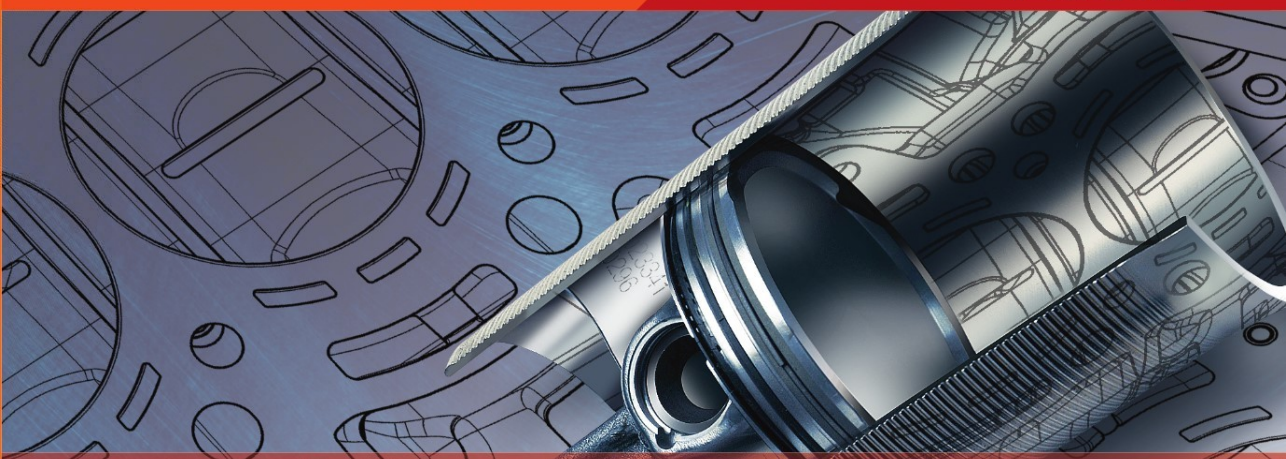
MAHLE GmbH (Hrsg.)

Kolben und motorische Erprobung

PRAXIS



VIEWEG+ TEUBNER

MTZ

MAHLE

MAHLE GmbH (Hrsg.)

Kolben und motorische Erprobung

MAHLE GmbH (Hrsg.)

Kolben und motorische Erprobung

Mit 269 Abbildungen und 20 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch

VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2011

Herausgeber:
© MAHLE GmbH, Stuttgart 2011

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Satz: Klementz publishing services, Gundelfingen
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1452-4

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

der zweite Band der MAHLE Produktkunde, einer mehrbändigen Fachbuchreihe, ist sowohl eine Ergänzung als auch Vertiefung zum ersten Band „Zylinderkomponenten“. In diesem Band 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.

Ich wünsche Ihnen viel Freunde und viele neue Erkenntnisse mit dieser Lektüre.

Stuttgart, Oktober 2010

Heinz K. Junker

Danksagung

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

Dipl.-Ing. Ingolf Binder
Dipl.-Ing. Karlheinz Bing
Dipl.-Ing. Thomas Deuß
Dipl.-Ing. Holger Ehnis
Dr.-Ing. Rolf-Gerhard Fiedler
Dipl.-Ing. Rudolf Freier
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. 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 5
1.2.2 Temperaturen 5
1.2.3 Kolbenmasse 7
1.2.4 Reibung und Verschleiß 8
1.2.5 Blow-by 9

1.3 Kolbenbauarten 10
1.3.1 Kolben für Viertakt-Ottomotoren 10
1.3.1.1 Regelkolben 10
1.3.1.2 Kasten-Kolben 11
1.3.1.3 EVOTEC®-Kolben 12
1.3.1.4 Geschmiedete Aluminiumkolben 13
1.3.2 Kolben für Zweitaktmotoren 14
1.3.3 Kolben für Dieselmotoren 15
1.3.3.1 Ringträgerkolben 15
1.3.3.2 Kühlkanalkolben 16
1.3.3.3 Kolben mit gekühltem Ringträger 16
1.3.3.4 Kolben mit Buchsen in der Nabenbohrung 16
1.3.3.5 FERROTHERM®-Kolben 17
1.3.3.6 Monotherm®-Kolben 17
1.3.3.7 Optimierter Monotherm®-Kolben 18
1.3.3.8 MonoXcomp®-Kolben 19
1.3.3.9 MonoWeld®-Kolben 20
1.3.3.10 Elektronenstrahlgeschweißte Kolben 20
1.3.4 Gebaute Kolben für Großmotoren 21
1.3.4.1 Einsatzbereich und Ausführungsform 21
1.3.4.2 Kolbenoberteil 22
1.3.4.3 Kolbenunterteil aus geschmiedeter Al-Legierung 22
1.3.4.4 Kolbenunterteil aus Sphäroguss 23
1.3.4.5 Kolbenunterteil aus Schmiedestahl 24

2 Kolben-Gestaltungsrichtlinien 25

2.1 Begriffe und Hauptabmessungen 25
2.1.1 Bodenformen und Bodendicke 26
2.1.2 Kompressionshöhe 27
2.1.3 Feuersteg 27
2.1.4 Ringnuten und Ringstege 28
2.1.5 Gesamtlänge 29

