ATZ/MTZ-Fachbuch

MAHLE GmbH *Hrsg.*

Kolben und motorische Erprobung

2. Auflage

MAHLE

Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Antriebsstränge macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, anwendungsorientiert und aktuell zusammenstellt.
Die Reihe wendet sich an Ingenieure der Kraftfahrzeugentwicklung und Antriebstechnik sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Fahrzeug- und Antriebstechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

MAHLE GmbH
Herausgeber

Kolben und motorische Erprobung

2., überarbeitete Auflage

Springer Vieweg

Herausgeber

MAHLE GmbH
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-09557-4 ISBN 978-3-658-09558-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-09558-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2010, 2015
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

in Ihren Händen halten Sie die zweite, überarbeitete Auflage des zweiten Bands der MAHLE Produktkunde, einer mehrbändigen Fachbuchreihe.

Der Band „Kolben und motorische Erprobung“ ist sowohl eine Ergänzung als auch Vertiefung zum ersten Band „Zylinderkomponenten“. In diesem Buch beschreiben die MAHLE Spezialisten ihr breites und umfassendes Fachwissen rund um das Thema Kolben, seine Auslegung, Konstruktion und Erprobung. Viele Bilder, Grafiken und Tabellen visualisieren die gesamte Thematik sehr anschaulich und erleichtern Ihnen die tägliche Arbeit in diesem Umfeld.

Noch nie waren die Anforderungen der internationalen Gesetzgebung und der Kunden an moderne Motoren und somit auch an die Kolben so hoch und zum Teil so widersprüchlich. Deshalb finden Sie auf den folgenden Seiten viele Details rund um den Kolben – etwa dessen Funktion, Anforderungen und Bauarten, Gestaltungsrichtlinien, aber auch über die Simulation der Betriebsfestigkeit mittels der Finite-Elemente-Berechnung, über Kolbenwerkstoffe, Kolbenkühlung sowie die Bauteilprüfung. Der Motorenversuch ist jedoch nach wie vor das wichtigste Element in der Bauteilentwicklung, aber auch für die Validierung von neuen Simulationsprogrammen und das systematische Erarbeiten von Konstruktionsrichtlinien. Erfahren Sie hierzu mehr – in gewohnt wissenschaftlicher Tiefe und Akribie – in dem ausführlichen Kapitel „Motorische Erprobung“.

In erster Linie sprechen wir mit diesem zweiten Band der Fachbuchreihe wieder Ingenieure und Naturwissenschaftler aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion und Instandhaltung von Motoren an. Aber auch Professoren und Studenten der Fakultäten Maschinenbau, Motorentechnik, Thermodynamik und Fahrzeugbau sowie alle Leserinnen und Leser mit Interesse an modernen Otto- und Dieselmotoren werden auf den folgenden Seiten wertvolle Anregungen finden.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und viele neue Erkenntnisse mit dieser Lektüre.

Stuttgart, Oktober 2015

Wolf-Henning Scheider
Vorsitzender der Konzern-Geschäftsführung und CEO

Heinz K. Junker
Vorsitzender des Aufsichtsrats

Danksagung

Wir danken allen Autoren, die an diesem Band mitgewirkt haben.

Dipl.-Wirt.-Ing. Jochen Adelmann
Dipl.-Ing. Ingolf Binder
Dipl.-Ing. Karlheinz Bing
Dr.-Ing. Thomas Deuß
Dipl.-Ing. Holger Ehnis
Dr.-Ing. Rolf-Gerhard Fiedler
Dipl.-Ing. Rudolf Freier
MSc Armin Frommer
Dipl.-Ing. Matthias Geisselbrecht
Dr.-Ing. Wolfgang Ißler
Dipl.-Ing. Peter Kemnitz
Dr.-Ing. Reiner Künzel
Dipl.-Ing. Ditrich Lenzen
Dr. Kurt Maier
Dipl.-Ing. Olaf Maier
Dr.-Ing. Uwe Mohr
Dipl.-Ing. Helmut Müller
Dr. Reinhard Rose
Dipl.-Ing. Wilfried Sander
Dipl.-Ing. Volker Schneider
Dr.-Ing. Wolfgang Schwab
Dipl.-Ing. Andreas Seeger-van Nie
Dipl.-Ing. Bernhard Steck
Peter Thiele
Dr.-Ing. Martin Werkmann

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 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

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 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_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 Geräuschentstehung ... 240
7.7.2 Körperschallleitwege 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 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 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 Ölabstreifrings auf das Ölemissions- und Reibungsverhalten ... 292
7.9.5.3 Einfluss der Tangentialkraft des Ölabstreifrings auf Kraftstoffverbrauch, Ölemission und die CO_2-Bilanz im NEFZ ... 294

Literaturnachweis ... 297

Glossar ... 301

Sachwortverzeichnis ... 311

1 Kolbenfunktion, Anforderungen und Bauarten

1.1 Funktion des Kolbens

1.1.1 Kolben als Element der Kraftübertragung

Die im Kraftstoff gebundene Energie wird im Zylinder des Motors während des Arbeitstakts in Wärme und Druck umgesetzt. Dabei steigen die Wärme- und Druckwerte in kurzer Zeit sehr stark an. Dem Kolben als beweglichem Teil des Brennraums fällt die Aufgabe zu, einen Teil dieser frei werdenden Energie in mechanische Arbeit umzuwandeln.

In seiner Grundstruktur ist der Kolben ein einseitig geschlossener Hohlzylinder mit den Bereichen Kolbenboden mit Ringpartie, Kolbennaben und Schaft, **Bild 1.1**. Der Kolbenboden überträgt über die Kolbennaben, den Kolbenbolzen und die Pleuelstange die bei der Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemischs entstehenden Druckkräfte auf die Kurbelwelle.

