

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	VI
1 Grundlagen	2
1.1 Statische wirkende Dichtungen	4
1.2 Dynamisch wirkende Dichtungen	5
2 Werkstoffe der Dichtungstechnik	8
2.1 Polyurethane und Silicone	8
2.1.1 Polyurethan-Kautschuk	9
2.1.2 Silicon-Kautschuk	11
2.2 Gummiwerkstoffe	14
2.2.1 Naturkautschuk (NR = natural rubber)	20
2.2.2 Synthesekautschuk	22
2.2.2.1 Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	22
2.2.2.2 Butadien-Kautschuk (BR)	24
2.2.2.3 Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR)	24
2.2.2.4 Chloropren-Kautschuk (CR)	26
2.2.2.5 Butylkautschuk (IIR)	26
2.2.2.6 Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer (EPDM)	27
2.2.2.7 Fluorkautschuk (FKM)	28
2.3 Polytetrafluorethylen (PTFE)	29
2.3.1 Entdeckung des Werkstoffes PTFE	29
2.3.2 Herstellung des Werkstoffes PTFE	29
2.3.3 Eigenschaften von PTFE	30
2.3.3.1 Thermische Eigenschaften	31
2.3.3.2 Chemische Beständigkeit	31
2.3.3.3 Mechanische Eigenschaften	31
2.3.3.4 Strahlenbeständigkeit	31
2.3.3.5 Adhäsionsverhalten	31
2.3.3.6 Gleitverhalten	32
2.3.3.7 Verschleißverhalten	32
2.3.3.8 Quenchen	33
2.3.3.9 Physiologisches Verhalten	33
2.3.4 Verarbeitung von PTFE	34
2.4 Weitere Dichtwerkstoffe	38
2.4.1 Hochpolymere Dichtungswerkstoffe	38
2.4.1.1 Perfluor-Alkoxypolymer (PFA)	38
2.4.1.2 Polytetrafluorethylen (TFM)	39

2.4.1.3	Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)	39
2.4.1.4	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	39
2.4.1.5	Polyacetal (POM)	39
2.4.1.6	Polyamid (PA)	40
2.4.1.7	Ultra-hochmolekulares Polyethylen (UHMW-PE)	40
2.4.1.8	Polyetheretherketone (PEEK)	41
2.4.2	Duroplaste	41
2.4.3	Gewebeverbundwerkstoffe	42
2.5	Faserwerkstoffe	42
2.5.1	Einführung	42
2.5.2	Chemiefasern	43
2.5.2.1	P-Aramidfasern	48
2.5.2.2	Kohlenstofffasern	55
2.5.2.3	PTFE-Fasern	58
2.5.2.4	Mineralfasern	58
2.5.2.5	Cellulosefasern	63
2.5.3	Naturfasern	63
2.6	Graphit	64
2.6.1	Struktur	64
2.6.2	Herstellung	65
2.6.3	Allgemeine Eigenschaften	66
2.7	Glimmer	67
2.7.1	Struktur	68
2.7.2	Glimmertypen	68
2.7.3	Vorkommen/Aufbereitung	69
2.7.4	Allgemeine Eigenschaften	69
2.7.5	Verwendung/Einsatzgebiete	70
2.8	Werkstoffe für Gleitringdichtungen	70
2.8.1	Gleitwerkstoffe allgemein	70
2.8.3	Herstellungsverfahren [27]	72
2.8.3.1	Rohstoffe	72
2.8.3.2	Formgebung	74
2.8.3.3	Grün-/Weißbearbeitung	75
2.8.3.4	Sinterbrand	75
2.8.3.5	End- und Hartbearbeitung	76
2.8.3.6	Prüfverfahren	77
2.8.4	Bruchmechanik [28]	77
2.8.5	Siliciumcarbid	80
2.8.5.1	Drucklos gesintertes Siliciumcarbid (SSiC)	81
2.8.5.2	Reaktionsgebundenes Silicium-infiltriertes Siliciumcarbid (SiSiC)	81
2.8.5.3	Heißgepresstes Siliciumcarbid (HPSiC)/heißsostatisch gepresstes SiC (HPSiC)	82

2.8.5.4	Flüssigphasengesintertes Siliciumcarbid (LPSiC)	82
2.8.5.5	Rekristallisiertes Siliciumcarbid (RSiC)	82
2.8.6	Kohlegraphit	83
2.8.7	Nebendichtungswerkstoffe (weich)	84
2.8.7.1	Verformungsverhalten und E-Modul	85
2.8.7.2	Thermische Zustandsbereiche	88
2.8.7.3	Gough-Joule-Effekt	89
2.8.7.4	Druckverformungsrest oder Compression Set	89
2.8.7.5	Burger-Modell und Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)	90
2.8.8	Metallische Teile.	92
2.8.9	Das Korrosionsverhalten	97