2.1.6 Nabenbohrung ... 29
2.1.6.1 Rauheit ... 29
2.1.6.2 Einbauspiel ... 29
2.1.6.3 Toleranzen ... 30
2.1.6.4 Desachsierung ... 30
2.1.7 Kolbenschaft ... 30
2.2 Kolbenform ... 32
2.2.1 Kolbenspiel ... 32
2.2.2 Ovalität ... 32
2.2.3 Schaft- und Ringpartieeinzug ... 33
2.2.4 Maß- und Formtoleranzen ... 34
2.2.5 Einbauspiel ... 34
2.2.6 Maßgruppen ... 36
2.2.7 Schaftoberfläche ... 36

3 Simulation der Betriebsfestigkeit von Kolben mittels FEM ... 37
3.1 Modellbildung ... 37
3.2 Randbedingungen aus motorischer Belastung ... 39
3.2.1 Thermische Belastung ... 39
3.2.2 Mechanische Belastung ... 41
3.2.2.1 Gaskraft ... 41
3.2.2.2 Massenkraft ... 41
3.2.2.3 Seitenkraft ... 42
3.3 Randbedingungen aus Herstellung und Montage ... 43
3.3.1 Gießprozess/Erstarren ... 43
3.3.2 Eingussteile ... 43
3.3.3 Einpressteile ... 43
3.3.4 Verschraubungen ... 44
3.4 Temperaturfeld und Wärmestrom aus Temperaturbelastung ... 44
3.5 Spannungsverhalten ... 48
3.5.1 Spannungen aus Temperaturbelastung ... 48
3.5.2 Spannungen aus mechanischer Belastung ... 50
3.5.3 Spannungen aus Herstellung und Montage ... 53
3.6 Rechnerischer Nachweis der Betriebsfestigkeit ... 54

4 Kolbenwerkstoffe ... 59
4.1 Anforderungen an Kolbenwerkstoffe ... 59
4.2 Aluminiumwerkstoffe ... 60
4.2.1 Wärmebehandlung ... 61
4.2.2 Kolbenlegierungen ... 63
4.2.3 Faserverstärkung ... 69
4.3 Eisenwerkstoffe ... 69
4.3.1 Gusseisen-Werkstoffe ... 71
4.3.2 Stähle ... 73
4.4 Kupferwerkstoffe für Nabenbuchsen ... 76

4.5 Beschichtungen ... 78
4.5.1 Beschichtungen am Kolbenschaft ... 78
4.5.1.1 GRAFAL® 255 bzw. EvoGlide ... 79
4.5.1.2 Zinn ... 79
4.5.1.3 Ferrostan/FerroTec® ... 79
4.5.1.4 FERROPRINT® ... 80
4.5.1.5 Hartoxid in der 1. Kolbenringnut ... 80
4.5.1.6 Hartoxid am Boden ... 80
4.5.1.7 Phosphat ... 81
4.5.1.8 GRAFAL® 210 ... 81
4.5.1.9 Chrom-Auflageflächen ... 81
4.5.1.10 Chrom-Ringnuten ... 81
4.5.2 Anwendungstabelle ... 82

5 Kolbenkühlung ... 83
5.1 Thermische Belastung ... 83
5.2 Verbrennung und Brennstrahlen ... 83
5.3 Temperaturprofil am Muldenrand ... 84
5.4 Temperaturprofil am Kolben ... 85
5.5 Auswirkungen auf die Funktion des Kolbens ... 86
5.5.1 Thermisch bedingte Verformung ... 86
5.5.2 Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte ... 86
5.5.3 Temperatureinfluss auf die Kolbenringe ... 87
5.6 Einflussmöglichkeiten auf die Kolbentemperatur ... 88
5.7 Kühlungsarten ... 88
5.7.1 Kolben ohne Kolbenkühlung ... 88
5.7.2 Kolben mit Anspritzkühlung ... 88
5.7.3 Kolben mit Kühlkanal ... 89
5.7.3.1 Salzkern-Kühlkanalkolben ... 89
5.7.3.2 Kolben mit gekühltem Ringträger ... 90
5.7.3.3 Spanend bearbeitete Kühlkanäle ... 92
5.7.4 Gebaute Kolben mit Kühlräumen ... 93
5.7.4.1 Shakerkühlung ... 94
5.7.4.2 Bohrungskühlung ... 94
5.8 Zuführung des Kühlöls ... 95
5.8.1 Zuführung des Kühlöls per Freistrahl ... 95
5.8.1.1 Düsenausführung bei Anspritzkühlung ... 96
5.8.1.2 Düsenausführung zur Versorgung von Kühlkanälen/-räumen ... 96
5.8.2 Zuführung über Kurbelwelle und Pleuelstange ... 96
5.8.2.1 Zuführung über Kolbenbolzen und Kolbennabe ... 97
5.8.2.2 Zuführung über Gleitschuh ... 97
5.8.2.3 Zuführung über Freistrahl aus der Pleuelstange ... 97
5.9 Wärmeströme am Kolben ... 97
5.10 Ermittlung der thermischen Belastung ... 99
5.11 Numerische Berechnung mit der FE-Methode ... 99

5.12 Außermotorische Shakeruntersuchungen ... 100
5.13 Kenngrößen ... 101
5.14 Versuchseinrichtungen ... 104
5.15 Simulation der Ölbewegung ... 105

6 Bauteilprüfung ... 107
6.1 Statische Bauteilprüfung ... 108
6.2 Dynamische Bauteilprüfung ... 110
6.3 Verschleißprüfung ... 113

