

Max Wutz
Hermann Adam
Wilhelm Walcher

THEORIE UND PRAXIS DER **VAKUUMTECHNIK**

Mit 417 Bildern und 74 Tabellen
im Text und Anhang

5., vollständig bearbeitete
und erweiterte Auflage



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Die Entwicklung der Vakuumtechnik	1
1.2	Bedeutung und Aufgabe der heutigen Vakuumtechnik	5
1.3	Literatur	8
2	Gasgesetze, Grundlagen der kinetischen Gastheorie und Gasdynamik	10
2.1	Die Zustandsgrößen eines Gases	10
2.2	Mengengrößen, mengenbezogene Größen	12
2.3	Die Gesetze des idealen Gases	14
2.3.1	Einkomponentige Gase	14
2.3.2	Gasgemische (Mehrkomponentige Gase)	18
2.4	Grundlagen der kinetischen Theorie der Materie, insbesondere im gasförmigen Zustand	20
2.4.1	Grundlagen des Modells des idealen Gases	20
2.4.2	Das vereinfachte Modell von Krönig	20
2.4.3	Die Häufigkeitsverteilung (Wahrscheinlichkeitsverteilung) der Geschwindigkeiten (Geschwindigkeitsverteilung)	22
2.4.4	Geschwindigkeitsmittelwerte	25
2.4.5	Wandstromdichte (= Flächenstoßrate DIN 28 400) und Effusion	25
2.4.6	Gleichverteilung der Energie. Wärmekapazität gasförmiger und fester Stoffe	27
2.4.7	Mittlere freie Weglänge. Stoßrate	28
2.5	Transportvorgänge	31
2.5.1	Diffusion	31
2.5.2	Innere Reibung in Gasen	32
2.5.3	Wärmeleitung in Gasen	35
2.5.3.1	Wärmeleitfähigkeit, Definition	35
2.5.3.2	Wärmeleitfähigkeit	36
2.5.3.3	Vergleich der Wärmeleitfähigkeit mit der dynamischen Viskosität	39
2.5.3.4	Wärmeleitung in der Zylindergeometrie bei niedrigen Drücken	39
2.5.3.5	Nachbemerkung	40
2.6	Dämpfe. Verdampfung und Kondensation	40
2.6.1	Dampfdruck	40
2.6.2	Zustandsgleichung	41
2.6.3	Flächenbezogene Verdampfungsrate	42
2.7	Gasdynamik	45
2.7.1	Anwendungsbereich	45
2.7.2	Bernoulli-Gleichung	45
2.7.3	Kritische Größen, Schallgeschwindigkeit, Machzahl	50
2.7.4	Eindimensionale Strömung	52
2.7.5	Der Verdichtungsstoß	53
2.7.6	Hugoniot-Gleichung	55
2.7.7	Das Ruhedruckverhältnis \hat{p}_0/p_0	56
2.7.8	Der schräge Verdichtungsstoß	57
2.7.9	Strömungsformen in und hinter Lavaldüsen bei verschiedenen „Gegendrücken p_A “	57
2.7.10	Zweidimensionale Strömung um eine Ecke (Prandtl-Meyer)	59
2.8	Literatur	61