3	Statische Dichtungen	108
3.1	Einführung	108
3.2	Dichtungen im Krafthauptschluss	109
3.2.1	Flachdichtungen	117
3.2.1.1	Faserverstärkte Dichtungen.	120
3.2.1.2	Flexibler Graphit	140
3.2.1.3	Fluorpolymere	146
3.2.1.4	Hochtemperaturdichtungen.	158
3.2.1.5	Wellringdichtungen	162
3.2.1.6	Kammprofilichtungen	165
3.2.1.7	Spiraldichtungen	167
3.2.2	Schmiegungsdichtungen	169
3.2.2.1	Ring-Joint-Dichtungen	170
3.2.2.2	Linsendichtungen	174
3.2.2.3	Doppel-Konus-Dichtungen	175
3.2.3	Ausblassicherheit.	177
3.2.4	Bedeutung der Montage von statischen Dichtungen	179
3.2.5	Schadensfälle	186
3.2.6	Ausblick	189
3.3	Kraftnebenschlussdichtungen.	189
3.4	O-Ringe und andere Gummidichtungen	193
3.4.1	Dichtungen im Kraftnebenschluss (KNS).	193
3.4.1.1	Allgemeine Eigenschaften von Dichtungen im Kraftnebenschluss	194
3.4.1.2	Einteilung der Dichtungen im Kraftnebenschluss nach Werkstoffen	195
3.4.2	O-Ringe	195
3.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge zur Wirkungsweise von O-Ringen .	195
3.4.2.2	Konstruktive Hinweise zur Nutgestaltung	197
3.4.2.3	Hinweise zur Montage von O-Ringen	201
3.4.2.4	Beständigkeitskriterien	203
3.4.2.5	Temperaturbeständigkeit.	205

3.4.2.6	Wichtige rezepturbedingte Unterschiede von NBR-, EPDM-, FPM- und FFKM-Werkstoffen	207
3.4.2.7	Qualitätsrelevante Eigenschaften von O-Ringen	214
3.4.3	Schäden an O-Ringen, Ausfallursachen und Abhilfemaßnahmen.	216
3.4.3.1	Medieneinfluss.	216
3.4.3.2	Temperatureinfluss.	217
3.4.3.3	Druckbeanspruchung	218
3.4.3.4	Risse durch Ozoneinwirkung	219
3.4.3.5	Montagefehler	219
3.4.3.6	Verwechslungsgefahr	221
3.5	Sonderdichtungen.	221
3.5.1	Schweißlippendichtungen	221
3.5.2	Trennblechdichtungen	225
3.5.2.1	Die Längstrennblechdichtung	227
3.5.2.2	Die Quertrennblechdichtung	230
4	Stopfbuchspackungen	236
4.1	Einführung	236
4.2	Packungsmaterialien.	236
4.2.1	Faserwerkstoffe	236
4.2.1.1	Natürliche organische Fasern	237
4.2.1.2	Natürliche anorganische Fasern	237
4.2.1.3	Synthetische organische Fasern	237
4.2.1.4	Synthetische anorganische Fasern	239
4.2.1.5	Verbundgarne	240
4.2.2	Imprägnierungen	240
4.2.3	Einlaufgleitmittel.	241
4.3	Packungsarten	242
4.3.1	Geflechtpackungen	242
4.3.2	Vliesstoffpackungen.	245
4.3.3	Knetpackungen	246
4.3.4	Extrudierte Packungen	246
4.3.5	Graphitexpandatpackungen	246
4.4	Einsatzbedingungen und Betriebsparameter	248
4.4.1	Packungen für Rotationsanwendungen und Plungerpumpen.	248
4.4.2	Packungen für Armaturen, Spindel-, Deckel- und Gehäuseabdichtungen .	250
4.5	Die Wirkungsweise von Stopfbuchspackungen	252
4.5.1	Typische Leckagewege von Packungen	252
4.5.2	Mechanisches Druckverhalten der Packungen.	253
4.5.3	Der Querverformungsfaktor k und der Reibfaktor μ	254
4.5.4	Berechnung von Spannungen und Reibkräften an formgepressten Ringen	255
4.5.5	Die Spannungssituation bei zugeschnittenen Packungsringen.	258