7 Motorische Erprobung ... 115
7.1 Prüflaufprogramme mit beispielhaften Laufergebnissen ... 115
7.1.1 Standard-Prüflaufprogramme ... 116
7.1.1.1 Volllastkurve ... 116
7.1.1.2 Blow-by-Verhalten ... 116
7.1.1.3 Fresstest ... 118
7.1.1.4 Entwicklungslauf ... 118
7.1.2 Langzeit-Prüflaufprogramme ... 119
7.1.2.1 Standard-Dauerlauf ... 119
7.1.2.2 Kalt-Warm-Dauerlauf ... 120
7.1.3 Sonder-Prüflaufprogramme ... 120
7.1.3.1 Kaltstarttest ... 120
7.1.3.2 Microwelding-Test ... 121
7.1.3.3 Fretting-Test ... 122
7.1.3.4 Brandspurtest ... 123
7.2 Angewandte Messverfahren zur Bestimmung der Kolbentemperatur ... 126
7.2.1 Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur ... 127
7.2.1.1 Thermomechanische Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur ... 127
7.2.1.1.1 Anwendung von Schmelzstiften ... 127
7.2.1.1.2 Anwendung von Templugs ... 128
7.2.1.2 Thermoelektrische Verfahren zur Messung der Kolbentemperatur ... 129
7.2.1.2.1 Anwendung von NTC-Sensoren ... 129
7.2.1.2.2 Anwendung von NiCr-Ni-Thermoelementen ... 130
7.2.1.3 Übertragung der Messwerte vom Thermoelement ... 130
7.2.1.3.1 Übertragung der Messwerte vom Thermoelement mittels durch Schwinge gestützter Messleitung ... 130
7.2.1.3.2 Übertragung der Messwerte vom Thermoelement mittels Telemetrie ... 131
7.2.1.4 Bewertung der bei MAHLE verwendeten Verfahren zur Messung der Kolbentemperaturen ... 133
7.2.2 Kolbentemperaturen an Otto- und Dieselmotoren ... 133
7.2.2.1 Typische Temperaturmaxima an Kolben ... 135
7.2.2.2 Einfluss verschiedener Betriebsgrößen auf die Kolbentemperatur ... 135

7.2.2.3 Einfluss der Kühlölmenge auf die Kolbentemperatur 137
7.2.2.4 Kolbentemperaturmessung im transienten Programm 139

7.3 Reibleistungsmessungen am befeuerten Vollmotor 140
7.3.1 Messverfahren zur Bestimmung des Reibmitteldrucks 142
7.3.1.1 Willans-Linie 142
7.3.1.2 Schleppen und Strip-Methode 142
7.3.1.3 Zylinderabschaltung 143
7.3.1.4 Auslaufversuch 143
7.3.1.5 Floating-Liner-Verfahren 143
7.3.1.6 Indiziermethode 144
7.3.2 Friction Mapping mittels Indiziermethode 145
7.3.2.1 Anforderungsprofil 145
7.3.2.2 Reibleistungsprüfstand für Pkw-Motoren 146
7.3.2.3 Mess- und Auswerteverfahren 149
7.3.3 Ausgewählte Ergebnisse 151
7.3.3.1 Kolbeneinbauspiel 151
7.3.3.2 Oberflächenrauheit des Kolbenschafts 153
7.3.3.3 Kolbenbolzendesachsierung 154
7.3.3.4 Höhe des Kolbenrings in Nut 1 155
7.3.3.5 Tangentialkraft des Ölabstreifrings 156
7.3.3.6 Beschichtung des Kolbenbolzens 158
7.3.3.7 Motorölviskosität 159
7.3.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse und Ausblick 160

7.4 Verschleißuntersuchungen an der Kolbengruppe 164
7.4.1 Kolbenschaft 164
7.4.1.1 Schafteinfall und Schichtverschleiß 164
7.4.1.2 Ovalität 166
7.4.2 Kolbenring- und Zylinderlauffläche 167
7.4.2.1 Kolbenringlauffläche 167
7.4.2.2 Zylinderlauffläche 169
7.4.2.3 Schlauchfedern 170
7.4.2.4 Abnormale Verschleißformen 170
7.4.3 Kolbenringflanken und Kolbenringnut 171
7.4.3.1 Flanken des 1. Kolbenrings 171
7.4.3.2 Flanken der 1. Kolbenringnut 172
7.4.4 Kolbenbolzen und Kolbennabe 172
7.4.4.1 Kolbenbolzen 172
7.4.4.2 Kolbennabe 175
7.4.5 Sicherungsringe und Sicherungsringnut 176
7.4.6 Ölkohleaufbau und Zylinderpolierer 178

7.5 Kolbenbelastung durch klopfende Verbrennung 180
7.5.1 Klopfschäden und Schadensbeurteilung 181
7.5.2 Klopfmesstechnik und das MAHLE KI-Meter 184
7.5.3 Beispielhafte Messergebnisse 187
7.5.4 Erkennungsgüte von Klopfregelungen 190
7.5.5 Das Phänomen Megaklopfer 192

7.6 Kolbengeräusch und Kolbenquerbewegung 195
7.6.1 Vorgehensweise zur systematischen Minimierung von Kolbengeräuschen 195

7.6.2 Kolbengeräusche am Ottomotor ... 197
7.6.2.1 Subjektive Geräuschbeurteilung ... 197
7.6.2.2 Objektive Geräuschbeurteilung und Quantifizierung ... 199
7.6.2.3 Kolbenquerbewegung und Einflussparameter am Ottomotor 204
7.6.3 Kolbengeräusche am Dieselmotor ... 208
7.6.3.1 Subjektive Geräuschbeurteilung ... 208
7.6.3.2 Objektive Geräuschbeurteilung und Quantifizierung ... 214
7.6.3.3 Kolbenquerbewegung und Einflussparameter am Dieselmotor ... 218