4.7	Strömung im Feinvakuum	128
4.7.1	Kennzeichnung der Strömung im Feinvakuumbereich	128
4.7.2	Rohrströmung im Feinvakuumbereich	129
4.8	Strömung bei Temperaturdifferenz zwischen zwei Kesseln/Rezipienten/ Gefäßen. Thermische Effusion	131
4.9	Messung von Strömungsleitwerten	133
4.9.1	Notwendigkeit der Messung	133
4.9.2	Molekularer Strömungsbereich	133
4.9.2.1	Kennleitwert und Einbauleitwert	133
4.9.2.2	Meßanordnung	134
4.9.2.3	Leitwertmessung an Ventilen	137
4.9.2.4	Ähnlichkeitsbetrachtungen	138
4.9.3	Messung von Leitwerten im gesamten Vakuumbereich	138
4.10	Literatur	140
5	Verdrängerpumpen	142
5.0	Übersicht	142
5.1	Oszillations-Verdrängerpumpen	142
5.2	Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	143
5.2.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	145
5.2.2	Arbeitsbereich und Saugvermögen	146
5.2.3	Zwei- und mehrstufige Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	148
5.2.4	Kombination mit einer Gasstrahlpumpe	149
5.2.5	Allgemeine Betriebshinweise	150
5.3	Ölgedichtete Rotations-Vakuumpumpen	151
5.3.1	Drehschieberpumpen	152
5.3.1.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	152
5.3.2	Sperrschieberpumpen	155
5.3.2.1	Wirkungsweise und technischer Aufbau	155
5.3.2.2	Massenausgleich	159
5.3.3	Weitere technische Hinweise	162
5.3.4	Trochoidenpumpen	162
5.3.4.1	Wirkungsweise	163
5.3.4.2	Technischer Aufbau	164
5.3.4.3	Vergleich mit anderen Verdrängerpumpen	164
5.3.5	Saugvermögen und erreichbarer Enddruck ölgedichteter Verdrängerpumpen	165
5.3.5.1	Saugvermögen und Enddruck ohne Öleinfluß	165
5.3.5.2	Saugvermögen und Enddruck mit Öleinfluß	167
5.3.6	Abpumpen von Dämpfen – Gasballast	169
5.3.7	Ölrückströmung	173
5.3.8	Leistungsbedarf	174
5.3.8.1	Isotherme Kompression	175
5.3.8.2	Adiabatische Kompression	175
5.3.8.3	Polytrope Kompression	176
5.3.8.4	Kompressionsleistung	176
5.3.9	Betriebshinweise	178
5.3.9.1	Aufstellung und elektrischer Anschluß	178
5.3.9.2	An- und Abstellen, Saugstutzenventile	179
5.3.9.3	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise	180
5.3.9.4	Ölfilter und Öltreinigung	182
5.3.9.5	Auspuff-Filter (Ölnebelabscheider)	183
5.3.9.6	Staubfilter	184

5.4	Wälzkolbenpumpen (Rootspumpen)	185
5.4.1	Wirkungsweise	186
5.4.2	Technischer Aufbau	187
5.4.3	Theoretische Grundlagen	188
5.4.3.1	Der effektive Gasstrom	189
5.4.3.2	Kompressionsverhältnis K_0 bei Nulldurchsatz	190
5.4.3.3	Effektives Kompressionsverhältnis und volumetrischer Wirkungsgrad	191
5.4.4	Abstufung des Saugvermögens Vorpumpe/Wälzkolbenpumpe	194
5.4.4.1	Abstufung bei niedrigen Ansaugdrücken	195
5.4.4.2	Abstufung bei hohen Ansaugdrücken	195
5.4.5	Saugvermögen und Enddruck	197
5.4.5.1	Saugvermögen und Enddruck mit ölgedichteten Vorpumpen	197
5.4.5.2	Saugvermögen und Enddruck mit Flüssigkeitsring-	
	vakuumpumpen als Vorpumpen	199
5.4.5.3	Mehrstufige Pumpkombinationen	200
5.4.6	Leistungsbedarf	202
5.4.7	Installation und Betriebshinweise	203
5.4.8	Auswahl der Pumpen und Arbeitshinweise	204
5.5	Trocken verdichtende Vakuumpumpen	206
5.5.1	Notwendigkeit von Trockenläufern	206
5.5.2	Konstruktionsprinzipien	206
5.5.3	Hubkolbentrockenläufer	206
5.5.4	Klauenpumpen (Drehzahnpumpen)	207
5.6	Literatur	209
6	Treibmittelpumpen	212
6.1	Einleitung, Übersicht	212
6.2	Flüssigkeitsstrahlpumpen	214
6.3	Dampf- und Gasstrahl-Vakuumpumpen	215
6.4	Diffusionspumpen	222
6.4.1	Arbeitsweise	222
6.4.2	Treibmittel	224
6.4.3	Dampfsperren (Baffles) und Fallen	224
6.4.4	Fraktionieren, Entgasen	225
6.4.5	Kohlenwasserstofffreies Vakuum	226
6.4.6	Saugvermögen, Vorvakuumbeständigkeit, Hybridpumpen	227
6.4.7	Berechnung der Funktionsgrößen von Diffusions- und Dampfstrahlpumpen anhand eines einfachen Pumpenmodells	230
6.4.8	Quantitative Betrachtungen an einer Quecksilber-Diffusionspumpe	238
6.5	Diffusionspumpen – Dampfstrahlpumpen	239
6.6	Literatur	242
7	Molekularpumpen	243
7.1	Einleitung	243
7.2	Molekularpumpen	243
7.3	Turbomolekularpumpen	247
7.3.1	Entwicklung	247
7.3.2	Aufbau	249
7.3.3	Pumpmechanismus	251
7.3.4	Konstruktive Varianten. Compoundpumpen	253

