

Handbuch der Dichtungstechnik

Dr. Ing. Edgar Schmid

Prof. Dipl.-Ing. Willi Bohl

Dipl.-Ing. Gerd Duck

Dipl.-Ing. Richard Eidt

Ing. (grad.) Karl Jasmand

Dipl.-Ing. Manfred Köpl

Dipl.-Ing. Hermann Metzner

Ing. (grad.) Klaus Safft

Dipl.-Ing. Roland Schäfer

Ing. (grad.) Werner Schmidthals

Dipl.-Ing. Hans-Werner Seffler

Dipl.-Ing. Hans J. Tückmantel

Dr. rer. nat. Herbert Weyhenmeyer

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort: Prof. Dr.-Ing. H. W. Müller
Vorwort: Dr.-Ing. Edgar Schmid

Teil I	Dichtungen an ruhenden Maschinenteilen	21
1	Statische Dichtungen bei Flanschverbindungen im Rohrleitungs-, Apparate-, Armaturen- und Behälterbau	23
	1.1.1 Dichtverbindung	23
	1.1.2 Hauptschluß und Nebenschluß	23
1.2	Dichtheit	24
	1.2.1 Der Vorgang des Dichtwerdens	24
	1.2.1.1 Mechanischer Wirkbereich	24
	1.2.1.2 Makroskopischer Wirkbereich	24
	1.2.1.3 Mikroskopischer Wirkbereich	25
	1.2.2 Der Vorgang des Undichtwerdens	26
	1.2.3 Dichtflächenbreite	27
1.3	Berechnung der Kräfte	29
	1.3.1 Innendruck	29
	1.3.2 Vorverformungskraft	30
	1.3.3 Standkraft	32
	1.3.4 Betriebsdichtungskraft	33
	1.3.5 Schraubenkraft	35
	1.3.6 Dichtfaktor	36
	1.3.7 Zusammenhang der Kräfte in Abhängigkeit vom Innen- druck	37
1.4	Darstellung der Vorgänge im Spannungsdreieck	39
1.5	Dichtkraft bei niederen Innendrücker	41
1.6	Dichtungsformen	42
	1.6.1 Flachdichtungen	42
	1.6.2 Flächendichtungen	44
	1.6.3 Schmiegedichtungen	44
	1.6.4 Schneidendichtungen	45
1.7	Werkstoffe und ihre Anwendungsbereiche	46

1.8	Spezielle Dichtungen	50
1.8.1	It-Dichtungen	50
1.8.2	Metall-Asbest-Dichtungen	54
1.8.3	Ganzmetallische Dichtungen	56
1.8.4	Massive Metalldichtungen	57
1.9	Literaturangaben	58
1.10	Normen	59
	Statische Dichtungen im Hochdruck-Apparatebau	65
2.1	Einleitung	65
2.2	Hochdruckabdichtungen von Rohrleitungen und kleinen Apparaten	65
2.2.1	Verschlüsse mit Dichtungen ohne Selbstdichtungswirkung	65
2.2.2	Abdichtung von Hochdruck-Leitungen bis 14 000 bar	66
2.3	Hochdruck-Abdichtungen von Rohrleitungen und Apparaten mit selbsthelfender Wirkung	67
2.3.1	Dichtungslinse	68
2.3.2	Wave-Ring	69
2.3.3	Deltaringdichtung	70
2.3.4	Keilringdichtung	70
2.3.5	Graylog-Dichtung	71
2.3.6	O-Ringe bei statischen Abdichtungen	72
2.3.6.1	Elastomer-O-Ringe	72
2.3.6.2	Metallische O-Ringe	73
2.3.7	Bridgeman-Verschluß	73
2.4	Hochdruckverschlüsse für Großapparate	75
2.4.1	Einfachkonusdichtung	75
2.4.2	Doppelkonusdichtung	76
2.4.3	Uhde-Bredtschneider-Verschluß	76
2.5.1	Grundsätzliches über die Berechnung von Hochdruckverschlüssen	77
2.5.2	Berechnung einer Doppelkonusdichtung	77
2.6	Einfluß der Dichtung auf die konstruktive Gestaltung des Verschlusses	82
2.7	Literaturangaben	82