7.7 Kolbenbolzengeräusch ... 220
7.7.1 Geräuschentstehung ... 220
7.7.2 Körperschallleitwege und Messprogramm ... 221
7.7.3 Auswerteverfahren im Zeitbereich ... 223
7.7.4 Ergebnisse aus Parameterstudien ... 225
7.7.4.1 Einfluss des Kolbenbolzenspiels ... 225
7.7.4.2 Einfluss der Nabengeometrie ... 226
7.7.4.2.1 Öltaschen und umlaufende Schmiernut ... 226
7.7.4.2.2 Querovale Nabenbohrung und Entlastungstaschen ... 227
7.7.4.2.3 Einseitig hochovale Nabenbohrung ... 228
7.7.4.2.4 Formbohrung ... 229

7.8 Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren ... 231
7.8.1 Grundlagen der Kavitation ... 232
7.8.2 Das physikalische Phänomen der Kavitation ... 233
7.8.3 Kavitationsarten ... 234
7.8.3.1 Gaskavitation ... 234
7.8.3.2 Pseudokavitation ... 235
7.8.3.3 Dampfkavitation ... 235
7.8.3.4 Kavitation in realen Strömungen ... 235
7.8.4 Kavitationsblasendynamik und Kavitationsblasenkollaps ... 235
7.8.4.1 Sphärische Kavitationsblasenimplosion ... 236
7.8.4.2 Asphärische Kavitationsblasenimplosion ... 236
7.8.5 Kavitationsschäden an nassen Zylinderlaufbuchsen ... 238
7.8.6 Kavitationsmesstechnik ... 240
7.8.7 Kavitationsintensitätsfaktor und Signalanalyse ... 242
7.8.8 Prüfstandsaufbau für Kavitationsmessungen ... 244
7.8.9 Prüflaufprogramme für Kavitationsmessungen ... 245
7.8.10 Abhängigkeit der Kavitationsintensität von der Anordnung des Zylinders und der Position am Zylinder ... 245
7.8.11 Einflussparameter ... 246
7.8.11.1 Einfluss der Motorbetriebsparameter auf Kavitation ... 247
7.8.11.1.1 Einfluss der Motordrehzahl ... 247
7.8.11.1.2 Einfluss der Motorlast ... 248
7.8.11.1.3 Einfluss des Kühlsystemdrucks ... 249
7.8.11.1.4 Einfluss des Kühlmittelvolumenstroms ... 249
7.8.11.1.5 Einfluss der Kühlmitteltemperatur ... 250
7.8.11.1.6 Einfluss der Kühlmittelzusammensetzung ... 250
7.8.11.1.7 Einfluss des Brennraumdrucks ... 250

7.8.11.2 Einfluss der Konstruktionsparameter auf die Kavitation 251
7.8.11.2.1 Einfluss des Kolben- und Zylinderlaufbuchseneinbauspiels 252
7.8.11.2.2 Einfluss der Kolbenbauart und der Kolbenformgebung 252
7.8.11.2.3 Einfluss sonstiger konstruktiver Anpassungen am Kolben 254
7.8.11.2.4 Einfluss konstruktiver Anpassungen an der Zylinderlaufbuchse und der Kühlkanalgestaltung .. 255
7.9 Ölverbrauch und Blow-by am Verbrennungsmotor 255
7.9.1 Ölverbrauchsmechanismen am Verbrennungsmotor 255
7.9.1.1 Ölverbrauch am System Kolben/Kolbenringe/Zylinderwand 258
7.9.1.2 Ölverbrauch durch Ventilschaftabdichtungen 259
7.9.1.3 Ölverbrauch durch die Kurbelgehäuseentlüftung (Blow-by) 259
7.9.1.4 Ölverbrauch und Blow-by am Turbolader 259
7.9.2 Ölverbrauchsmessmethoden 261
7.9.3 Ölverbrauchskennfelder und dynamisches Ölverbrauchsverhalten 264
7.9.4 Einfluss des Saugrohrunterdrucks auf den Ölverbrauch am Benzinmotor 268

Literaturnachweis 271

Glossar 274

Sachwortverzeichnis 283

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 sehr kurzer Zeit in Wärme und Druck umgesetzt. Dabei steigen die Wärme- und Druckwerte in sehr kurzer Zeit sehr stark an. Dem Kolben als beweglichem Teil des Brennraums fällt die Aufgabe zu, diese frei werdende 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.