7.3.4.1	Anwendungsbedingte Anforderungen an die Konstruktion ..	253
7.3.4.2	Lagervarianten für einflutige Pumpen	253
7.3.4.3	Compoundpumpen (auch Hybridpumpen genannt)	253
7.4	Theorie der einstufigen Pumpe	256
7.5	Leistungsdaten von Turbomolekularpumpen	258
7.5.1	Saugvermögen	260
7.5.2	Kompressionsverhältnis	262
7.5.3	Auspumpverhalten	263
7.5.4	Restgaszusammensetzung und Enddruck	266
7.6	Betriebshinweise	267
7.6.1	Wahl der Vorpumpe	267
7.6.2	Allgemeine Hinweise	268
7.6.3	Inbetriebnahme	268
7.6.4	Belüften	268
7.6.5	Ausheizen	269
7.6.6	Betrieb in Magnetfeldern	270
7.6.7	Wartung	270
7.7	Anwendungen	270
7.8	Literatur	271
8	Sorptionspumpen	273
8.1	Adsorptionspumpen	274
8.1.1	Wirkungsweise	274
8.1.2	Aufbau	276
8.1.3	Endvakuum und Saugvermögen	277
8.1.3.1	Endvakuum mit einer Adsorptionspumpe	277
8.1.3.2	Endvakuum mit zwei oder mehr Adsorptionspumpen	280
8.1.3.3	Verbesserung des Endvakuums durch Vorevakuieren oder Füllen mit einem Fremdgas	282
8.1.3.4	Endvakuum bei Berücksichtigung der Wanddesorption	282
8.1.3.5	Saugvermögen	283
8.1.4	Betriebs- und Arbeitshinweise	283
8.2	Gasaufzehrung durch Getter	284
8.2.1	Wirkungsweise	284
8.2.2	Getterarten	285
8.2.2.1	Volumengetter (NEG)	285
8.2.2.2	Verdampfungsgetter	289
8.2.3	Saugvermögen (Gettergeschwindigkeit)	290
8.2.4	Getterkapazität	293
8.2.5	Getterpumpen	293
8.2.5.1	Volumengetterpumpen	293
8.2.5.2	Verdampfergetterpumpen	295
8.2.6	Ionengetterpumpen	299
8.2.6.1	Wirkungsweise	299
8.2.6.2	Die Orbitronpumpe	300
8.3	Ionenzerstäuberpumpen	301
8.3.1	Wirkungsweise	301
8.3.2	Technischer Aufbau	303
8.3.3	Saugvermögen	304
8.3.4	Die Triodenpumpe	306
8.3.5	Restgasspektrum	308
8.3.6	Standardeinrichtung zur Messung des Saugvermögens	309
8.3.7	Arbeitstechnik	310
8.4	Literatur	313