4.5.6	Innendruckverhalten von Packungen	259
4.5.7	Dimensionierung der Packungsstopfbuchse	260
4.6	Konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten für Stopfbuchsräume	263
4.6.1	Toleranzen, Oberflächen und Spaltbreiten	263
4.6.2	Grundausführung einer Stopfbuchse	264
4.6.3	Stopfbuchse mit unterschiedlichen Packungstypen	264
4.6.4	Stopfbuchsen mit Laternenringen	265
4.6.5	Stopfbuchse mit Federn	266
4.6.6	Stopfbuchse mit Außenmantelkühlung	267
4.6.7	Selbstdichtender Deckelverschluss mit Graphitexpandtringen	268
4.7	Typische Anwendungsfälle für Stopfbuchspackungen	268
4.7.1	Armaturen	268
4.7.2	Rotationspumpen	273
4.7.3	Hochdruckpumpen, Plungerpumpen	280
4.7.4	Rührwerke, Mischer, Filter	281
4.7.5	Sonstige Anwendungen	282
4.8	Praktische Handhabung von Packungen	283
4.8.1	Montage und Einbauhinweise	283
4.8.2	Vorspannen der Packung	285
4.8.3	Einfahren von neu verpackten Wellenabdichtungen	285
4.8.4	Wartung von Stopfbuchspackungen	285
4.8.5	Entsorgung von Packungen	286
4.9	Ausgewählte typische Schäden bei Verwendung von Stopfbuchspackungen	287
4.9.1	Schäden an schnellaufenden Wellen	287
4.9.2	Schäden an Wellen für Behälter	290
4.9.3	Schäden an Plungern	290
4.9.4	Schäden an Armaturenschnecken	291
4.10	Vergleichende Betrachtung Packungen und Gleitringdichtungen	292
4.11	Richtlinien und Normen für Packungen und Anwendungen	293
5	Gleitringdichtungen	296
5.1	Grundelemente und Auslegung	298
5.1.1	Mechanismen der Leckage, Details zum Primärdichtspalt	300
5.1.1.1	Einige grundsätzliche Phänomene der Reaktionskinetik	302
5.1.1.2	Strömungsvorgänge in engen Dichtspalten	302
5.1.1.3	Druckbedingte Spaltströmung eines axialen Drosselspalts	305
5.1.1.4	Druckbedingte Spaltströmung eines radialen Drosselspalts	305
5.1.1.5	Leckage durch Diffusion (eine Analogie für Gleitringdichtungen unter Mischreibung)	306
5.1.2	Allgemeines zu Dichtungen	307
5.1.2.1	Der allgemeine Dichtspalt und grundlegende Spaltdruckprofile	308
5.1.3	Übliche Gleitwerkstoffe	316

5.1.4	Nebendichtungen	317
5.1.5	Gleitringdesign.	318
5.1.6	Drehmomentübertragung	318
5.1.7	Befederung	318
5.2	Konstruktionsmerkmale einer Gleitringdichtung.	319
5.2.1	Das axiale Kräftegleichgewicht am Gleitring	322
5.2.2	Der Belastungsfaktor κ	322
5.2.3	Die hydraulischen Spaltkräfte	322
5.2.4	Hydrostatische Spaltkräfte infolge radialem Druckabfalls.	323
5.2.5	Hydrodynamische Spaltkräfte infolge Umfangsschleppströmung und Tribologische Vorgänge	325
5.2.6	Hydrodynamische Spaltdruckbildung	327
5.2.7	Leckageabschätzung	331
5.2.8	Reibleistung innerhalb der Dichtfläche	332
5.2.9	Der gesamte Wärmehaushalt einer Gleitringdichtung.	332
5.3	Ausführungsbeispiele	335
5.3.1	Einzeldichtung	335
5.3.2	Doppeldichtung	337
5.4	Betriebsverhalten	340
5.4.1	Fluide (abzudichtende Medien für Gleitringdichtungen) und deren Eigenschaften	341
5.4.3	Lösungen von Feststoffen in Flüssigkeiten	342
5.4.4	Lösungen und Mischungen von Flüssigkeiten	343
5.4.5	Lösungen von Gas in Flüssigkeit.	343
5.4.6	Adhäsion und Kohäsion.	343
5.4.7	Viskositätsverhalten von Fluiden	344
5.4.8	Tribologie, Rheologie, Reibung und Verschleiß	345
5.4.9	Festkörperreibung – trocken	348
5.4.10.1	Der Aquaplaning Effekt – Hydrodynamik in Dichtungen	352
5.4.10.2	Technische Oberflächen und Schmierfilmbildung	353
5.4.11	Reibung und Verschleiß von Dichtungen.	353
5.4.12	Betriebsverhalten von Dichtungen.	356
5.4.13	Mehrfachdichtungen mit Sperrsystemen.	357
5.5	Sonderfall Gasdichtung.	364
5.6	Materialverhalten.	366
5.6.1	Gleitwerkstoffe.	366
5.6.2	Nebendichtungswerkstoffe	369
5.6.3	Metallische Teile.	372
5.6.3.1	Legierungspartner in rost- und säurebeständigen Stählen	372
5.6.3.2	Gefügesysteme von rost- und säurebeständigen Stählen für den Einsatz in Dichtungen	373
5.7	Die häufigsten Schäden	374
5.8	Ausblick	377