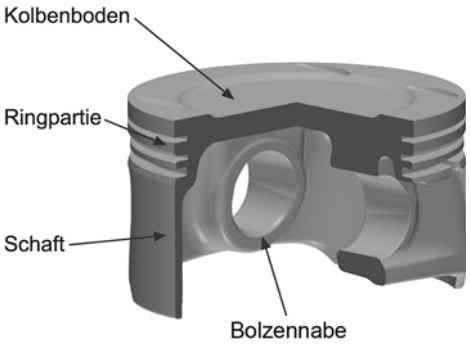


Bild 1.1: Pkw-Kolben für Ottomotoren

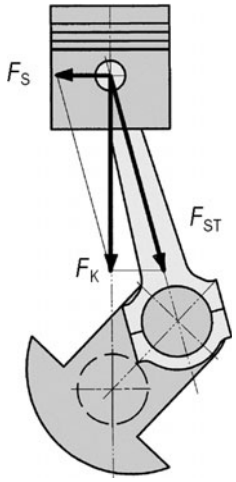


Bild 1.2: Kräfte am Kolben

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 Zylinderlaufbahn. Während eines Arbeitsspiels ändert die Seitenkraft mehrfach ihre

MAHLE GmbH (Hrsg.), *Kolben und motorische Erprobung*, DOI 10.1007/978-3-8348-9832-6_1,
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

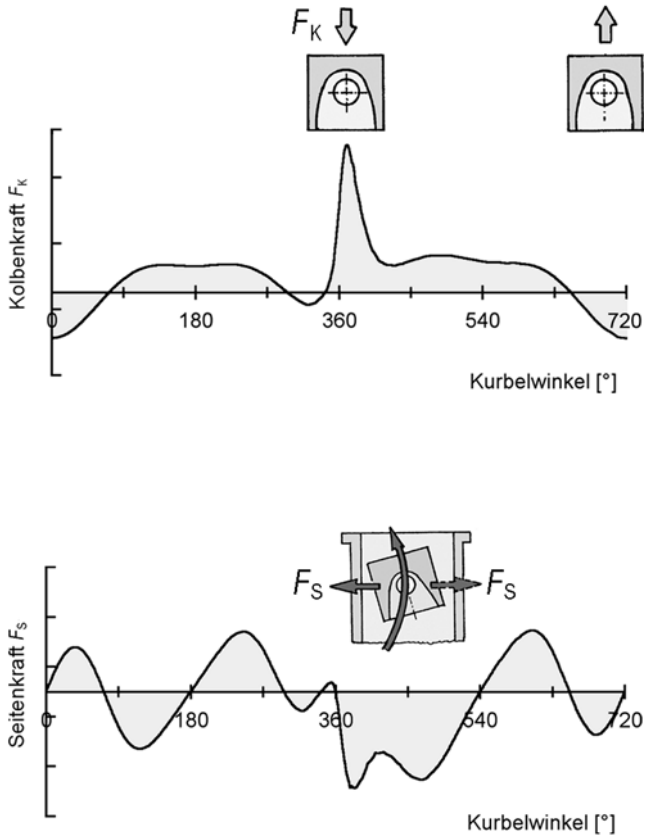


Bild 1.3:
Kraftverläufe

Richtung, wobei der Kolben wegen seines Kolbenspiels 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, Kraft übertragendes Bauteil muss der Kolben zusammen mit den Kolbenringen den Brennraum in allen Lastzuständen gegen Gasdurchtritt und Schmieröldurchfluss zuverlässig abdichten. Diese Aufgabe kann er nur erfüllen, wenn ein hydrodynamischer Schmierfilm zwischen den Kolbenringen bzw. dem Schaft und der Zylinderlaufbahn vorhanden ist. Besonders problematisch ist der Stillstand des Kolbens in den beiden Totpunkten, in denen der Schmierfilm voll funktionsfähig ist. Dabei müssen die Kolbenringe über sehr lange Laufzeiten funktionstüchtig bleiben. 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 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 (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 und
- niedrige Schadstoff-Emissionswerte

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.

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 – 12,0 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

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 zum Beispiel jeder Kolben (D = 90 mm) bei einer maximalen Gaskraft im Arbeitstakt von 75 bar 50-mal je Sekunde mit einer Last von etwa 5 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 durch erhebliche Schäden am Kolben 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.

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 diesen Temperaturschwankungen nicht völlig. Die Amplitude der Temperaturschwankungen beträgt an der Kolbenoberfläche nur einige °C und nimmt nach innen rasch ab. Der den heißen Verbrennungsgasen ausgesetzte Kolbenboden nimmt eine je nach Betriebspunkt (Drehzahl, Drehmoment) unterschiedliche Wärmemenge auf. Diese leitet bei nicht ölgekühlten Kolben hauptsächlich der Kompressionsring, 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**.