9	Kondensatoren	315
9.1	Kondensatoren als Vakuumpumpen	315
9.1.1	Grundlagen	315
9.1.2	Leistung von Kondensatoren	317
9.1.3	Stromstärken und Partialdrücke	320
9.1.4	Kühlmittel	324
9.2	Bauarten von Kondensatoren	324
9.2.1	Oberflächenkondensatoren für Flüssigkondensation	324
9.2.2	Mischkondensatoren	326
9.2.3	Kondensatausschleusung	326
9.2.4	Oberflächenkondensatoren zur Festkondensation	327
9.3	Kondensatoren in Kombination mit Vakuumpumpen	328
9.4	Berechnung von Kondensator-Pumpen-Kombinationen	329
9.4.1	Rechengang	329
9.4.2	Berechnungsbeispiele	330
9.5	Literatur	334
10	Kryotechnik und Kryopumpen	335
10.1	Einleitung	335
10.2	Kühlverfahren	336
10.2.1	Begriffe und Hauptsätze der Thermodynamik	336
10.2.2	Spezielle Kühlprozesse	338
10.2.2.1	Joule-Thomson-Entspannung; Linde-Verfahren	338
10.2.2.2	Expansionsmaschinen	340
10.2.2.3	Claude-Verfahren	341
10.2.2.4	Stirling-Verfahren	342
10.2.2.5	Gifford-McMahon-Verfahren	343
10.2.3	Allgemeine Kriterien für Kälteanlagen	343
10.3	Stoffeigenschaften bei tiefen Temperaturen	345
10.3.1	Kältemittel	345
10.3.2	Werkstoffe	350
10.4	Temperaturmessung	353
10.4.1	Temperaturskalen	353
10.4.2	Dampfdruckthermometer	354
10.4.3	Widerstandsthermometer	356
10.4.4	Halbleiter-Dioden	357
10.4.5	Kapazitives Thermometer	357
10.4.6	Thermoelemente	358
10.4.7	Kontaktieren von Temperaturmeßfühlern	359
10.4.8	Kalibrieren von Sekundärthermometern	360
10.5	Kryostatentechnik	360
10.5.1	Kryostate	361
10.5.2	Vakuumisolierte Leitungen	364
10.5.3	Nachfüllvorrichtungen	364
10.5.4	Kältemittelverluste	368
10.6	Kryopumpen	374
10.6.1	Die Bindung von Gasen an Kaltflächen	374
10.6.1.1	Gaskondensation	375
10.6.1.2	Kryotrapping und Kryosorption	375
10.6.2	Kenngrößen einer Kryopumpe	378
10.6.2.1	Startdruck p_{St}	378
10.6.2.2	Enddruck p_{end}	378