3	Zylinderkopf abdichtungen von wassergekühlten Diesel- und Ottomotoren	83
3.1	Einleitung	83
3.2	Anforderungen an die ZKD	84
3.2.1	Dichtheit	84
3.2.2	Standfestigkeit	85
3.2.3	Beständigkeit	86
3.2.4	Lebensdauer	86
3.2.5	Verschärfende Komponenten	86
3.2.6	Zusammengefaßte Forderungen an die Auslegung der ZKD	87
3.2.7	Forderungen an die Motorkonstruktion	87
3.3	Aufbau der ZKD	89
3.3.1	ZKD mit überwiegendem Weichstoffanteil	90
3.3.2	ZKD mit überwiegendem Metallanteil	97
3.4	Messungen, Prüfungen	99
3.4.1	Laborprüfungen	99
3.4.2	Messungen an der Zylinderkopfdichtung	102
3.4.3	Attrappeneinspannung	103
3.5	ZKD-Erprobung im lauffähigen Motor	105
3.5.1	Prüfstandsversuche	105
3.5.2	Fahrzeugversuche	107
3.6	Grundlagen zur konstruktiven Auslegung	107
3.6.1	Motorkonstruktionen	107
3.6.2	Richt- und Erfahrungswerte	107
3.6.3	Weitere, die Dichtungsauslegung direkt beeinflussende Konstruktionsmerkmale	110
3.6.4	Berechnung der Verspannung von Zylinderkopf, Zylinderkopfdichtung und Zylindergehäuse	112
3.6.5	Beispiel für eine Optimierung, durchgeführt an einem LKW-Motor mit Aufladung	113
3.6.6	Montageverfahren	116
3.7	Literaturangaben	118
4	Druckmittel zur Abdichtung an ruhenden Flächen	119
4.1	Einleitung	119
4.2	Wirkungsweise	121

4.3	Einteilung der Dichtmittel	122
4.4	Aufbau und Eigenschaft der Dichtmittel	123
4.5	Anwendungskriterien	126
4.6	Verarbeitungsverfahren	130
4.7	Prüfung von Dichtmitteln	135
4.8	Literaturangaben	135
Teil II	Dichtungen an hin- und hergehenden Maschinenteilen	137
5	Allgemeine Merkmale der Elastomerdichtungen bei statischer und dynamischer Abdichtung	139
5.1	Einleitung	139
5.2	Initialwirkung der Dichtlippe	140
5.3	Selbstverstärkender Effekt bei Lippen und Kompaktdichtungen	141
5.4	Entwicklung der Geometrie der Dichtlippe	146
5.5	Elasto-hydrodynamischer Schmierfilm — Leckage­theorie	148
5.6	Hoche­lastizität	153
5.7	Einflüsse auf die Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsdauer der Elastomerdichtung	155
5.7.1	Der physikalische Effekt	155
5.7.2	Der chemische Effekt	155
5.7.3	Der mechanische Effekt	156
5.7.4	Beständigkeit	156
5.8	Dichtungswerkstoffe und ihre Eigenschaften	157
5.8.1	Chemische und thermische Beständigkeit der Elastomere	159
5.8.2	Tieftemperaturverhalten	159
5.8.3	Härte	162
5.8.4	Elastomere	162
5.8.4.1	NBR - Acrylnitril-Butadien-Elastomer	162
5.8.4.2	ACM - Acrylat-Elastomer	164
5.8.4.3	VMQ-Silikon-Elastomer	164
5.8.4.4	FKM - Fluor-Elastomer	164
5.8.4.5	SBR - Styrol-Butadien-Elastomer	165

