

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kolbenfunktion, Anforderungen und Bauarten</b> .....	1
1.1. Funktion des Kolbens .....	1
1.1.1 Kolben als Element der Kraftübertragung .....	1
1.1.2 Abdichtung und Wärmeabfuhr .....	2
1.1.3 Vielfalt der Aufgaben .....	3
1.2 Anforderungen an den Kolben .....	3
1.2.1 Gaskraft .....	4
1.2.2 Temperaturen .....	4
1.2.3 Kolbenmasse .....	8
1.2.4 Reibleistung und Verschleiß .....	9
1.2.5 Blow-by .....	11
1.3 Kolbenbauarten .....	11
1.3.1 Kolben für Viertakt-Ottomotoren .....	11
1.3.1.1 Regelkolben .....	12
1.3.1.2 Kastenkolben .....	12
1.3.1.3 EVOTEC®-Kolben .....	14
1.3.1.4 EVOTEC® 2-Kolben .....	15
1.3.1.5 Geschmiedete Aluminiumkolben .....	16
1.3.2 Kolben für Zweitaktmotoren .....	17
1.3.3 Kolben für Dieselmotoren .....	17
1.3.3.1 Ringträgerkolben .....	17
1.3.3.2 Kühlkanalkolben .....	18
1.3.3.3 Kolben mit gekühltem Ringträger .....	18
1.3.3.4 Kolben mit Buchsen in der Nabenohrung .....	19
1.3.3.5 FERROTHERM®-Kolben .....	19
1.3.3.6 MONOTHERM®-Kolben .....	20
1.3.3.7 Optimierter MONOTHERM®-Kolben .....	20
1.3.3.8 MonoWeld®-Kolben .....	21
1.3.3.9 Elektronenstrahlgeschweißte Kolben .....	21
1.3.4 Gebaute Kolben für Großmotoren .....	22
1.3.4.1 Einsatzbereich und Ausführungsform .....	22
1.3.4.2 Kolbenoberteil .....	23
1.3.4.3 Kolbenunterteil aus geschmiedeter Al-Legierung .....	24
1.3.4.4 Kolbenunterteil aus Sphäroguss .....	24
1.3.4.5 Kolbenunterteil aus Schmiedestahl .....	24
<b>2 Kolben-Gestaltungsrichtlinien</b> .....	27
2.1 Begriffe und Hauptabmessungen .....	27
2.1.1 Bodenformen und Bodendicke .....	28
2.1.2 Kompressionshöhe .....	29
2.1.3 Feuersteg .....	30
2.1.4 Ringnuten und Ringstege .....	30

2.1.5	Gesamtlänge .....	31
2.1.6	Nabenbohrung .....	31
2.1.6.1	Rauheit .....	31
2.1.6.2	Einbauspiel .....	31
2.1.6.3	Toleranzen .....	32
2.1.6.4	Desachsierung .....	32
2.1.7	Kolbenschaft .....	33
2.2	Kolbenform .....	34
2.2.1	Kolbenspiel .....	34
2.2.2	Ovalität .....	34
2.2.3	Schaft- und Ringpartieeinzug .....	36
2.2.4	Maß- und Formtoleranzen .....	36
2.2.5	Einbauspiel .....	37
2.2.6	Maßgruppen .....	38
2.2.7	Schaftoberfläche .....	39
<b>3</b>	<b>Simulation der Betriebsfestigkeit von Kolben mittels FEM .....</b>	<b>41</b>
3.1	Modellbildung .....	41
3.2	Randbedingungen aus motorischer Belastung .....	43
3.2.1	Thermische Belastung .....	43
3.2.2	Mechanische Belastung .....	45
3.2.2.1	Gaskraft .....	45
3.2.2.2	Massenkraft .....	45
3.2.2.3	Seitenkraft .....	46
3.3	Randbedingungen aus Herstellung und Montage .....	47
3.3.1	Gießprozess/Erstarren .....	47
3.3.2	Eingussteile .....	47
3.3.3	Einpressteile .....	47
3.3.4	Verschraubungen .....	48
3.4	Temperaturfeld und Wärmestrom aus Temperaturbelastung .....	48
3.5	Spannungsverhalten .....	53
3.5.1	Spannungen aus Temperaturbelastung .....	53
3.5.2	Spannungen aus mechanischer Belastung .....	55
3.5.3	Spannungen aus Herstellung und Montage .....	58
3.6	Rechnerischer Nachweis der Betriebsfestigkeit .....	58
<b>4</b>	<b>Kolbenwerkstoffe .....</b>	<b>65</b>
4.1	Anforderungen an Kolbenwerkstoffe .....	65
4.2	Aluminiumwerkstoffe .....	66
4.2.1	Wärmebehandlung .....	67
4.2.2	Kolbenlegierungen .....	69
4.2.3	Faserverstärkung .....	75
4.3	Eisenwerkstoffe .....	76
4.3.1	Gusseisen-Werkstoffe .....	77
4.3.2	Stähle .....	80