10.6.2.3	Saugvermögen S	380
10.6.2.4	Standzeit t_B	381
10.6.2.5	Kapazität (maximale Gasaufnahme) C	381
10.6.2.6	Wärmeübertragung auf die Kaltfläche	382
10.6.2.7	Wärmeleitfähigkeit der Kondensate	382
10.6.2.8	Wachstumsgeschwindigkeit der Kondensatschicht	383
10.6.2.9	„cross over“-Wert	385
10.6.2.10	Maximal zulässiger pV -Durchfluß	385
10.6.3	Konstruktionsprinzipien	385
10.6.3.1	Bad-Kryopumpen	385
10.6.3.2	Verdampfer-Kryopumpen	387
10.6.3.3	Kryopumpen mit Kältemaschine (Refrigerator-Kryopumpen)	388
10.6.4	Anwendungsbeispiele	391
10.6.4.1	Kryopumpen in der Kernfusionstechnik	392
10.6.4.2	Kryopumpen in der Raumfahrttechnik	393
10.6.4.3	Kryopumpen in Teilchenbeschleunigern	393
10.6.4.4	Kryopumpen in industriellen Anlagen	394
10.6.4.5	Kryopumpen für UHV-Anlagen	394
10.6.5	Entwicklungstendenzen für die Kryopumpe	395
10.7	Literatur	396
11	Vakuummessgeräte und Lecksuchgeräte	400
11.0	Vorbemerkung	400
11.1	Druck- und Teilchenanzahldichte; Übersicht	400
11.2	Mechanische Vakuummeter	401
11.2.1	Prinzip und Einteilung	401
11.2.2	Röhrenfedervakuummeter	402
11.2.3	Kapselfedervakuummeter	402
11.2.4	Membranvakuummeter	403
11.2.5	Kapazitive Druckmessung; Kapazitätsvakuummeter	405
11.2.5.1	Der Druckaufnehmer	406
11.2.5.2	Betriebshinweise	408
11.2.5.3	Das Kapazitätsvakuummeter als sekundäres Drucknormal	408
11.2.6	Reibungsvakuummeter mit rotierender Kugel	409
11.2.6.1	Meßanordnung und Meßprinzip	411
11.2.6.2	Bremmung durch Gasreibung	411
11.2.6.3	Durchführung der Messung	414
11.2.6.4	Grenzen des Meßbereichs	416
11.2.6.5	Fehlerquellen. Unsicherheit des Meßergebnisses	417
11.2.7	Druckschalter und Druckregler	419
11.3	Flüssigkeitsmanometer	421
11.3.1	Offenes Flüssigkeitsmanometer	421
11.3.2	U-Rohr-Manometer (geschlossenes Flüssigkeitsmanometer)	422
11.3.3	Kompressions-Vakuummeter nach McLeod	423
11.3.3.1	Betriebshinweise und Störeffekte	425
11.4	Wärmeleitungsvakuummeter	427
11.4.1	Prinzip	427
11.4.2	Betriebsweise	429
11.4.3	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Drahttemperatur	429
11.4.4	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizung (Pirani)	431
11.4.5	Hinweise zur Verwendung von Wärmeleitungsvakuummetern	433
11.5	Ionisationsvakuummeter	434
11.5.1	Prinzip und Einteilung	434

11.5.2	Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	437
11.5.2.1	Konzentrische Triode	438
11.5.2.2	Feinvakuum-Ionisationsvakuummeter	439
11.5.2.3	Bayard-Alpert-Vakuummeter	440
11.5.2.4	Extraktor-Ionisationsvakuummeter	441
11.5.2.5	Andere Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter	443
11.5.3	Kalkathoden-Ionisationsvakuummeter	443
11.5.3.1	Penning-Vakuummeter	443
11.5.3.2	Andere Kalkathodenvakuummeter	448
11.5.4	Allgemeine Hinweise	448
11.6	Partialdruckmeßgeräte	449
11.6.1	Allgemeines	449
11.6.2	Magnetisches Sektorfeld-Massenspektrometer	451
11.6.3	Omegatron	453
11.6.4	Quadrupol-Massenspektrometer	455
11.7	Lecksuchgeräte	460
11.7.1	Allgemeines	460
11.7.2	He-Massenspektrometer-Lecksuchgeräte	461
11.7.2.1	He-Massenspektrometer	461
11.7.2.2	Gasführungssysteme	462
11.7.2.3	Testgasstrom, Einstellzeit, maximaler Luftstrom (Hauptstromprinzip)	465
11.7.3	Technische Ausführungen von Massenspektrometer- Heliumlecksuchgeräten	466
11.8	Kalibrieren von Vakuummetern	467
11.8.1	Grundlagen	467
11.8.2	Kalibrieren durch Vergleichsmessung	468
11.8.3	Bestimmung des Druckes durch statische Expansion	468
11.8.4	Dynamische Kalibrieranordnungen	470
11.8.5	Erzeugung von Kalibrierdrücken im Bereich 10^{-12} mbar bis 10^{-8} mbar mittels Molekularstrahlmethode	471
11.8.6	Druckskalen	472
11.9	Literatur	473
12	Lecksuchtechnik	477
12.1	Überblick	477
12.1.1	Größe eines Lecks. Leckrate	477
12.1.2	Leckarten	481
12.1.2.1	Porenlecke	481
12.1.2.2	Lecke in lösbaren und nichtlösbaren Verbindungen	482
12.1.2.3	Virtuelle oder scheinbare Lecke	482
12.1.3	Lecksuchverfahren	482
12.2	Überdruckverfahren	483
12.2.1	Überdrucklecksuche durch Druckabfallmessung	483
12.2.2	Überdrucklecksuche durch Blasentest	484
12.2.3	Überdrucklecksuche durch Seifenblasentest	484
12.2.4	Überdrucklecksuche durch Abdrücken mit Flüssigkeiten	484
12.2.5	Überdrucklecksuche mit chemischen Verfahren	485
12.2.6	Überdrucklecksuche mit Helium (Schnüffelprinzip)	485
12.2.7	Kritische Wertung der Lecksuchmethoden mit Überdruck	489
12.3	Lecksuchverfahren bei Vakuum	489
12.3.1	Druckanstiegsmessung	490
12.3.2	Seifenblasentest	492