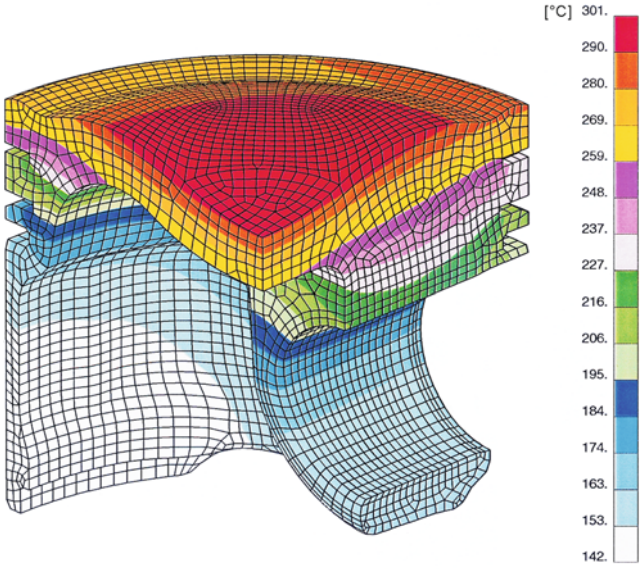


Bild 1.4:
Temperaturverteilung an einem Kolben für einen Ottomotor

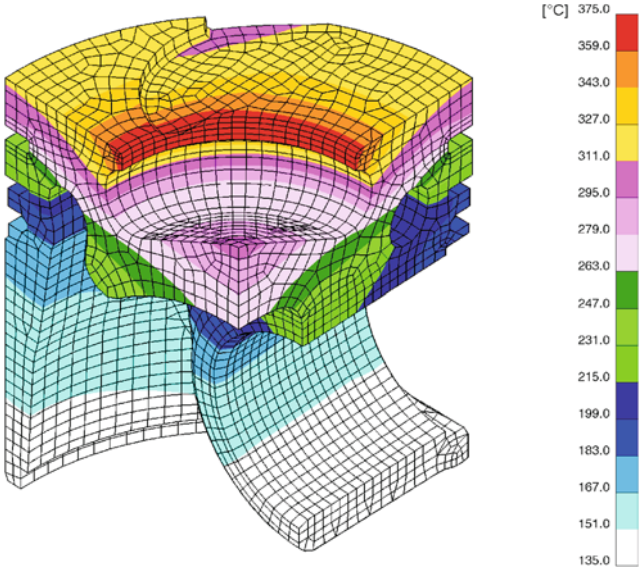


Bild 1.5:
Temperaturverteilung an einem Kolben mit Kühlkanal für einen Dieselmotor

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)
- 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. Sie bestimmen Niveau und Verteilung der Temperaturen im Kolben und die ertragbaren 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.

Von Bedeutung sind ferner die Temperaturen in der 1. Kolbenringnut hinsichtlich Ölverkokung. Bei Überschreiten gewisser Grenzwerte neigen die Kolbenringe infolge Rückstandsbildung in 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 7.2.3** in Kapitel 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.

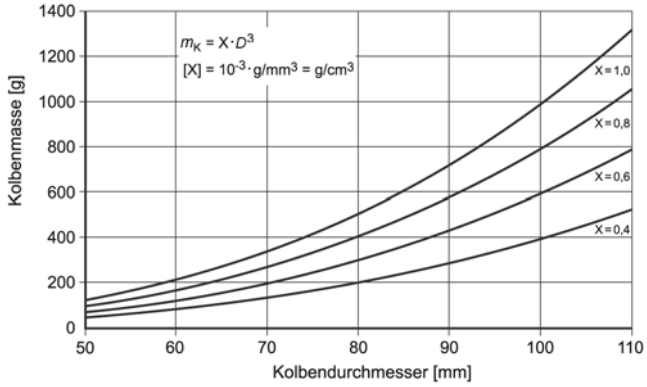


Bild 1.6:
Kolbenmassen m_K (ohne Kolbenringe und Kolbenbolzen) von Pkw-Motoren in Abhängigkeit vom Kolbendurchmesser

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

Arbeitsverfahren	Massekennzahl m_K/D^3 [g/cm^3]
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 Reibung und Verschleiß

Nicht nur die Konstruktion, die Formgebung und das Einbauspiel sorgen für den einwandfreien Betrieb des Kolbens im Zylinder. Auch die Reibungskräfte am Schaft und die Schaftschmierung spielen eine entscheidende Rolle für ein problemloses Laufverhalten des Kolbens.

Am Kolbenschaft und der gehonten Zylinderlauffläche sind bestimmte Rauigkeitswerte einzuhalten. Sie

- begünstigen das Einlaufverhalten,
- vermeiden abrasiven Verschleiß,

- sind Voraussetzung für die Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilms zwischen Kolbenschaft und Zylinderwand und
- verhindern ein Fressen des Kolbens, d.h. ein örtliches Verschweißen zwischen Kolben und Zylinder infolge Spiel- oder Schmierölmangel.

Am Kolbenschaft werden Rauigkeitswerte von R_a = 2,5 – 5 µm angestrebt.

Bild 1.7 zeigt Lage und Form des Grenzschmierspalts zwischen Kolben und Zylinder. Lediglich in den Umkehrpunkten des Kolbens (oberer und unterer Totpunkt) wird das hydrodynamische Schmierverhalten durch die Änderung der Bewegungsrichtung des Kolbens gestört.

Laufflächen-Schutzschichten wie etwa MAHLE GRAFAL® senken die Reibung und verbessern die Sicherheit gegen Fressen.

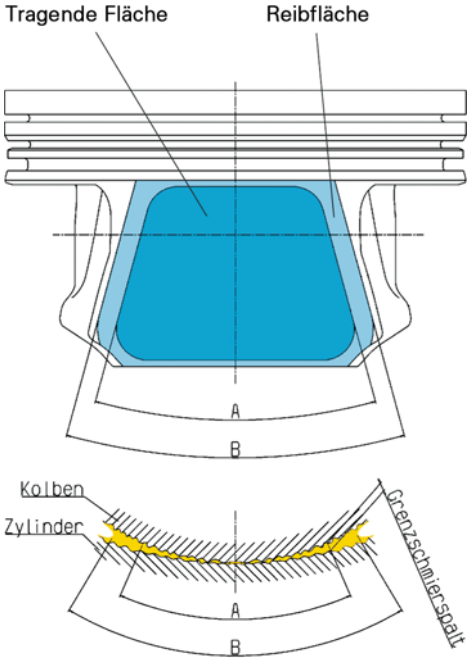


Bild 1.7:
Grenzschmierspalt zwischen Kolben und Zylinder

1.2.5 Blow-by

Eine der Hauptaufgaben des Kolbens und der Kolbenringe ist die Abdichtung des unter Druck stehenden Verbrennungsraums zum Kurbelgehäuse. Durch das Spiel zwischen Kolben und Zylinder können während des kinematischen Bewegungsablaufs Verbrennungsgase (Blow-by) ins Kurbelgehäuse gelangen. Durchblasendes Leckgas bedeutet neben dem Energieverlust auch eine Gefährdung der Kolben- und Kolbenringschmierung durch Verdrängung und Verschmutzung des Schmierfilms sowie durch Ölverkokung infolge überhöhter Temperatu-

ren 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 Preisnachteil – treten die Regelkolben immer mehr in den Hintergrund. Der Vollständigkeit halber werden 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