4.4	Kupferwerkstoffe für Nabenbuchsen .....	83
4.5	Beschichtungen .....	85
4.5.1	Beschichtungen am Kolben .....	85
4.5.1.1	GRAFAL® 255 bzw. EvoGlide .....	86
4.5.1.2	Zinn .....	86
4.5.1.3	Ferrostan/FerroTec® .....	86
4.5.1.4	FERROPRINT® .....	87
4.5.1.5	Hartoxid in der 1. Kolbenringnut .....	87
4.5.1.6	Hartoxid am Boden .....	87
4.5.1.7	Phosphat .....	88
4.5.1.8	GRAFAL® 210 .....	88
4.5.1.9	Chrom-Auflageflächen .....	88
4.5.1.10	Chrom-Ringnuten .....	89
4.5.2	Anwendungstabelle .....	89
<b>5</b>	<b>Kolbenkühlung .....</b>	<b>91</b>
5.1	Thermische Belastung .....	91
5.2	Verbrennung und Brennstrahlen .....	91
5.3	Temperaturprofil am Muldenrand .....	92
5.4	Temperaturprofil am Kolben .....	93
5.5	Auswirkungen auf die Funktion des Kolbens .....	94
5.5.1	Thermisch bedingte Verformung .....	94
5.5.2	Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte .....	95
5.5.3	Temperatureinfluss auf die Kolbenringe .....	95
5.6	Einflussmöglichkeiten auf die Kolbentemperatur .....	96
5.7	Kühlungsarten .....	96
5.7.1	Kolben ohne Kolbenkühlung .....	97
5.7.2	Kolben mit Anspritzkühlung .....	97
5.7.3	Kolben mit Kühlkanal .....	98
5.7.3.1	Salzkern-Kühlkanalkolben .....	98
5.7.3.2	Kolben mit gekühltem Ringträger .....	100
5.7.3.3	Spanend bearbeitete Kühlkanäle .....	101
5.7.4	Gebaute Kolben mit Kühlräumen .....	101
5.7.4.1	Shakerkühlung .....	103
5.7.4.2	Bohrungskühlung .....	103
5.8	Zuführung des Kühlöls .....	103
5.8.1	Zuführung des Kühlöls als Freistrahl .....	103
5.8.1.1	Düsenausführung bei Anspritzkühlung .....	104
5.8.1.2	Düsenausführung zur Versorgung von Kühlkanälen/-räumen .....	104
5.8.2	Zuführung über Kurbelwelle und Pleuelstange .....	105
5.8.2.1	Zuführung über Kolbenbolzen und Kolbennabe .....	105
5.8.2.2	Zuführung über Gleitschuh .....	105
5.9	Wärmeströme am Kolben .....	106
5.10	Ermittlung der thermischen Belastung .....	107
5.11	Numerische Berechnung mit der FE-Methode .....	108