12.3.3	Unterdrucklecksuche mit Hochfrequenzvakuumprüfer	492
12.3.4	Unterdrucklecksuche mit dem Heliumlecksucher (Leckdetektor)	493
12.4	Testlecke für Lecksuchgeräte	493
12.4.1	Testlecke ohne Gasvorrat (Kapillarleck)	494
12.4.2	Testlecke mit Heliumvorrat (Diffusionsleck)	495
12.4.3	Kalibrieren von He-Testlecken	496
12.5	Allgemeine Hinweise für die Lecksuche	497
12.6	Lecksuchtechnik in der Serienfertigung	499
12.6.1	Industrielle Dichtheitsprüfung	499
12.6.2	Anforderungen an eine Dichtheitsprüfanlage	500
12.6.3	Aufbau einer Helium-Dichtheitsprüfanlage	500
12.6.4	Vollautomatische (integrale) Lecksuche	501
12.6.5	(Halbautomatische) lokalisierende Lecksuche	501
12.6.6	Dichtheitsprüfung kleiner Massengüter	501
12.6.7	Anwendungsbereiche	502
12.7	Literatur	502
13	Werkstoffe	504
13.1	Allgemeine Gesichtspunkte und Einteilung	504
13.1.1	Anforderungen und Auswahl	504
13.1.2	Einteilung der Werkstoffe (nach ihrer Verwendung)	505
13.2	Die Werkstoffe im einzelnen	505
13.2.1	Metalle	505
13.2.1.1	Aufbau und Herstellung	505
13.2.1.2	Die wichtigsten Metalle Normalstahl, Edelstahl, Stahl-Sonderlegierungen, Titan, Aluminium, Kupfer, Quecksilber, Silber und Gold, Indium	506
13.2.2	Technische Gläser	509
13.2.2.1	Allgemeines	509
13.2.2.2	Eigenschaften der wichtigsten Gläser Weichgläser, Hartgläser, Quarzglas, Sinterglas, Auskristallisierte Gläser	510
13.2.2.3	Verwendung von Glas in der Vakuumtechnik	513
13.2.3	Keramische Werkstoffe	513
13.2.3.1	Allgemeines	513
13.2.3.2	Eigenschaften der wichtigsten keramischen Werkstoffe Silikat-Keramiken, Reinoxid-Keramiken, Glaskeramik, Saphir	514
13.2.3.3	Verwendung von Keramik in der Vakuumtechnik	514
13.2.3.4	Zeolith	515
13.2.4	Kunststoffe	515
13.2.4.1	Allgemeines	515
13.2.4.2	Eigenschaften der wichtigsten Kunststoffe Elastomere, Thermoplaste, Duroplaste	515
13.2.5	Fette	517
13.2.6	Öle	517
13.2.7	Gase	517
13.2.8	Kühlmittel	518
13.3	Gasdurchlässigkeit	518
13.3.1	Gasdurchlässigkeit von Metallen	519
13.3.2	Gasdurchlässigkeit von Gläsern und Keramiken	520
13.3.3	Gasdurchlässigkeit von Kunststoffen	521
13.4	Gasabgabe	522
13.4.1	Sättigungsdampfdruck	522
13.4.2	Desorption von der Oberfläche	524