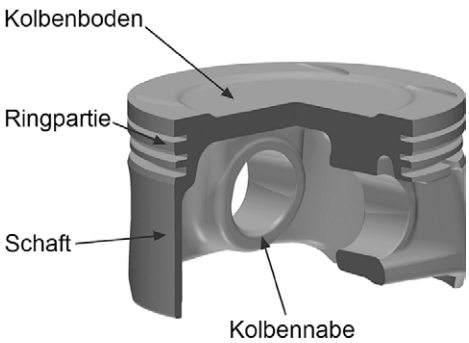

Bild 1.1: Pkw-Kolben für Ottomotoren

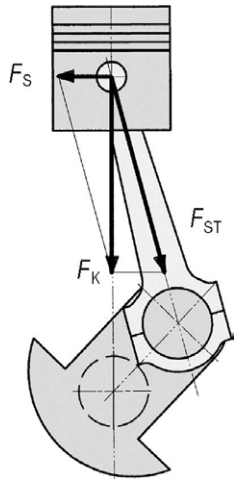

Bild 1.2: Kräfte am Kolben

Der auf den Kolbenboden wirkende Gasdruck und die oszillierende Massenträgheitskraft – in der Folge Massenkraft genannt – von Kolben und Pleuelstange ergeben zusammen die Kolbenkraft F_K, **Bild 1.2**. Durch die Umlenkung der Kolbenkraft in Richtung der Pleuelstange (Stangenkraft F_{ST}) tritt – entsprechend dem Kräfteparallelogramm – eine zusätzliche Komponente, die Seitenkraft F_S, auch Normalkraft genannt, auf. Diese drückt den Kolbenschaft an die

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015
Mahle GmbH (Hrsg.), *Kolben und motorische Erprobung*, ATZ/MTZ-Fachbuch, DOI 10.1007/978-3-658-09558-1_1

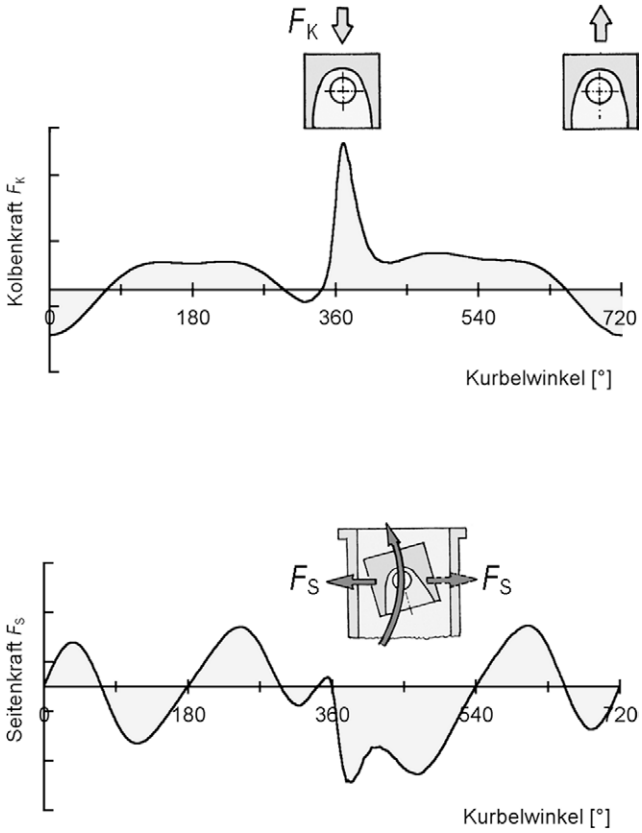

Bild 1.3:
Kraftverläufe

Zylinderlaufbahn. Während eines Arbeitsspiels ändert die Seitenkraft mehrfach ihre Richtung, wobei der Kolben von der einen an die andere Seite der Zylinderlaufbahn gedrückt wird. **Bild 1.3** zeigt die Verläufe von Kolbenkraft und Seitenkraft als Funktion des Kurbelwinkels.

1.1.2 Abdichtung und Wärmeabfuhr

Als bewegliches kraftübertragendes Bauteil muss der Kolben zusammen mit den Kolbenringen den Brennraum in allen Lastzuständen gegen Gasdurchtritt und Schmieröldurchfluss zuverlässig abdichten. Voraussetzung ist eine sorgfältige Abstimmung der Materialien, Geometrien und Oberflächen. Eine hohe Kolbenlebensdauer bedingt ein günstiges Verschleißverhalten. Dies setzt eine ausreichende Schmierölversorgung der Laufpartner voraus. Eine maßgebende Rolle spielt dabei das Ölhaltevermögen der Komponenten durch ihre Oberflächenstruktur, insbesondere durch die des Zylinders. Besonders anspruchsvoll ist dies im Bereich der Umkehrpunkte des Kolbens, denn hier verliert der hydrodynamische Schmierfilm an Bedeutung und die Mischreibung überwiegt. Die mittleren Gleitgeschwindigkeiten betragen in der Regel 10 bis 12 m/s.

Bei Viertaktmotoren unterstützt der Kolbenboden zusätzlich die Gemischbildung. Zu diesem Zweck hat er teilweise eine zerklüftete Form mit exponierten, Wärme aufnehmenden Flächen (z. B. Muldenrand), die die Belastbarkeit des Bauteils reduzieren. Bei Zweitaktmotoren mit Auslassschlitzen fungiert der Kolben auch als Steuerschieber und wird durch die mit hoher Geschwindigkeit ausströmenden Verbrennungsgase thermisch hoch belastet.

Damit der Kolben den kurzzeitig auftretenden extremen Verbrennungstemperaturen standhält, muss er die Wärme in ausreichendem Maße ableiten, Kapitel 5.6. Die Wärme an den Zylindern wird vorwiegend mit den Kolbenringen abgeleitet, aber auch mit dem Kolbenschaft. Die Innenform überträgt Wärme an die Gehäuseluft und das Öl. Für eine verbesserte Kühlwirkung kann der Kolben von unten zusätzlich mit Öl beaufschlagt werden, Kapitel 5.

1.1.3 Vielfalt der Aufgaben

Die wichtigsten Aufgaben, die der Kolben erfüllen muss, sind:

- Kraftübertragung vom und auf das Arbeitsgas
- Veränderliche Begrenzung des Arbeitsraums (Zylinder)
- Abdichten des Arbeitsraums
- Geradführung des Pleuels (Tauchkolbenmotoren)
- Wärmeabfuhr
- Unterstützung des Ladungswechsels durch Ansaugen und Ausschieben (Viertaktmotor)
- Unterstützung der Gemischbildung (durch geeignete Form der brennraumseitigen Kolbenoberfläche)
- Steuerung des Ladungswechsels (bei Zweitaktmotoren)
- Führung der Dichtelemente (Kolbenringe)
- Führung der Pleuelstange in Kurbelwellenlängsrichtung (bei Pleuelstangen-Obenführung)

Steigt die spezifische Motorleistung, steigen stets die Anforderungen an den Kolben.