5.12	Außermotorische Shakeruntersuchungen .....	109
5.13	Kenngrößen .....	109
5.14	Versuchseinrichtungen .....	112
5.15	Simulation der Ölbewegung .....	113
<b>6</b>	<b>Bauteilprüfung .....</b>	<b>115</b>
6.1	Statische Bauteilprüfung .....	116
6.2	Dynamische Bauteilprüfung .....	118
6.3	Verschleißprüfung .....	120
<b>7</b>	<b>Motorische Erprobung .....</b>	<b>123</b>
7.1	Prüflaufprogramme mit beispielhaften Laufergebnissen .....	123
7.1.1	Standard-Prüflaufprogramme .....	124
7.1.1.1	Volllastkurve .....	124
7.1.1.2	Blow-by-Verhalten .....	124
7.1.1.3	Fresstest .....	126
7.1.1.4	Entwicklungslauf .....	126
7.1.2	Langzeit-Prüflaufprogramme .....	128
7.1.2.1	Standard-Dauerlauf .....	128
7.1.2.2	Kalt-Warm-Dauerlauf .....	128
7.1.3	Sonder-Prüflaufprogramme .....	129
7.1.3.1	Kaltstarttest .....	129
7.1.3.2	Microwelding-Test .....	130
7.1.3.3	Fretting-Test .....	131
7.1.3.4	Brandspurtest .....	131
7.2	Angewandte Messverfahren zur Bestimmung der Kolbentemperatur .....	135
7.2.1	Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur .....	136
7.2.1.1	Thermomechanische Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur .....	136
7.2.1.1.1	Anwendung von Schmelzstiften .....	136
7.2.1.1.2	Anwendung von Templugs .....	137
7.2.1.2	Thermoelektrische Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur .....	138
7.2.1.2.1	Anwendung von NTC-Sensoren .....	138
7.2.1.2.2	Anwendung von NiCr-Ni-Thermoelementen .....	139
7.2.1.3	Übertragung der Messwerte vom Thermoelement .....	140
7.2.1.3.1	Übertragung der Messwerte vom Thermoelement mittels durch Schwinge gestützte Messleitung .....	140
7.2.1.3.2	Übertragung der Messwerte vom Thermoelement mittels Telemetrie .....	141
7.2.1.4	Bewertung der bei MAHLE verwendeten Verfahren zur Messung der Kolbentemperaturen .....	142
7.2.2	Kolbentemperaturen an Otto- und Dieselmotoren .....	143
7.2.2.1	Typische Temperaturmaxima an Kolben .....	144
7.2.2.2	Einfluss verschiedener Betriebsgrößen auf die Kolbentemperatur .....	145