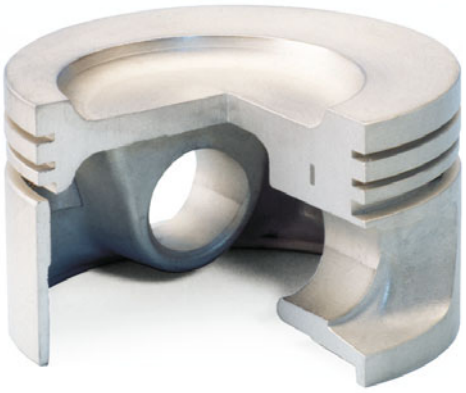


Bild 1.8: Autothermik-Kolben

Bild 1.9: Autothermatik-Kolben

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 nicht wesentlich beeinträchtigen. So vereint diese Kolbenkonstruktion die hohe Festigkeit des ungeschlitzten Kolbens mit den Vorzügen der Regelstreifenbauart. Autothermatik-Kolben werden teilweise noch in Otto- und Saugdieselmotoren verwendet.

1.3.1.2 Kasten-Kolben

Diese Kolbenbauart, **Bild 1.10**, zeichnet sich durch eine geringe Masse, eine optimierte Abstützung und die kastenähnliche, oft leicht ovale Schaftgestaltung aus. Der Kasten-Kolben ist für den Einsatz in modernen Pkw-Ottomotoren konzipiert und 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 Kasten-Kolben sind gegossen oder geschmiedet.

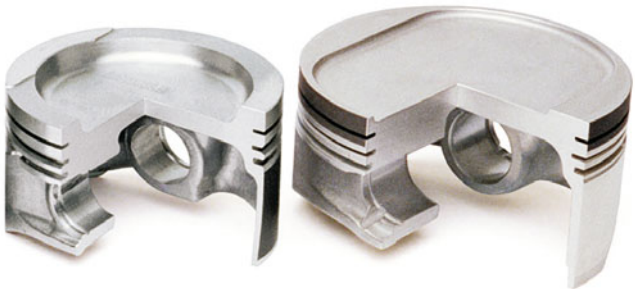


Bild 1.10:
Asymdukt-Kolben

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

Kolben für Motoren mit sehr hohen spezifischen Leistungen (>100 kW/l) haben gegebenenfalls einen Kühlkanal, **Bild 1.11**.

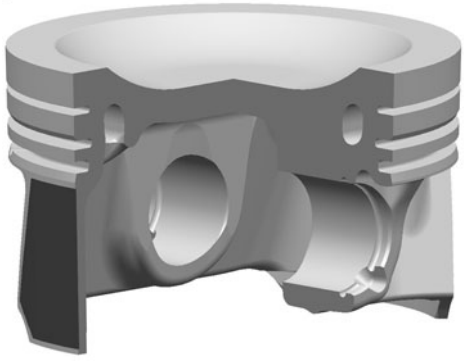


Bild 1.11:
Kolben mit Kühlkanal für einen Ottomotor

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 1.12**.

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 der Abstand der Kastenwände auf der Druckseite geringer. Denn der kürzere Hebelarm

Bild 1.12: EVOTEC®-Kolben

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.

1.3.1.4 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 1.13**. Der Festigkeitsvorteil im Temperaturbereich bis etwa 250 °C verbessert die Belastbarkeit bei Seitenkräften, erhöht die Belastbarkeit der Nabe und die Abreißfestigkeit. Schmiedekolben eignen sich daher spe-

Bild 1.13:
Geschmiedeter Aluminiumkolben

ziell 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 sind nicht darstellbar.

Bei Kolben für den Rennsport handelt es sich durchweg um Sonderkonstruktionen, **Bild 1.14**. 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 1.14:
Geschmiedeter Kolben für die Formel 1

1.3.2 Kolben für Zweitaktmotoren

Beim Kolben für Zweitaktmotoren, **Bild 1.15**, ist die thermische Belastung wegen des häufigeren Wärmeeinfalls – bei jeder Umdrehung der Kurbelwelle ein Arbeitshub – besonders hoch. Er muss bei seiner Auf- und Abwärtsbewegung im Zylinder außerdem die Einlass-, Auslass- und Überströmkanäle abdecken bzw. freigeben, d.h. er muss den Gaswechsel steuern. Dies führt zu einer hohen thermischen und mechanischen Belastung.

Zweitaktkolben sind mit einem oder zwei Kolbenringen ausgestattet und variieren in ihrer äußeren Gestalt von der offenen Fensterkolbenbauart bis zur Ausführung als Glattschaftkolben. Dies ist von der Gestaltung der Überströmkanäle (lange Kanäle oder kurze Henkelkanäle) abhängig. Die Kolben bestehen üblicherweise aus der übereutektischen AlSi-Legierung MAHLE138.