1.2 Anforderungen an den Kolben

Die Erfüllung so unterschiedlicher Aufgaben wie etwa

- Anpassungsfähigkeit an Betriebsbedingungen,
- Fresssicherheit bei gleichzeitig hoher Laufruhe,
- geringes Gewicht bei ausreichender Gestaltfestigkeit,
- geringer Ölverbrauch,

- niedrige Schadstoff-Emissionswerte und
- möglichst geringe Reibverluste

resultiert in zum Teil gegenläufige Anforderungen sowohl an die Konstruktion als auch an den Werkstoff. Diese Kriterien müssen für jede Motorvariante sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Die für den Einzelfall optimale Lösung kann daher sehr unterschiedlich ausfallen.

In **Tabelle 1.1** sind die Betriebsbedingungen des Kolbens und die daraus folgenden konstruktiven und werkstoffseitigen Anforderungen zusammengestellt.

1.2.1 Gaskraft

Am Kolben herrscht ein Gleichgewicht aus Gas-, Massen- und Stützkräften. Die Stützkräfte resultieren aus Pleuelstangen- und Seitenkräften. Für die mechanische Beanspruchung ist die maximale Gaskraft im Arbeitstakt von entscheidender Bedeutung. Die in Abhängigkeit vom Verbrennungsverfahren (Otto/Diesel bzw. Zweitakt/Viertakt) und der Ladungseinbringung (Saugmotor/Lader) auftretenden maximalen Gaskräfte zeigt **Tabelle 1.1**. Bei einer Drehzahl von 6.000 1/min eines Ottomotors wird z. B. jeder Kolben (D = 90 mm) bei einer aus einem Zünddruck von 90 bar resultierenden Gaskraft im Arbeitstakt 50-mal je Sekunde mit einer Last von etwa 6 t beaufschlagt!

Neben der maximalen Gaskraft hat auch die Drucksteigerungsgeschwindigkeit Einfluss auf die Beanspruchung des Kolbens. Die Werte für Dieselmotoren betragen etwa 6 bis 12 bar/1° KW, können bei Verbrennungsstörungen aber deutlich höher sein. Die Drucksteigerungsgeschwindigkeiten von Ottomotoren liegen im Bereich von 3 bis 6 bar/1° KW. Besonders bei Verwendung von nicht geeigneten Kraftstoffen (zu niedrige Oktanzahl) können bei hoher Last Verbrennungsstörungen auftreten, die als Klopfen bezeichnet werden. Dabei sind Drucksteigerungsgeschwindigkeiten von bis zu 30 bar/1° KW möglich. Bei entsprechender Klopfintensität und Klopfbetriebsdauer kann es zu erheblichen Schäden am Kolben und damit zum Ausfall des Motors kommen. Um dies zu verhindern, sind moderne Ottomotoren mit einer Klopfregelung ausgestattet.

1.2.2 Temperaturen

Eine für die Betriebssicherheit und Lebensdauer wichtige Größe ist die Temperatur von Kolben und Zylinder. Die wenn auch nur kurz wirksamen Spitzentemperaturen des Arbeitsgases können Werte bis über 2.300 °C erreichen. Die Abgastemperaturen betragen beim Dieselmotor etwa 600 bis 850 °C und beim Ottomotor 800 bis 1.050 °C.

Tabelle 1.1: Betriebsbedingungen und Lösungsansätze für die Konstruktion und Werkstoffe der Kolben

Betriebsbedingungen	Anforderungen an den Kolben	Lösung Konstruktion	Lösung Werkstoff
Mechanische Belastung a) Kolbenboden/ Verbrennungsmulde Max. Gasdruck Zweitakt-Ottomotoren: 3,5 – 8,0 MPa Max. Gasdruck Viertakt-Ottomotoren: Saugmotor: 6,0 – 9,0 MPa Turbo: 9,0 – 13,0 MPa Max. Gasdruck Dieselmotoren: Saugmotor: 8,0 – 10,0 MPa Turbo: 14,0 – 24,0 MPa b) Kolbenschaft Seitenkraft: etwa 10 % der max. Gaskraft	Hohe statische und dynamische Festigkeit auch bei hohen Temperaturen	Genügende Wanddicken, gestaltfeste Bauweise, gleichmäßiger „Kraftfluss“ und „Wärmefluss“	Verschiedene AlSi-Gusslegierungen warm ausgelagert (T5) oder ausgehärtet (T6), gegossen (teilweise mit Faserarmierungen) oder geschmiedet; Stahl geschmiedet
c) Kolbennaben Zulässige Flächenpressung temperaturabhängig	Hohe Flächenpressung in den Nabenbohrungen; geringe plastische Deformation	Nabenbuchse	Buchsen aus Sondermessing oder Bronze
Temperaturen: Gastemperaturen im Brennraum über 2.300 °C, Abgas bis 1.050 °C Kolbenboden/Muldenrand 200 – 400 °C, bei Eisenwerkstoffen 350 – 500 °C Kolbennabe: 150 – 260 °C Kolbenschaft: 120 – 180 °C	Festigkeit muss auch bei hohen Temperaturen erhalten bleiben. Kennzeichen: Warmfestigkeit, Dauerfestigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, Zunderbeständigkeit (Stahl)	Ausreichende Wärmeflussquerschnitte, Kühlkanäle	Wie oben
Beschleunigung von Kolben und Pleuelstange bei hoher Drehzahl: zum Teil weit mehr als 25.000 m/s^2	Geringe Masse, ergibt kleine Massenkräfte bzw. Massenmomente	Leichtbau mit höchster Werkstoffausnutzung	AlSi-Legierung, geschmiedet
Gleitende Reibung in den Ringnuten, am Schaft, in den Bolzenlagern; zum Teil ungünstige Schmierverhältnisse	Geringer Reibungswiderstand, hohe Verschleißfestigkeit (beeinflusst Lebensdauer), geringe Neigung zum Fressen	Ausreichend große Gleitflächen, gleichmäßige Druckverteilung; hydrodynamische Kolbenformen im Schaftbereich; Nutarmierung	AlSi-Legierungen, Schaft verzinnt, graphitiert, beschichtet, Nutenbewehrung durch eingegossenen Ringträger oder Hartanodisierung
Anlagewechsel von einer Zylinderseite zur anderen (vor allem im Bereich des oberen Totpunktes)	Geräuscharmut, kleines „Kolbenkippen“ bei kaltem und warmem Motor, kleine Aufschlagimpulse	Geringes Laufspiel, elastische Schaftgestaltung mit optimierter Kolbenform, Desachsierung der Nabenbohrungen	Niedrige Wärmeausdehnung. Eutektische oder übereutektische AlSi-Legierungen