7.2.2.3	Einfluss der Kühlölmenge auf die Kolbentemperatur .....	147
7.2.2.4	Kolbentemperaturmessung im transienten Laufprogramm .....	149
7.3	Reibleistungsmessungen am befeuerten Vollmotor .....	150
7.3.1	Messverfahren zur Bestimmung der Reibverluste .....	151
7.3.1.1	Willans-Linie .....	152
7.3.1.2	Schleppen und Strip-Down-Methode .....	152
7.3.1.3	Zylinderabschaltung .....	153
7.3.1.4	Auslaufversuch .....	153
7.3.1.5	Floating-Liner-Verfahren .....	153
7.3.1.6	Indiziermethode .....	154
7.3.2	Friction Mapping mittels Indiziermethode .....	155
7.3.2.1	Anforderungsprofil .....	155
7.3.2.2	Reibleistungsprüfstand für Pkw-Motoren .....	156
7.3.2.3	Mess- und Auswerteverfahren .....	159
7.3.3	Ausgewählte Ergebnisse von Untersuchungen am Pkw-Dieselmotor ....	162
7.3.3.1	Kolbeneinbauspiel .....	162
7.3.3.2	Oberflächenrauheit des Kolbenschafts .....	164
7.3.3.3	Kolbenbolzendesachsierung .....	165
7.3.3.4	Höhe des Kolbenrings in Nut 1 .....	166
7.3.3.5	Tangentialkraft des Ölabstreifrings .....	168
7.3.3.6	Beschichtung des Kolbenbolzens .....	169
7.3.3.7	Motorölviskosität .....	170
7.3.3.8	Form des Kolbenschafts .....	171
7.3.3.9	Beschichtung des Kolbenschafts .....	173
7.3.3.10	Steifigkeit des Kolbenschafts .....	174
7.3.3.11	Fläche des Kolbenschafts .....	176
7.3.4	Simulation von Kraftstoffverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionswerten im Zyklus .....	178
7.3.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	180
7.4	Verschleißuntersuchungen an der Kolbengruppe .....	183
7.4.1	Kolbenschaft .....	183
7.4.1.1	Schafteinfall und Schichtverschleiß .....	183
7.4.1.2	Ovalität .....	184
7.4.2	Kolbenring- und Zylinderlauffläche .....	187
7.4.2.1	Kolbenringlauffläche .....	187
7.4.2.2	Schlauchfedern .....	188
7.4.2.3	Abnormale Verschleißformen .....	188
7.4.2.4	Zylinderlauffläche und Zylinderpolierer .....	190
7.4.3	Kolbenringflanken und Kolbenringnut .....	192
7.4.3.1	Flanken des 1. Kolbenrings .....	192
7.4.3.2	Flanken der 1. Kolbenringnut .....	192
7.4.4	Kolbenbolzen und Kolbennabe .....	194
7.4.4.1	Kolbenbolzen .....	194
7.4.4.2	Kolbennabe .....	196
7.4.5	Sicherungsringe und Sicherungsringnut .....	196
7.5	Kolbenbelastung durch klopfende Verbrennung .....	199
7.5.1	Klopforschäden und Schadensbeurteilung .....	200
7.5.2	Klopfmesstechnik und das MAHLE KI-Meter .....	203
7.5.3	Beispielhafte Messergebnisse .....	207

7.5.4	Erkennungsgüte von Klopffregelungen .....	209
7.5.5	Megaklopfer und Vorentflammung .....	212
7.6	Kolbengeräusch und Kolbenquerbewegung .....	214
7.6.1	Vorgehensweise zur systematischen Minimierung von Kolbengeräuschen .....	214
7.6.2	Kolbengeräusche am Ottomotor .....	216
7.6.2.1	Subjektive Geräuschbeurteilung .....	216
7.6.2.2	Objektive Geräuschbeurteilung und Quantifizierung .....	218
7.6.2.3	Kolbenquerbewegung und Einflussparameter am Ottomotor ...	224
7.6.3	Kolbengeräusche am Pkw-Dieselmotor .....	228
7.6.3.1	Subjektive Geräuschbeurteilung .....	228
7.6.3.2	Objektive Geräuschbeurteilung und Quantifizierung .....	234
7.6.3.3	Kolbenquerbewegung und Einflussparameter am Pkw-Dieselmotor .....	238
7.7	Kolbenbolzengeräusch .....	240
7.7.1	Geräuschentstehung .....	240
7.7.2	Körperschallleitungsweg und Messprogramm .....	241
7.7.3	Auswerteverfahren im Zeitbereich .....	243
7.7.4	Ergebnisse aus Parameterstudien .....	245
7.7.4.1	Einfluss des Kolbenbolzenspiels .....	245
7.7.4.2	Einfluss der Nabengeometrie .....	246
7.7.4.2.1	Öltaschen und umlaufende Schmiernut .....	247
7.7.4.2.2	Querovale Nabenbohrung und Entlastungstaschen .....	248
7.7.4.2.3	Einseitig hochovale Nabenbohrung .....	249
7.7.4.2.4	Formbohrung .....	250
7.8	Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren .....	251
7.8.1	Grundlagen der Kavitation .....	253
7.8.2	Das physikalische Phänomen der Kavitation .....	254
7.8.3	Kavitationsarten .....	254
7.8.3.1	Gaskavitation .....	254
7.8.3.2	Pseudokavitation .....	255
7.8.3.3	Dampfkavitation .....	255
7.8.3.4	Kavitation in realen Strömungen .....	256
7.8.4	Kavitationsblasendynamik und Kavitationsblasenkollaps .....	256
7.8.4.1	Sphärische Kavitationsblasenimplosion .....	256
7.8.4.2	Asphärische Kavitationsblasenimplosion .....	257
7.8.5	Kavitationsschäden an nassen Zylinderlaufbuchsen .....	259
7.8.6	Kavitationsmessstechnik .....	261
7.8.7	Kavitationsintensitätsfaktor und Signalanalyse .....	263
7.8.8	Prüfstandsaufbau für Kavitationsmessungen .....	264
7.8.9	Prüflaufprogramme für Kavitationsmessungen .....	265
7.8.10	Abhängigkeit der Kavitationsintensität von der Anordnung des Zylinders und der Position am Zylinder .....	266
7.8.11	Einflussparameter .....	267
7.8.11.1	Einfluss der Motorbetriebsparameter auf Kavitation .....	268
7.8.11.1.1	Einfluss der Motordrehzahl .....	268
7.8.11.1.2	Einfluss der Motorlast .....	269
7.8.11.1.3	Einfluss des Kühlsystemdrucks .....	269