Bild 1.15:
Kolben und Zylinder für einen Zweitaktmotor

1.3.3 Kolben für Dieselmotoren

1.3.3.1 Ringträgerkolben

Beim seit 1931 eingesetzten Ringträgerkolben, **Bild 1.16**, – wird der 1., mitunter auch noch der 2. Kolbenring in einem durch metallische Bindung fest mit dem Kolbenwerkstoff verbundenen Ringträger geführt.

Der Ringträger besteht aus einem nichtmagnetischen Gusseisen mit ähnlichem Wärmeausdehnungsverhalten wie der Kolbenwerkstoff. Der Werkstoff ist gegen Reib- und Schlagverschleiß besonders widerstandsfähig. Die am meisten gefährdete 1. Kolbenringnut und der darin eingesetzte Kolbenring werden dadurch wirksam vor überhöhtem Verschleiß geschützt. Das wirkt sich besonders vorteilhaft bei hohen Betriebstemperaturen und -drücken aus, wie sie speziell im Dieselmotor auftreten.

Bild 1.16:
Ringträgerkolben

1.3.3.2 Kühlkanalkolben

Um den brennraumnahen Bereich besonders wirksam zu kühlen und so den durch Leistungssteigerungen bedingten erhöhten Temperaturen zu begegnen, gibt es verschiedene Ausführungen von Kühlkanälen bzw. Kühlräumen. Die Zufuhr des Kühlöls erfolgt allgemein über im Kurbelgehäuse angeordnete Standdüsen. Eine Übersicht über mögliche Kühlungsvarianten gibt Kapitel 5.

Bild 1.17 zeigt einen Kühlkanalkolben mit Ringträger für einen Pkw-Dieselmotor. Die ringförmigen Hohlräume entstehen durch Eingießen von Salzkernen, die anschließend mit Wasser wieder herausgelöst werden.

1.3.3.3 Kolben mit gekühltem Ringträger

Eine neue gekühlte Kolbenvariante ist der Kolben mit gekühltem Ringträger, **Bild 1.18**, für Nkw- und Pkw-Dieselmotoren. Der gekühlte Ringträger verbessert erheblich die Kühlung der 1. Kolbenringnut und des thermisch hoch belasteten Verbrennungsmuldenrands. Durch die intensive Kühlung dieser Ringnut ist es möglich, den üblichen Doppeltrapezring durch einen Rechteckring zu ersetzen.

1.3.3.4 Kolben mit Buchsen in der Nabenbohrung

Einer der höchstbelasteten Bereiche des Kolbens ist die Lagerung des Kolbenbolzens. Dort treten Temperaturen von bis zu 240 °C auf, ein Bereich, wo die Festigkeit der Aluminiumlegierungen bereits erheblich absinkt.

Für extrem belastete Dieselkolben reichen die Maßnahmen wie Formbohrung, Entlastungstaschen oder ovale Nabenbohrungen zur Steigerung der Nabenbelastbarkeit nicht mehr aus.

Bild 1.17: Salzkern-Kühlkanalkolben mit Ringträger für einen Pkw-Dieselmotor

Bild 1.18: Pkw-Kolben mit gekühltem Ringträger

Bild 1.19: Ringträgerkolben für einen Nkw-Dieselmotor mit Kolbennabenbuchsen

Bild 1.20: FERROTHERM®-Kolben

Deshalb hat MAHLE eine Armierung der Nabenbohrung mit eingeschrumpften Buchsen aus einem Werkstoff höherer Festigkeit (z.B. CuZn31Si1) entwickelt, **Bild 1.19**.

1.3.3.5 FERROTHERM®-Kolben

Beim FERROTHERM®-Kolben, **Bild 1.20**, sind die Führungs- und Abdichtfunktionen voneinander getrennt. Die beiden Teile, Kolbenkopf und Kolbenschaft, sind über den Kolbenbolzen beweglich miteinander verbunden. Der aus Schmiedestahl bestehende Kolbenkopf überträgt den Gasdruck über Kolbenbolzen und Pleuelstange auf die Kurbelwelle.

Der leichte Aluminiumschaft stützt lediglich die Seitenkräfte ab, die durch die Winkelstellungen der Pleuelstange entstehen und kann durch entsprechende Formgebung die Ölkühlung des Kolbenkopfs unterstützen. Neben dieser „Shakerkühlung“ über den Schaft sind auch geschlossene Kühlräume im Kolbenkopf möglich. Der äußere Kühlraum des Stahl-Kolbenkopfs wird dazu mit geteilten Federblechen verschlossen.

Der FERROTHERM®-Kolben bietet durch seine Bauweise neben hoher Festigkeit und Temperaturbeständigkeit gute Verschleißwerte. Sein konstant niedriger Ölverbrauch, sein geringes Schadvolumen sowie seine vergleichsweise hohe Oberflächentemperatur bieten gute Voraussetzungen für die Einhaltung niedriger Abgas-Emissionsgrenzwerte. FERROTHERM®-Kolben kommen in hoch belasteten Nkw-Motoren zum Einsatz.

1.3.3.6 MONOTHERM®-Kolben

Der MONOTHERM®-Kolben, **Bild 1.21**, ist aus der Entwicklung des FERROTHERM®-Kolbens hervorgegangen. Diese Kolbenbauart ist ein stark gewichtsoptimierter, einteiliger Kolben aus geschmiedetem Stahl. Bei kleiner Kompressionshöhe (bis unter 50 % des Zylinderdurchmes-