5J3.4.6	CR - Chlor-Butadien-Elastomer	166
5.3.4.7	AU - Polyesterurethan	166
5A3.4.8	EPDM — Äthylen-Propylen-Dien-Elastomer	168
5A3.5	Thermoplaste	168
5J3.5.1	PVC - Polyvinylchlorid	168
5J3.5.2	PA - Polyamide	169
5J3.5.3	PTFE - Polytetrafluoräthylen (Teflon)	169
5J3.5.4	POM-- Polyacetate	170
5.9	Literaturangaben	
6	Lippen-und Kompaktdichtungen in der Hydraulik	173
6.1	Anforderungen an Hydraulikdichtungen	173
6.2	Tribologie der dynamisch belasteten Elastomerdichtungen	174
6.3	Anforderungen an Stangen-und Kolbendichtungen	180
6.4	Dichtungsformen	182
6.4.1	O-Ringe	182
6.4.2	Hut-, Topf-, Doppelmanschetten	191
6.4.3	Lippen- u. Kompaktdichtungen für Stange und Kolben	191
6.4.3.1	Nutringe	192
6.4.3.2	Gewebedichtungen	192
6.4.3.3	Kompaktdichtungen (kurzbauend)	194
6.4.3.4	Kompaktdichtungen (langbauend)	195
6.4.3.5	PTFE-Stangendichtungen	195
6.4.4	Kolbenkompaktdichtungen	196
6.4.4.1	mit integrierten Führungs-und Spaltverschlüsselementen	196
6.4.4.2	mit separaten Führungselementen	197
6.5	Elemente, die in enger Verbindung zu den Dichtungen stehen	200
6.5.1	Führungselemente	200
6.5.2	Abstreifer	200
6.6	Geometrische Einflußgrößen, Einbau- und Montagehinweise	202
6.6.1	Hub	202
6.6.2	Einbauräume	202
6.6.3	Einbau und Montage	203
6.6.3.1	Nutringe und Kompaktstangendichtungen	203
6.6.3.2	Gewebepackungen	204
6.6.3.3	Kolbenkompaktdichtungen	206
6.6.4	Spalte und Passungen	207
6.6.5	Rauhigkeit und Bearbeitungsverfahren	210

6.7	Physikalische und chemische Einflußgrößen	212
6.7.1	Geschwindigkeit	212
6.7.2	Druck	213
6.7.2.1	Systemdruck	213
6.7.2.2	Hydrodynamischer Druckaufbau	214
6.7.3	Temperatur	217
6.7.4	Hydraulik-Medien	218
6.7.4.1	Hydraulik-Medien auf Mineralölbasis	218
6.7.4.2	Schwer entflammbare Flüssigkeiten	220
6.7.5	Luft im Öl	221
6.7.6	Schmutz im Ölkreislauf	222
6.8	Literaturangaben	223
7	Dichtelemente der Pneumatik	227
7.1	Einleitung	227
7.2	Betriebsbedingungen	228
7.2.1	Druckluft	228
7.2.2	Oberflächengüte der Dichtfläche	229
7.2.3	Reibverhalten	231
7.2.4	Dichtungswerkstoffe — zulässige Betriebstemperaturen	233
7.2.5	Einbauhinweise	234
7.3	Kolbendichtungen	235
7.3.1	Lippenlose Kolbendichtungen in der Pneumatik	235
7.3.2	Lippendichtungen für Pneumatikkolben	236
7.4	Stangendichtungen	238
7.5	Dämpfungsdichtungen	239
7.6	Sonderdichtungen, Dichtungskombinationen	242
7.7	Literaturangaben	244
8	Faltenbälge und Membranen	248
8.1	Faltenbälge	248
8.1.1	Anwendung	248
8.1.2	Ausführung	248
8.1.3	Faltenbalg-Werkstoffe	255
8.1.4	Herstellung	256
8.2	Membranen	256
8.2.1	Anwendung	256