Die Temperatur der angesaugten Frischladung (Luft bzw. Gemisch) erreicht bei aufgeladenen Motoren bis über 200 °C. Ladeluftkühlung reduziert dieses Temperaturniveau auf 40 bis 60 °C. Das senkt die Bauteiltemperaturen und verbessert die Brennraumfüllung.

Wegen ihrer thermischen Trägheit folgen sowohl der Kolben als auch die anderen Teile im Brennraum den zyklischen Temperaturschwankungen des Arbeitsgases nicht völlig. Die Amplitude dieser Temperaturschwankungen beträgt am Muldenrand eines Aluminium-Dieselkolbens beispielsweise nur ca. 50 K und nimmt nach innen rasch weiter ab. Der den heißen Verbrennungsgasen ausgesetzte Kolbenboden nimmt eine je nach Betriebspunkt (Drehzahl, Drehmoment) unterschiedliche Wärmemenge auf. Diese leiten bei nicht ölgekühlten Kolben hauptsächlich die Kompressionsringe, in wesentlich geringerem Maß der Kolbenschaft an die Zylinderwand weiter. Bei gekühlten Kolben dagegen führt das Motoröl einen großen Anteil der anfallenden Wärmemenge ab, Kapitel 7.2.

Durch die konstruktiv festgelegten Werkstoffquerschnitte ergeben sich Wärmeströme, die zu charakteristischen Temperaturfeldern führen. Typische Temperaturverteilungen bei Kolben für Otto- und Dieselmotoren zeigen die **Bilder 1.4** und **1.5**.

Die Höhe und Verteilung der Temperaturen im Kolben hängt im Wesentlichen von folgenden Parametern ab:

- Arbeitsprozess (Otto/Diesel)
- Arbeitsverfahren (Viertakt/Zweitakt)
- Verbrennungsverfahren (Einspritzung direkt/indirekt)
- Temperatur der zugeführten Frischladung (abhängig von Aufladung und Ladeluftkühlung)
- Betriebspunkt des Motors (Drehzahl, Drehmoment)
- Motorkühlung (Wasser/Luft)
- Konstruktive Ausbildung von Kolben und Zylinderkopf (Lage und Zahl der Gaskanäle und Ventile, Kolbenbauart, Kolbenwerkstoff)
- Kolbenkühlung (ja/nein)
- Intensität der Kühlung (Anspritzkühlung, Kühlkanal, Kühlkanallage usw.)

Die Festigkeitseigenschaften der Kolbenwerkstoffe, vornehmlich von Leichtmetallen, sind stark temperaturabhängig. Niveau und Verteilung der Temperaturen im Kolben bestimmen wesentlich die ertragbaren mechanischen Beanspruchungen. Hohe thermische Belastung hat eine drastische Reduzierung der Dauerfestigkeit des Kolbenwerkstoffs zur Folge. Die kritischsten Stellen sind beim Dieselmotor mit Direkteinspritzung der Nabenzenit sowie der Muldenrand, beim Ottomotor der Übergangsbereich von der Nabenanbindung zum Kolbenboden sowie zum Schaft.

Von Bedeutung sind ferner die Temperaturen in der 1. Kolbenringnut hinsichtlich Ölverkokung. Bei Überschreiten gewisser Grenzwerte neigen die Kolbenringe infolge Rückstandsbildung in

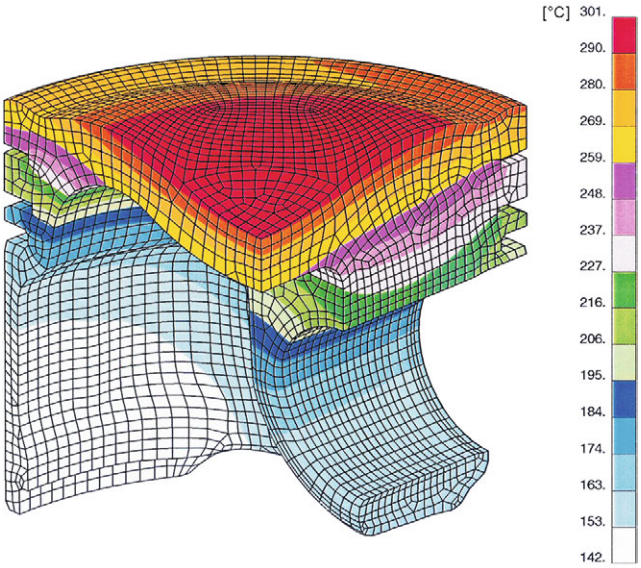

Bild 1.4:
Temperaturverteilung an einem Kolben für einen Ottomotor

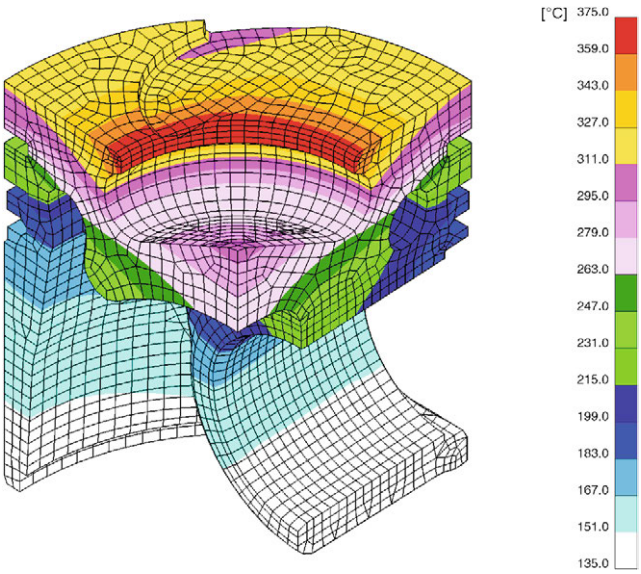

Bild 1.5:
Temperaturverteilung an einem Kolben mit Kühlkanal für einen Dieselmotor

der Kolbenringnut zum „Festgehen“ (Verkokung) und sind dann in ihrer Funktion beeinträchtigt. Neben den Maximaltemperaturen ist die Abhängigkeit der Kolbentemperaturen von den motorischen Betriebsbedingungen (wie Drehzahl, Mitteldruck, Zündwinkel, Einspritzmenge) von Bedeutung. **Tabelle 7.2** zeigt typische Werte für Pkw-Otto- und Dieselmotoren im Bereich der 1. Kolbenringnut.