13.4.3	Diffusion aus dem Inneren	525
13.4.4	Diffusion aus dem Inneren und Permeation	528
13.4.5	Richtwerte für die Gesamtgasabgaberate	530
13.4.6	Gesetzmäßigkeiten für die Gasabgabe von Werkstoffen im Vakuum ..	530
13.5	Literatur	532
14	Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen	533
14.1	Nichtlösbare Verbindungen	533
14.1.1	Schweißverbindungen	533
14.1.2	Lötverbindungen	536
14.1.3	Verschmelzungen	538
14.1.4	Verbindungen mit Metallisierung	540
14.1.5	Verbindungen durch Kleben	541
14.2	Lösbare Verbindungen	541
14.2.1	Dichtungsmittel	541
14.2.2	Kraftbedarf	542
14.2.3	Schliffe	543
14.2.4	Flanschverbindungen	544
14.2.4.1	Kleinflanschverbindungen	544
14.2.4.2	Schraubflanschverbindungen	545
14.2.4.3	Steckverbindungen	548
14.3	(Vakuum-)Behälter	548
14.3.1	Bemessung der Wanddicke	548
14.3.2	Doppelwandige Behälter	550
14.4	Durchführungen	551
14.4.1	Mechanische Durchführungen	551
14.4.2	Stromdurchführungen	552
14.4.3	Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase	554
14.4.4	Einblickfenster (Schaugläser)	554
14.4.5	Schmierer im Vakuum	555
14.5	Flexible Verbindungsstücke	555
14.6	Absperrorgane (Ventile)	556
14.6.1	Aufbau, Typen, Benennung	556
14.6.2	Betätigungsarten	557
14.6.3	Abdichtungen	557
14.6.4	Eckventile	557
14.6.5	Durchgangsventile	560
14.6.6	Gaseinlaßventile	563
14.6.7	Sonderbauarten	565
	UF ₆ -Ventile, Schnellschlußventile	
14.7	Reinigen vakuumtechnischer Werkstoffe und Bauelemente	566
14.7.1	Reinigen von Metallen	568
14.7.2	Reinigen von technischen Gläsern	570
14.7.3	Reinigen von Keramik	570
14.7.4	Reinigen gummielastischer Werkstoffe	570
14.7.5	Reinigen von Gasen	570
14.7.6	Entgasen durch Ausheizen	571
14.7.7	Reinigen mittels Glimmentladung und chemisch aktivem Gas	571
14.8	Literatur	571