7.8.11.1.4	Einfluss des Kühlmittelvolumenstroms .....	270
7.8.11.1.5	Einfluss der Kühlmitteltemperatur .....	270
7.8.11.1.6	Einfluss der Kühlmittelzusammensetzung .....	271
7.8.11.1.7	Einfluss des Brennraumdrucks .....	271
7.8.11.2	Einfluss der Konstruktionsparameter auf die Kavitation .....	272
7.8.11.2.1	Einfluss des Kolben- und Zylinderlaufbuchseneinbauspiels .....	272
7.8.11.2.2	Einfluss der Kolbenbauart und der Kolbenform .....	273
7.8.11.2.3	Einfluss sonstiger konstruktiver Merkmale am Kolben .....	274
7.8.11.2.4	Einfluss konstruktiver Merkmale an der Zylinderlaufbuchse und der Kühlkanalgestaltung .....	275
7.9	Ölverbrauch und Blow-by am Verbrennungsmotor .....	276
7.9.1	Ölverbrauchsmechanismen am Verbrennungsmotor .....	276
7.9.1.1	Ölverbrauch am System Kolben/Kolbenringe/Zylinderwand ....	279
7.9.1.2	Ölverbrauch durch Ventilschaftabdichtungen .....	280
7.9.1.3	Ölverbrauch durch die Kurbelgehäuseentlüftung (Blow-by) ....	280
7.9.1.4	Ölverbrauch und Blow-by am Turbolader .....	281
7.9.2	Ölverbrauchsmessmethoden .....	282
7.9.3	Ölemissionskennfeld und dynamisches Ölverbrauchsverhalten .....	285
7.9.4	Einfluss des Saugrohrunterdrucks auf den Ölverbrauch am Benzinmotor .....	290
7.9.5	Trade-off zwischen Reibleistung und Ölverbrauch am Beispiel einer Tangentialkraftreduzierung am Ölabbreifring eines Pkw-Dieselmotors .....	291
7.9.5.1	Einfluss der Tangentialkraft des Ölabbreifringes auf die Ölemission .....	291
7.9.5.2	Vergleich des Einflusses der Tangentialkraft des Ölabbreifringes auf das Ölemissions- und Reibungsverhalten ...	292
7.9.5.3	Einfluss der Tangentialkraft des Ölabbreifringes auf Kraftstoffverbrauch, Ölemission und die CO <sub>2</sub> -Bilanz im NEFZ ..	294
<b>Literurnachweis</b>	.....	297
<b>Glossar</b>	.....	301
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	311



<http://www.springer.com/978-3-658-09557-4>

Kolben und motorische Erprobung

(Hrsg.)

2015, XIII, 313 S. 279 Abb., 269 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-658-09557-4