6 Radialwellendichtringe	380
6.1 Anfänge des Radialwellendichtrings	380
6.2 Dichtungstechnische Begriffe und Grundlagen	382
6.2.1 Statische und dynamische Abdichtung	383
6.2.2 Starrer und dynamischer Dichtspalt und hydrodynamische Spaltbildung	384
6.2.3 Passive und aktive Abdichtung	385
6.2.4 Natürlicher Dichtmechanismus	387
6.2.5 Radialkraft, Reibung und Verlustleistung	389
6.3 Einflussfaktoren auf die Funktion des RWDR	395
6.3.1 Betriebsbedingungen	397
6.3.1.1 Temperatur	398
6.3.1.2 Drehzahl	402
6.4 Auslegung des Dichtsystems	402
6.4.1 Auslegung der Welle als RWDR-Gegenlaufläche	404
6.4.1.1 Geschliffene Laufläche	410
6.4.1.2 Gedrehte Wellen	412
6.4.1.3 Tangential gedrehte Wellen	414
6.4.1.4 Glattgewalzte Wellen	415
6.4.1.5 Gestrahlte Wellen	416

6.4.1.6	Tiefgezogenes Blech als Gegenauflfläche.	417
6.4.1.7	Thermische Spritzschichten als verschleiß- und korrosions- geschützte Gegenauflflächen	417
6.4.1.8	Hohlwellen im Dichtsystem	419
6.4.1.9	Koaxialitätsabweichungen und Rundlauf toleranz der Welle	419
6.4.2	Auslegung des Radialwellendichtrings	421
6.4.2.1	Auswahl eines geeigneten Werkstoffs für RWDR	421
6.4.2.2	Dichtlippe.	422
6.4.2.3	Bauformen	424
6.4.2.4	Sonderbauformen und ihre Einsatzgrenzen	427
6.4.2.5	Sonderbauformen zum Abdichten unter Druck stehender Medien	430
6.4.2.6	Bauformen für Kraftfahrzeuge	436
6.4.3	Auslegung Haftteil	442
6.4.4	Gestaltung Gehäuse	443
6.4.5	Abzudichtende Medien	445
6.4.5.1	Motorenöl.	446
6.4.5.2	Getriebeöl	446
6.4.5.3	Schmierstoffe für den Tieftemperaturbereich	447
6.4.5.4	Biologisch abbaubare Schmierstoffe	447
6.4.5.5	Schmierfett	448
6.5	Montage von Radialwellendichtringen [64].	449
6.5.1	Lagerung vor der Montage von RWDR	449
6.5.1.1	Hammermontage	449
6.5.2	Montagewerkzeuge	449
6.5.3	Austausch von RWDR	450
6.5.4	Montage von RWDR-Kassettendichtungen	450
6.5.5	Montagetipps.	451
6.6	Schadensfälle	452
6.6.1	Schäden durch Transport und Lagerhaltung	452
6.6.2	Schäden durch Montagefehler	452
6.6.3	Schäden im Betrieb	453
6.6.4	Schäden durch mechanische Einwirkung	455
6.6.5	Schäden durch thermische Einwirkung	455
6.6.5.1	Elastomer-RWDR.	456
6.6.5.2	PTFE-RWDR	457
6.6.6	Schäden durch chemischen Angriff.	457
6.7	Ausblick.	457