1.2.3 Kolbenmasse

Der mit Kolbenringen, Kolbenbolzen, Sicherungsringen ausgerüstete Kolben bildet mit dem oszillierenden Pleuelstangenanteil die oszillierende Masse. Je nach Motorbauart entstehen dadurch freie Massenkräfte und/oder freie Momente, die zum Teil nicht mehr oder nur mit erheblichem Aufwand ausgeglichen werden können. Aus dieser Besonderheit resultiert, insbesondere bei schnell laufenden Motoren, der Wunsch nach niedrigsten oszillierenden Massen. Der Kolben und der Kolbenbolzen haben den größten Anteil an den oszillierenden Massen. Somit muss die Gewichtsreduzierung hier beginnen.

Etwa 80 % der Kolbenmasse befindet sich im Bereich von der Mitte des Kolbenbolzens bis zur Bodenoberkante. Die restlichen 20 % sind im Bereich ab Mitte Kolbenbolzen bis zum Schaftende. Die Festlegung der Kompressionshöhe KH ist somit von entscheidender Bedeutung, da so bereits etwa 80 % der Kolbenmasse vorgegeben sind.

Bei Kolben für Ottomotoren mit Direkteinspritzung kann der Kolbenboden zur Gemischbildung mit herangezogen und entsprechend geformt werden. Diese Kolben sind höher und schwerer. Der Schwerpunkt verschiebt sich deshalb nach oben.

Kolbenmassen m_K können am besten verglichen werden, wenn man sie (ohne Kolbenringe und Kolbenbolzen) auf das Vergleichsvolumen D^3 bezieht, wie in **Bild 1.6** dargestellt. Die Kompressionshöhe ist jedoch immer mit in die Betrachtung einzubeziehen. Für bewährte Kolbenausführungen sind die Massekennzahlen („X-Faktoren“) m_K/D^3 in **Tabelle 1.2** dargestellt.

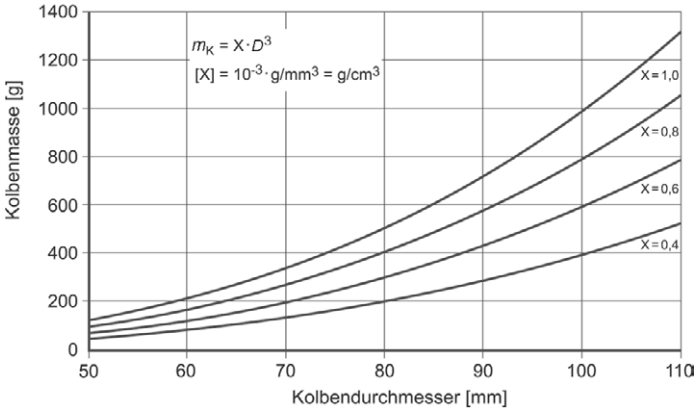

Bild 1.6: Kolbenmassen m_K (ohne Kolbenringe und Kolbenbolzen) von Pkw-Motoren in Abhängigkeit vom Kolbendurchmesser

Tabelle 1.2: Massekennzahlen für Pkw-Kolben <100 mm Durchmesser aus Al-Legierungen

Arbeitsverfahren	Massekennzahl m_K/D^3 [g/cm³]
Zweitakt-Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung	0,50 – 0,70
Viertakt-Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung	0,40 – 0,60
Viertakt-Ottomotoren mit Direkteinspritzung	0,45 – 0,65
Viertakt-Dieselmotoren	0,90 – 1,10

1.2.4 Reibleistung und Verschleiß

In Zeiten zunehmenden Umweltbewusstseins bedingt durch den Klimawandel und aufgrund der CO_2-Emissionsgesetzgebungen um diesem zu begegnen, rückt das Thema Reibleistungsreduzierung im Motor verstärkt in den Fokus. Als bewegliches Element kann – wie nachfolgend beschrieben – der Kolben hierzu einen wichtigen Beitrag leisten.

Einbauspiel:
Eine Haupteinflussgröße auf die Kolbenreibung ist das Einbauspiel. Durch ein entsprechend großes Einbauspiel kann die im warmen Betriebszustand übliche thermische Verspannung zwischen Kolben und Zylinder deutlich reduziert werden. Zu große Spiele wirken jedoch kontraproduktiv, da sie zu starker Sekundärbewegung und einem Verkanten des Kolbens im Zylinder („Schubladeneffekt“) führen können. Dabei kann der hydrodynamische Schmierfilm durchgedrückt werden und Mischreibung entstehen. Auch können zu große Einbauspiele akustisch nachteilig wirken. Durch den kleineren Wärmedehnungskoeffizienten können sich für Stahlkolben im Vergleich zu Aluminiumkolben Reibungsvorteile ergeben.

Kolbenform (vgl. Kapitel 2.2):
Für kleine Reibleistungswerte sollen die lokalen Kolbenform-Einzüge in Richtung der Kolbenachse („Mantellinienabfallwerte“) und die Ovalitäten so ausgelegt werden, dass sich im gewünschten Tragbereich gleichmäßige Flächenpressungen einstellen. So kann in der Regel erreicht werden, dass lediglich in den Umkehrpunkten des Kolbens (oberer und unterer Totpunkt) das hydrodynamische Schmierverhalten durch die Änderung der Bewegungsrichtung des Kolbens gestört wird, d. h., dass sich im Bereich der tragenden Fläche ein Mischreibungszustand einstellt. **Bild 1.7** zeigt für diesen Fall beispielhaft den Schmierspalt zwischen Kolben und Zylinder.

