoffe	966
4.2 Elektrische Durchführungen mit Aluminiumoxidkeramik	966
4.3 Elektrische Durchführungen mit Glas oder Glaskeramik	967
4.4 Elektrische Durchführungen	968
4.5 Elektrische Parameter und ihr Einfluss auf die Bauart von Durchführungen	969
5 Optische Durchführungen [25]	972
5.1 Schaugläser	973
5.2 Optische Faserdurchführungen (OFD)	974
6 Wärmezu- und -ableitung	976
6.1 Temperaturmessung im Vakuum	976
6.2 Prozesswärme zuführen und abführen	977
6.3 Konditionierung von Vakuumanlagen und Schutz vor Ablagerungen	978
Literatur	982
34 Berechnung und Regelung von Vakuumsystemen	985
Karl Jousten und Uwe Meissner	
1 Elektronische Anbindung von Vakuumsystemen	985
1.1 Überwachung durch Prozesssensoren und automatisierte Datenauswertung	985
1.2 Integrationslösungen	988
2 Berechnung von Vakuumsystemen	995
2.1 Analytische und numerische Berechnung	995
2.2 Berechnung mit Netzwerken	996
2.3 End- und Arbeitsdruck in Vakuumsystemen	999
3 Druckregelung	1004
Literatur	1005
35 Arbeitstechnik im Grob- und Feinvakuum	1007
Karl Jousten	
1 Überblick	1007
2 Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur	1009
3 Pumpen, Art und Saugvermögen	1010

4	Pumpstände für Grobvakuum	1011
5	Dichtungen	1012
6	Druckmessung im Grobvakuum	1013
7	Druck und Auspumpzeit im Grobvakuum	1013
8	Belüften	1018
9	Arbeitstechnik im Feinvakuum	1019
9.1	Überblick	1019
9.2	Aufbau einer Feinvakuum-Apparatur	1020
9.3	Pumpen: Art und Saugvermögen	1020
9.4	Druckmessung	1021
9.5	Auspumpzeit und Enddruck	1021
9.6	Belüften	1025
9.7	Feinvakuumpumpstände	1026
36	Arbeitstechnik im Hochvakuum	1031
	Karl Jousten	
1	Pumpen: Art und Saugvermögen	1031
2	Reinigung der Vakuummeter	1032
3	Hochvakuum-pumpstände	1033
3.1	Hochvakuum-pumpstand mit Diffusionspumpe	1034
3.2	Hochvakuum-pumpstand mit Turbomolekularpumpe	1041
3.3	Der vollautomatische Hochvakuum-pumpstand	1045
4	Auspumpzeit	1046
37	Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum	1049
	Karl Jousten	
1	Überblick	1049
2	UHV-Pumpen: Betriebshinweise	1050
2.1	Adsorptionspumpen	1051
2.2	Ionenzerstäuberpumpen	1051
2.3	Titanverdampferpumpen	1052
2.4	Turbomolekularpumpen	1053
2.5	Kryopumpen	1053
2.6	Volumengetter-(NEG-)Pumpen	1054
3	Dichtungen	1054
4	Druckmessung	1054
5	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik	1055
6	Belüften	1056
7	Ultrahochvakuum-Systeme	1056
8	Ultrahochvakuum-(UHV-)Bauelemente	1056
9	Ultrahochvakuum-(UHV-)Pumpstände	1056
9.1	Ultrahochvakuum-(UHV-)Großanlagen	1060
	Literatur	1063

38 Lecksuchtechniken	1065
Werner Große-Bley	
1 Überblick	1065
1.1 Vakuumlecksuche	1066
1.2 Überdrucklecksuche	1067
1.3 Prüfgasverteilung vor einem Leck in der Atmosphäre	1068
1.4 Messergebnisse mit der Schnüffelmethode	1069
1.5 Prüfgase	1071
2 Eigenschaften von Lecks	1072
2.1 Leckagerate, Einheiten	1072
2.2 Leckarten	1073
2.3 Eigenschaften von Porenlecks	1074
3 Überblick über die Lecksuchverfahren (siehe auch DIN EN 1779)	1080
3.1 Allgemeine Hinweise zur Dichtheitsprüfung	1080
3.2 Verfahren ohne Prüfgas (Druckprüfungen)	1081
3.3 Verfahren mit Prüfgas	1085
4 Lecksuchverfahren mit Heliumleckdetektoren	1088
4.1 Eigenschaften des Heliumleckdetektors	1088
4.2 Prüfung von Komponenten	1089
4.3 Prüfung von Vakuumanlagen	1093
4.4 Überdruck-(Schnüffel-)Lecksuche mit dem Heliumleckdetektor	1098
5 Lecksuchverfahren mit anderen Prüfgasen als Helium	1100
5.1 Allgemeines	1100
5.2 Schnüffellecksuche an Kälte-/Klimaanlagen	1100
6 Industrielle Dichtheitsprüfung von Bauteilen in der Serienfertigung	1101
6.1 Allgemeines	1101
6.2 Industrielle Prüfung von Serienbauteilen	1102
6.3 Prüfung von hermetisch verschlossenen Komponenten durch Drucklagerung („Bombing“, Methode B5 in DIN EN 1779)	1104
6.4 Prüfung von Lebensmittelverpackungen in der Folienprüfkammer	1105
Literatur	1106
Produktmatrix	1107
Sachverzeichnis	1115