15 Arbeitstechnik in den einzelnen Druckbereichen	573
15.1 Allgemeine Hinweise	573
15.1.1 Enddruck p_{end} bzw. Betriebsenddruck $p_{B, \text{end}}$ einer Vakuumpumpe	573
15.1.2 Enddruck einer Vakuumanlage oder -anlage $p_{\text{end, A}}$	574
15.1.3 Arbeitsdruck p_{arb}	574
15.1.4 Arbeitsdruck, bedingt durch den Prozeßgasstrom	575
15.1.5 Arbeitsdruck, bedingt durch verdampfende Substanzen	575
15.1.6 Arbeitsdruck, bedingt durch Entgasung (Desorption und Ausgasung)	577
15.1.7 Arbeitsdruck, bedingt durch den Permeationsgasstrom	578
15.1.8 Arbeitsdruck, bedingt durch den Leckgasstrom	578
15.1.9 Die trockene, saubere und dichte Vakuumanlage	579
15.2 Arbeitstechnik im Grobvakuum (1013 ... 1 mbar)	579
15.2.1 Überblick	579
15.2.2 Aufbau einer Grobvakuumanlage oder -apparatur	581
15.2.3 Pumpen. Art und Saugvermögen	581
15.2.4 Pumpstände für Grobvakuum	582
15.2.5 Druckmessung im Grobvakuum	584
15.2.6 Auspumpzeit im Grobvakuum	584
15.2.7 Belüften	588
15.3 Arbeitstechnik im Feinvakuum ($1 \dots 10^{-3}$ mbar)	590
15.3.1 Überblick	590
15.3.2 Aufbau einer Feinvakuumanlage	591
15.3.3 Pumpen. Art und Saugvermögen	591
15.3.4 Druckmessung	592
15.3.5 Auspumpzeit und Enddruck	592
15.3.6 Belüften	595
15.3.7 Feinvakuumpumpstände	595
15.4 Arbeitstechnik im Hochvakuum ($10^{-3} \dots 10^{-7}$ mbar)	598
15.4.1 Aufbau einer Hochvakuumanlage oder -anlage	598
15.4.2 Pumpen. Art und Saugvermögen	598
15.4.3 Druckmessung im Hochvakuum	599
15.4.3.1 Hinweise zur Verwendung von Vakuummeßröhren	600
15.4.3.2 Wärmeleitungs-vakuummeter-Meßröhren	600
15.4.3.3 Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter-Meßröhren	601
15.4.4 Hochvakuum-pumpstände	601
15.4.4.1 Hochvakuum-pumpstand mit Diffusionspumpe	601
15.4.4.1.1 Vorvakuumbeständigkeit und Wahl der Vorpumpe	601
15.4.4.1.2 Ventilloser Betrieb	603
15.4.4.1.3 Pumpstand mit Umwegleitung	604
15.4.4.1.4 Vorvakuumbehälter und Haltepumpe	607
15.4.4.2 Hochvakuum-pumpstand mit Turbomolekularpumpe	609
15.4.4.3 Der vollautomatische Hochvakuum-pumpstand	610
15.4.5 Auspumpzeit und Belüften	612
15.5 Arbeitstechnik im Ultrahochvakuum ($p < 10^{-7}$ mbar)	613
15.5.1 Überblick	613
15.5.2 Aufbau der UHV-Apparatur	614
15.5.3 Pumpen. Art und Saugvermögen	615
15.5.3.1 Adsorptionspumpen	616
15.5.3.2 Ionenerstäuber-pumpen	617
15.5.3.3 Titanverdampfer-pumpen	617
15.5.3.4 Turbomolekular-pumpen	618
15.5.3.5 Kryopumpen	618
15.5.3.6 Volumenge-tter (NEG-)Pumpen	618

15.5.4	Druckmessung	619
15.5.5	Auspumpzeit, Enddruck und Evakuierungstechnik	621
15.5.6	Belüften	621
15.5.7	Ultrahochvakuum-(UHV-)Systeme	621
15.5.7.1	Ultrahochvakuum-(UHV-)Bauelemente	622
15.5.7.2	Ultrahochvakuum-(UHV-)Pumpstände	624
15.5.7.3	Ultrahochvakuum-(UHV-)Großanlagen	628
15.6	Literatur	629
16	Anhang	630
16.A	Tabellen	630
16.B	Diagramme	657
16.C	Erläuterung einiger häufig verwendeter Abkürzungen	679
16.D	Größen und Einheiten	679
16.E	Formelzeichen (Symbole) häufiger verwendeter physikalischer Größen und deren SI-Einheiten	682
	Sachwortverzeichnis	686