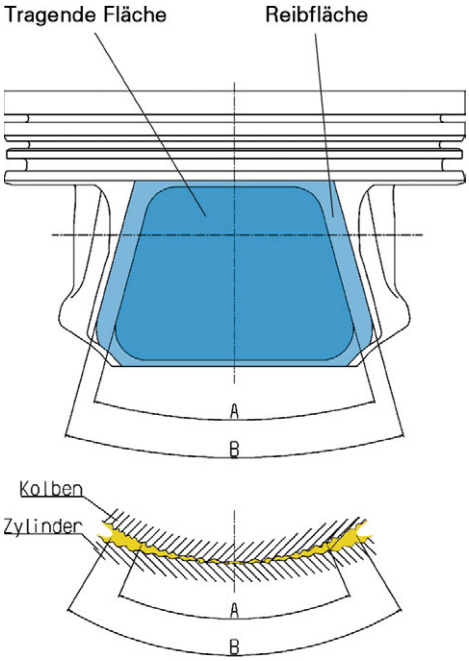

Bild 1.7:
Schmierspalt zwischen Kolben und Zylinder

Rauheit:

Neben der Schaftform hat auch die Oberfläche der Schaftlauffläche einen großen Einfluss auf das Gleitverhalten des Kolbens. Zu große Rauheiten erhöhen die reibungsbedingten Leistungsverluste. Für den einwandfreien Betrieb des Kolbens im Zylinder spielt neben den Reibungskräften am Schaft auch die Schaftschmierung eine entscheidende Rolle. Gewisse Mindestrauheiten am Kolbenschaft und der gehonten Zylinderlauffläche

- begünstigen das Einlaufverhalten,
- vermeiden abrasiven Verschleiß,
- begünstigen die Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilms zwischen Kolbenschaft und Zylinderwand und
- verhindern ein Fressen des Kolbens, d. h. ein lokales Verschweißen zwischen Kolben und Zylinder infolge von Spiel- oder Schmierölmangel.

Zu große Schaftrauheiten erhöhen die reibungsbedingten Leistungsverluste, während zu geringe Schaftrauheiten das Einlaufen des Kolbens beeinträchtigen. Ein guter Kompromiss aus den genannten Anforderungen führt zu Rauheitswerten am Kolbenschaft im Bereich von R_a = 1,5 – 5 µm.

Laufflächen-Schutzschichten:
Laufflächen-Schutzschichten wie etwa MAHLE GRAFAL® oder EvoGlide zeigen einen positiven Einfluss auf die Reibverluste in den Mischreibungszuständen, steigern den Verschleißwiderstand und verbessern die Sicherheit gegen Fressen.

1.2.5 Blow-by

Eine der Hauptaufgaben des Kolbens und der Kolbenringe ist die Abdichtung des unter Druck stehenden Verbrennungsraums zum Kurbelgehäuse. Während des Bewegungsablaufs können zwischen Kolben, Zylinder und Kolbenringen Verbrennungsgase passieren (Blow-by) und ins Kurbelgehäuse gelangen. Durchblasendes Leckagegas bedeutet neben dem Energieverlust auch eine Gefährdung der Kolben- und Kolbenringschmierung durch Verdrängung und Verschmutzung des Schmierfilms sowie durch Ölverkokung infolge überhöhter Temperaturen an den vom Brenngas beaufschlagten Stellen. Außerdem machen überhöhte Blow-by-Werte eine größere Kurbelgehäuseentlüftung erforderlich.

Die Abdichtung gegen Gasdurchtritt übernimmt hauptsächlich der 1. Kolbenring, ein Kompressionsring. Bei Saugmotoren beträgt die Durchblasemenge max. 1 %, bei Motoren mit Aufladung max. 1,5 % des theoretischen Ansaugvolumens.

1.3 Kolbenbauarten

Die unterschiedlichen Arbeitsverfahren der Verbrennungsmotoren sorgen für eine große Vielfalt an Motorbauarten. Jede Motorbauart verlangt ihre eigene Kolbenvariante, gekennzeichnet durch Bauart, Gestalt, Abmessungen und Werkstoff.

Im Folgenden sind die wichtigsten Kolbenbauarten des Motorenbaus dargestellt. Daneben gibt es neue Entwicklungsrichtungen, wie z. B. Kolben für extrem niedrig bauende Motoren oder Kolben aus Verbundwerkstoffen mit lokalen Verstärkungselementen.

1.3.1 Kolben für Viertakt-Ottomotoren

In modernen Ottomotoren werden Leichtbaukonstruktionen mit symmetrischen oder asymmetrischen Schaftformen und gegebenenfalls unterschiedlichen Wanddicken für die Druck-

und Gegendruckseite eingesetzt. Diese Kolbenbauarten zeichnen sich durch ein geringes Gewicht und besondere Flexibilität im mittleren und unteren Schaftbereich aus.

1.3.1.1 Regelkolben

Regelkolben sind Kolben mit Streifeneinlagen, die die Wärmeausdehnung regeln. Sie werden in Grauguss-Kurbelgehäusen eingebaut. Das Hauptziel der Regelkolben-Konstruktionen und vieler Erfindungen auf diesem Sektor war und ist, die verhältnismäßig großen Unterschiede in der Wärmeausdehnung zwischen Grauguss-Kurbelgehäuse und Aluminiumkolben zu verringern. Die bekannten Lösungen reichen vom Invarstreifen-Kolben bis zu den Autothermik- oder Autothermatik-Kolben.

Aufgrund einiger ungünstiger Eigenschaften – Kerbwirkung durch die eingegossenen Streifen, erhöhte Kolbenmasse und Kostennachteil – sind die Regelkolben immer mehr in den Hintergrund getreten. Der Vollständigkeit halber werden aber ältere Bauarten kurz angesprochen.