8.2.1.1	Regelmembrane	256
8.2.1.2	Pumpenmembrane	256
8.2.1.3	Trennmembrane	257
8.2.2	Anforderungen an Membranen	258
8.2.3	Membran-Werkstoffe	259
8.2.4	Membran-Auslegung	260
8.2.5	Berechnung der Membrane	263
8.2.5.1	Stangenkraft	263
8.2.5.2	Festlegung der Gummi- bzw. Gewebequalität	264
8.2.6	Einbauvorschriften	266
8.2.6.1	Montage	266
8.2.6.2	Einbauraum	267
8.3	Literaturangaben	269
	Kolbenringe	270
9.0	Nomenklatur	270
9.1	Allgemeines	270
9.2	Theoretische Bezeichnungen	271
9.3	Kolbenringtypen	277
9.3.1	Verdichtungsringe	278
9.3.2	Ölabstreifringe ohne Feder	279
9.3.3	Ölabstreifringe mit Feder	279
9.3.4	Reparatur-Kolbenringsätze	280
9.4	Kolbenring — Stoßausführungen	280
9.5	Kolbenring — Stoßsicherungen	281
9.6	Betriebsverhalten	281
9.6.1	Ringverschleiß	281
9.6.2	Ringstecken	284
9.6.3	Ringbrechen	284
9.6.4	Ringflattern	285
9.6.5	Ölverbrauch	286
9.6.6	Ringwerkstoff	287
9.6.7	Korrosions- und Abriebverschleiß	288
9.7	Herstellung	288
9.8	Oberflächenbehandlung	289
9.8.1	Phosphatierung und Ferrooxydierung	289
9.8.2	Verzinnung und Verkupferung	289
9.8.3	Keramikbeschichtung	289

9.9	Laufflächenbewehrung	290
9.9.1	Ferroxfüllung	290
9.9.2	Eingewalzte Bronzestreifen	290
9.9.3	Verchromung	290
9.9.4	Molybdänbeschichtung	291
9.9.5	Keramik- und Metall-Mischschichten	291
9.10	Literaturangaben	292
9.11	DIN-Normen von Kolbenringen bis 0 200 mm	294

Teil III Abdichtung drehender Wellen 297

10	Radial-Wellendichtringe	299
10.1	Vorbemerkung	299
10.2.1	Radialkraft - radiale Linienpressung	300
10.2.2	Radiameter	302
10.3	Reibungsarbeit, Verschleiß, Gebrauchsdauer	304
10.4	Einflußfaktoren der Funktionstüchtigkeit und Gebrauchsdauer	308
10.5	Konstruktive Hauptmerkmale — Mechanismus des Drall-Wellendichtringes	317
10.6	Anwendungsrichtlinien, Einbauvorschriften, Einsatzbedingungen, praktische Angaben für Konstrukteure	320
10.6.1	Normen, Normbauarten, Normgrößen, Normbezeichnungen	320
10.6.2	Einbau- und Montagerichtlinien	324
10.6.3	Form-, Orts- und Lauftoleranzen	325
10.6.4	Beständigkeit der vier Basiselastomere	328
10.6.5	Drehzahl, Umfangsgeschwindigkeit, Druckbeaufschlagung, Verlustleistung	331
10.7	Schadenursachen und Schadenbilder an Radial-Wellendichtringen	333
10.8	Literaturangaben	339

11	Wälzlagerdichtungen	342
11.1	Vorbemerkung	342
11.2	Übersicht der Dichtungsbauarten bei Wälzlagern	343
11.3	Selbständige Dichtelemente, die zusammen mit Wälzlagern eingebaut werden	344
11.4	In Wälzlagern integrierte Dichtelemente	346
11.5	Dichtelemente für Linearkugellager	350
11.6	Berührungslose Dichtelemente	352
11.7	Literaturangaben	356
12	Stopfbuchsen und Packungen	357
12.1	Einleitung	357
12.2	Konstruktiver Aufbau und Wirkungsweise der einfachen Packungsstopfbuchsen	358
12.3	Ausführung, Werkstoffe und Auswahl von Stopfbuchsenpackungen	361
	12.3.1 Beanspruchungsarten	361
	12.3.2 Ausführungsarten	362
	12.3.2.1 Geflochtene Stopfbuchsenpackungen	362
	12.3.2.2 Stopfbuchsenpackungen aus Grafitfolie	365
	12.3.2.3 Knetpackungen	366
	12.3.2.4 Metallische Weichstoffpackungen	367
	12.3.3 Bestimmungsdaten für die Auswahl von Stopfbuchsenpackungen	367
12.4	Gestaltungshinweise	368
12.5	Kräfte, Drücke und Momente an und in der Packung	376
	12.5.1 Im montierten Zustand	376
	12.5.2 Im Betriebszustand	378
12.6	Die Belastbarkeit der Dichtung	382
12.7	Das Zeitverhalten von Packungen	383
12.8	Besondere Stopfbuchsenkonstruktionen	384
12.9	Literaturangaben	387