7 Hydraulik- und Pneumatikdichtungen 464

7.1	Einführung.	464
7.1.1	Dichtmechanismus	464
7.1.2	Oberflächen	467

7.1.3	Geschwindigkeitsabhängige Reibungszustände: Stribeck-Kurve.	469
7.2	Hydraulikdichtungen	470
7.2.1	Statische Dichtungen.	470
7.2.2	Dynamische Dichtungen	473
7.2.2.1	Plunger- und Stangendichtungen	473
7.2.2.2	Abstreifer	481
7.2.2.3	Dichtsysteme.	482
7.2.2.4	Kolbendichtungen	484
7.2.2.5	Rotationsdichtungen	486
7.2.3	Führungen	486
7.2.3.1	Funktionale Zusammenhänge zwischen Führung und Dichtung.	486
7.2.3.2	Rotorführungen	488
7.2.3.3	Zylinderführungen	488
7.2.3.4	Hydraulikzylinder mit beidseitig gelenkiger Aufhängung.	489
7.2.3.5	Hydraulikzylinder mit fest angebautem Zylinderteil.	496
7.2.3.6	Teleskopzylinder	497
7.2.3.7	Hinweise zur Berechnung der Führungskräfte	499
7.3	Pneumatikdichtungen	500
7.3.1	Einleitung	500
7.3.2	Stangendichtungen	501
7.3.3	Kolbendichtungen	503
7.3.4	Endlagendämpfungsichtungen	507
7.3.5	Sonderzylinder.	508
7.3.6	Ventildichtungen	509
7.4	Richtlinien für die Lagerung von Gummi.	510
7.5	Schäden an Dichtungen	511
7.5.1	Schäden durch Verschleiß	511
7.5.2	Schäden durch andere Ursachen	511
8	Berührungsfreie Dichtungen	520
8.1	Einführung.	520
8.1.1	Zum Begriff „berührungsfreie Dichtung“	520
8.1.2	Vor- und Nachteile berührungsfreier Dichtungen.	521
8.1.3	Einteilung berührungsfreier Dichtungen	522
8.2	Berührungsfreie Dichtungen für Fluide unter Druck	523
8.2.1	Funktionsprinzip und physikalische Wirkungsweise	523
8.2.2	Drosseldichtungen.	523
8.2.2.1	Spaltdichtungen.	524
8.2.2.2	Labyrinthdichtungen	525
8.2.2.3	Labyrinthspaltdichtungen	527
8.2.2.4	Berechnung von Drosseldichtungen	527
8.2.2.5	Einflüsse auf den Durchfluss beim Drosselspalt	528

8.2.3	Sperrdichtungen	531
8.2.3.1	Flüssigkeitsgesperrte Drosseldichtungen	531
8.2.3.2	Zentrifugal-Wellendichtungen	531
8.2.3.3	Gewindewellendichtungen	531
8.2.3.4	Berechnung von Sperrdichtungen	533
8.3	Fanglabyrinthe	535
8.3.1	Wirkprinzipien bei Fanglabyrinth-Dichtungen	535
8.3.2	Gestaltung von Fanglabyrinth-Dichtungen	538
8.3.2.1	Der Eingangsbereich	539
8.3.2.2	Der Innenbereich	542
8.3.2.3	Der Ausgangsbereich	545
8.3.2.4	Der Ablaufbereich	546
8.3.2.5	Ablaufkanäle bei nicht-horizontaler Wellenlage	549
8.3.3	Maßnahmen im Umfeld der Dichtung	550
8.3.3.1	Die Einbauumgebung	550
8.3.3.2	Das weitere Umfeld	552
8.3.4	Analyse der Abdichtbedingungen und der Funktion	554
8.3.5	Exemplarisches Ergebnis experimenteller Untersuchungen	555
8.3.6	Von der Fanglabyrinth-Dichtung zur Schutzdichtung	557
8.3.7	Handelsübliche berührungsfreie Wellendichteelemente	558
8.3.8	Die Entlüftung – ein Sonderfall	560
8.3.9	Zusatzelemente zu Fanglabyrinth-Dichtungen	562
8.4	Sperrluftdichtungen	562
8.4.1	Funktionsweise einer Sperrluftdichtung	563
8.4.2	Abdichten von Stäuben	564
8.4.2	Zusammenfassende Überlegungen	565
8.4.4	Systematische Darstellung der Gestaltungsvarianten	565
8.4.4	Wichtige Gestaltungshinweise	567
8.4.5	Berechnung von Sperrluft-Dichtungen	568
8.4.6	Anwendung	570
8.5	Anwendungs- und Praxisbeispiele für Fanglabyrinthe und Sperrluftdichtungen ..	570
8.6	Abdichten mittels fettgefüllter Spalte	574
8.6.1	Zusammensetzung und Einteilung von Schmierfetten	574
8.6.2	Eigenschaften von Schmierfetten	575
8.6.3	Aufbau und Funktion berührungsfreier Dichtungen mit fettgefüllten Spalten	576
8.6.4	Gestaltung berührungsfreier Dichtungen mit fettgefüllten Spalten	579
8.7	Zusammenfassung	580
8.8	Ausblick	583
	Stichwortverzeichnis	585
	Inserentenverzeichnis	590