Autothermik-Kolben

Autothermik-Kolben, **Bild 1.8**, sind im Übergang vom Kolbenboden zum Schaft auf Höhe der Ölringnut geschlitzt. Sie zeichnen sich durch besonders ruhigen Lauf aus. Die zwischen Schaft und Kolbennaben eingegossenen Streifen aus unlegiertem Stahl bilden zusammen mit dem sie umgebenden Leichtmetall Regelglieder. Diese verringern die Wärmeausdehnung des Schafts in der für die Führung im Zylinder maßgeblichen Richtung. Aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Belastbarkeit (Schlitz) sind Autothermik-Kolben jedoch nicht mehr zeitgemäß.

Autothermatik-Kolben

Autothermatik-Kolben, **Bild 1.9**, arbeiten nach dem gleichen Regelprinzip wie Autothermik-Kolben. Beim Autothermatik-Kolben ist jedoch der Übergang vom Kopfteil zum Schaft nicht geschlitzt. Die Übergangsquerschnitte sind so bemessen, dass sie einerseits den Wärmefluss vom Kolbenboden zum Schaft kaum behindern und andererseits die Wirkung der Stahlstreifen durch die Verbindung des Schafts mit dem starren Kopfteil noch erhalten bleibt. So vereint diese Kolbenkonstruktion die hohe Festigkeit des ungeschlitzten Kolbens mit den Vorzügen der Regelstreifenbauart.

1.3.1.2 Kastenkolben

Diese Kolbenbauart, **Bild 1.10**, zeichnet sich durch eine gegenüber den Regelkolben reduzierte Masse, eine optimierte Abstützung und die kastenähnliche, oft leicht ovale Schaftgestaltung aus. Der Kastenkolben eignet sich sowohl für Aluminium- als auch Grauguss-Kurbelgehäuse. Durch flexible Schaftgestaltung kann die unterschiedliche Wärmeausdehnung zwischen Graugussgehäuse und Aluminiumkolben sehr gut im elastischen Bereich kompensiert werden. Im Falle unterschiedlicher Kastenbreiten auf Druck- und Gegendruckseite bezeichnet man die Kolben als Asymdukt-Kolben. Die Kastenkolben sind gegossen oder geschmiedet.

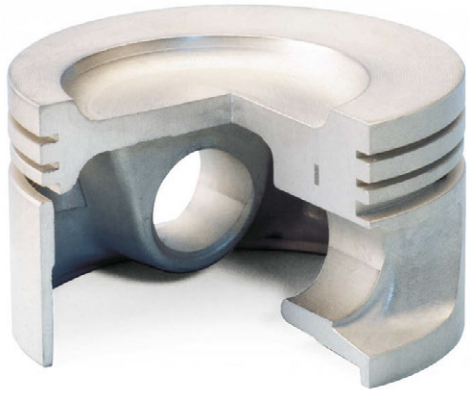

Bild 1.8: Autothermik-Kolben

Bild 1.9: Autothermatik-Kolben

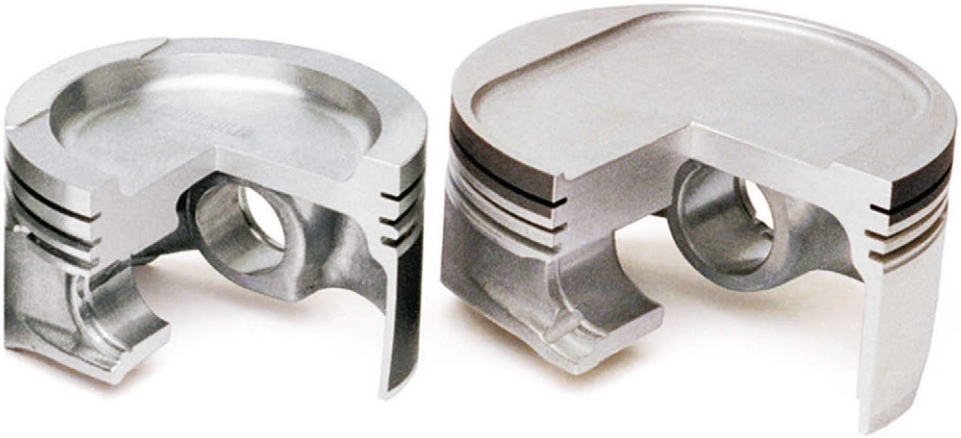

Bild 1.10: Asymdukt-Kolben

Neben dem klassischen Kastenkolben mit senkrechten Kastenwänden haben sich inzwischen neue Formen mit oben eingezogenen Kastenwänden etabliert. Ein Beispiel ist der EVOTEC®-Kolben, Kapitel 1.3.1.3.

Die Kompressionsringnut kann in aufgeladenen Motoren mit hohen Zünddrücken durch einen Ringträger gegen Verschleiß und Deformation geschützt werden, **Bild 1.11**.

Kolben für Motoren mit sehr hohen spezifischen Leistungen (> 100 kW/l) haben gegebenenfalls einen Kühlkanal, **Bild 1.12**.

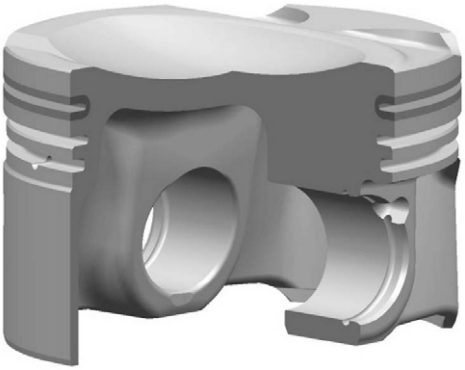

Bild 1.11: Ringträgerkolben für einen Ottomotor

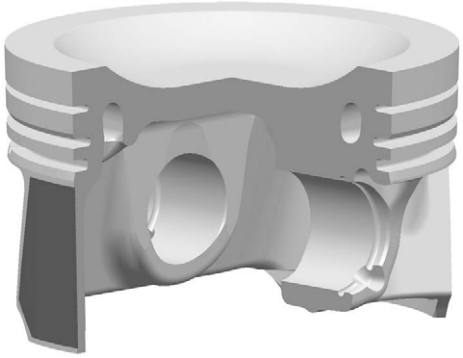

Bild 1.12: Kolben mit Kühlkanal für einen Ottomotor

1.3.1.3 EVOTEC®-Kolben

Das derzeit größte Potenzial zur Reduzierung der Kolbenmasse bei Viertakt-Ottomotoren bietet die EVOTEC®-Bauweise, die vor allem in Kombination mit Trapez-Abstützung eingesetzt wird, **Bild 1.13**.