13	Axial-Gleitringdichtungen	388
13.1	Anwendungsgebiete — gestern, heute und morgen	388
13.2	Aufbau und Wirkungsweise	389
13.2.1	Axiales Kräftegleichgewicht	390
13.2.2	Belastung von Gleitflächen	392
13.2.3	Die Axial-Gleitringdichtung als tribologisches System	393
13.3	Richtlinien für die Anwendung	398
13.3.1	Einbauräume und Bezeichnungen nach DIN 24960	398
13.3.2	Dichtungsauswahl	400
13.3.2.1	Belastungsbereiche — Dichtungsanordnungen	400
13.3.2.2	Gleit- und Gegenringe	402
13.3.2.3	Das radiale Dichtelement	405
13.4	Schadensfälle — Analyse und Ursachen	405
13.4.1	Schäden durch mechanische Einflüsse	406
13.4.1.1	Gleitflächenverschleiß durch Verschmutzung	406
13.4.1.2	Gleitflächenverschleiß durch Ablagerungen infolge chemischer Reaktionen, durch Erosion und Kavitation	409
13.4.1.3	Ausschlagen der Drehmoment-Mitnahme	411
13.4.1.4	Mechanische Verwerfungen und Zerstörungen von Gleitflächen	413
13.4.1.5	Wellenverschleiß unter O-Ringen	414
13.4.2	Schäden durch thermische Einflüsse	414
13.4.2.1	Gleit- und Gegenringe	414
13.4.2.2	Radiale Dichtelemente aus Elastomeren	416
13.4.3	Schäden durch Korrosion	418
13.4.3.1	Oberflächenkorrosion und Lochfraß	418
13.4.3.2	Interkristalline Korrosion	419
13.4.3.3	Spannungsrißkorrosion	421
13.4.3.4	Spaltkorrosion	421
13.4.3.5	Kontakt-, elektrolytische- oder galvanische Korrosion	421
13.4.4	Schäden durch fehlerhafte Montage	422
13.5	Literaturangaben	423
14	Berührungsfreie Dichtungen	424
14.1	Einleitung	424
14.2	Systematik der berührungslosen Dichtungen	424
14.3	Drucklose berührungsfreie Dichtungen	425

14.4	Spaltdichtungen	428
14.4.1	Der axiale konzentrische Spalt	428
14.4.1.1	Inkompressible laminare Strömung	428
14.4.1.2	Inkompressible turbulente Strömung	437
14.4.1.3	Kompressible Strömung	437
14.4.2	Der exzentrische Spalt	441
14.4.3	Der konvergente Spalt	442
14.4.4	Der radiale Spalt	443
14.4.4.1	Inkompressible Strömung	443
14.4.4.2	Kompressible Strömung	444
14.4.5	Krafteinwirkung an Spaltdichtungen	445
14.4.5.1	Querkräfte beim axialen Spalt	445
14.4.5.2	Axialschub beim radialen Spalt	446
14.5	Labyrinthspaltdichtungen und Labyrinthdichtungen	446
14.5.1	Durchflußgleichungen	446
14.5.2	Durchflußbeiwerte	449
14.5.3	Gestaltungshinweise	452
14.6	Literaturangaben	455
Autoren	Verzeichnis	456
Stichwortverzeichnis		457