

Inhaltsverzeichnis

1	Kolbenfunktion, Anforderungen und Bauarten	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 Nabenbohrung	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
2	Kolben-Gestaltungsrichtlinien	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
3	Simulation der Betriebsfestigkeit von Kolben mittels FEM	41
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
4	Kolbenwerkstoffe	65
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
5	Kolbenkühlung	91
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 Freistrahл	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	Kenngößen	109
5.14	Versuchseinrichtungen	112
5.15	Simulation der Ölbewegung	113
6	Bauteilprüfung	115
6.1	Statische Bauteilprüfung	116
6.2	Dynamische Bauteilprüfung	118
6.3	Verschleißprüfung	120
7	Motorische Erprobung	123
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 Schwinde 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 Kühlmenge 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 ₂ -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	Klopfschäden und Schadensbeurteilung	200
	7.5.2	Klopfmesstechnik und das MAHLE KI-Meter	203
	7.5.3	Beispielhafte Messergebnisse	207

7.5.4	Erkennungsgüte von Klopfregelungen	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	Geräuschenstehung	240
7.7.2	Körperschalleitwege 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	Kavitationsmesstechnik	261
7.8.7	Kavitationsintensitätsfaktor und Signalanalyse	263
7.8.8	Prüfstands Aufbau 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 Zylinderlaufbuchsenbauspiels	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 Ölabstreifring eines Pkw-Dieselmotors	291
7.9.5.1	Einfluss der Tangentialkraft des Ölabstreifringes auf die Ölemission	291
7.9.5.2	Vergleich des Einflusses der Tangentialkraft des Ölabstreifringes auf das Ölemissions- und Reibungsverhalten ...	292
7.9.5.3	Einfluss der Tangentialkraft des Ölabstreifringes auf Kraftstoffverbrauch, Ölemission und die CO ₂ -Bilanz im NEFZ ..	294
Literaturnachweis		297
Glossar		301
Sachwortverzeichnis		311