Stark schräg gestellte Kastenwände erlauben eine besonders ausgeprägte Hochgießung hinter den Ringnuten im Nabenbereich bei guter Elastizität im unteren Schaftbereich. Gleichzeitig sorgt die Anbindung der Kastenwände weit innen am Kolbenboden – kombiniert mit Stützrippen im Kolbenfenster zwischen Ringbereich und Kastenwand – für eine herausragende Struktursteifigkeit bei sehr geringen Querschnitten.

Ein weiteres wesentliches Merkmal dieses Kolbenkonzepts ist die asymmetrische Ausführung der Kastenwände. Der druckseitig höheren Seitenkraftbelastung Rechnung tragend, ist

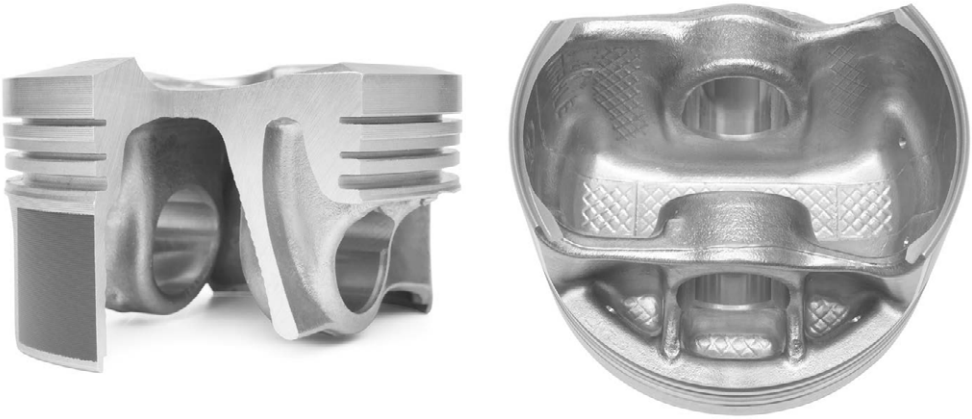

Bild 1.13: EVOTEC®-Kolben

der Abstand der Kastenwände auf der Druckseite geringer. Denn der kürzere Hebelarm zwischen der Kastenwand und dem Kontaktbereich zwischen Kolben und Zylinder sorgt für eine reduzierte Biegemomentbeanspruchung. Das erlaubt geringere Querschnitte auch bei extrem hohen Seitenkräften, die bevorzugt bei aufgeladenen Ottomotoren mit direkter Einspritzung auftreten. Um dennoch die notwendige Elastizität und gute Führungseigenschaften zu gewährleisten, wird die deutlich geringer belastete Gegendruckseite mit weiter auseinanderliegenden Kastenwänden versehen. Eine sorgfältige Auslegung der Kolbenform (siehe Kapitel 2.2) sorgt auf der Druckseite für gleichmäßig niedrige Flächenpressungen auch bei höchsten Belastungen.

1.3.1.4 EVOTEC® 2-Kolben

Eine konsequente Weiterentwicklung des EVOTEC®-Kolbens ist der EVOTEC® 2-Kolben, **Bild 1.14**. Den EVOTEC® 2-Kolben zeichnen eine

- neue, belastungsoptimierte Form der Schaft-Kastenwand-Anbindung zur Festigkeitssteigerung sowie
- reduzierte Bodenwandstärken zur Gewichtsreduzierung bei Festigkeitsneutralität aufgrund Temperaturabsenkung

aus.

Die Gesamtheit aller Maßnahmen zur Weiterentwicklung des MAHLE Kolbens EVOTEC® zum EVOTEC® 2 liefert bei Kostenneutralität eine Gewichtsreduzierung von ungefähr 5 % und darüber hinaus eine bereichsweise Erhöhung der Strukturfestigkeit die den steigenden Anforderungen künftiger Motorengenerationen Rechnung trägt.

Bild 1.14: EVOTEC® 2-Kolben

1.3.1.5 Geschmiedete Aluminiumkolben

In Motoren mit sehr hohen Leistungsdichten – beispielsweise hoch belastete aufgeladene Ottomotoren – kommen gegossene Kolben an ihre Grenzen. Für diesen Einsatzbereich bieten sich besonders gut MAHLE Schmiedekolben an, **Bild 1.15**. Der Festigkeitsvorteil im Temperaturbereich bis etwa 250 °C verbessert die Belastbarkeit bei Seitenkräften, erhöht die Tragfähigkeit der Naben und die Abreißfestigkeit. Schmiedekolben eignen sich daher speziell für Hochdrehzahlkonzepte und aufgeladene Motoren. Durch die hohe Duktilität des geschmiedeten Materials reagieren sie außerdem toleranter auf Spitzendrücke, die entstehen können, wenn ein Motor sehr eng an der Klopfgrenze betrieben wird. Das ermöglicht u. a. geringere Ringsteghöhen und damit niedrige Kompressionshöhen. Aufgrund der hohen Stabilität des Herstellprozesses lassen sich Schmiedekolben grenzwertig auslegen, um das Bauteilgewicht zu minimieren.

Nachteilig im Vergleich zum gegossenen Pendant sind die höheren Kosten für die Herstellung des Schmiedekolbens. Hinzu kommt eine eingeschränkte Designflexibilität. Insbesondere Hinterschnitte oder Eingussteile wie Ringträger bzw. Salzkerne sind nicht darstellbar.

Bei Kolben für den Rennsport handelt es sich durchweg um Sonderkonstruktionen, **Bild 1.16**. Die Kompressionshöhe KH ist sehr niedrig und der Kolben insgesamt extrem gewichtsoptimiert. Es kommen nur geschmiedete Kolben zum Einsatz. Gewichtsoptimierung und Kolbenkühlung sind entscheidende Auslegungskriterien. In der Formel 1 sind spezifische Leistungen von mehr als 200 kW/l und Drehzahlen von mehr als 19.000 1/min üblich. Die Lebensdauer der Kolben ist auf die extremen Bedingungen abgestimmt.

Bild 1.15: Geschmiedeter Aluminiumkolben

Bild 1.16: Geschmiedeter Kolben für die Formel 1