

## Vorwort

Die lateinische Redewendung «Quae nocent docent.», zu Deutsch: «Was schadet, lehrt.», übersetzte der Reformator MARTIN LUTHER mit: «Durch Schaden wird man klug.», womit sich der Spruch mit Beginn der Neuzeit (16. Jahrhundert) in unserem Sprachraum verbreitete. Schäden waren seit jeher Begleiter der Entwicklung und das Lernen aus ihnen konnte zu einem echten Wissens- und Technologievorsprung führen.

Das Lernen aus Schäden begleitet uns bei der Firma Wild-Motoren seit über 40 Jahren und ist zum «täglich Brot» geworden. Nur durch eine systematische und treffsichere Analyse des vorliegenden Motorschadens können Wiederholungsschäden verhindert werden und es kann eine hohe Qualität der Motorreparatur erzielt werden. Mit technischem Hintergrundwissen zu Motorschäden sowie zur Entwicklung und Fertigung von Motorkomponenten können außerdem Reparaturlösungen erarbeitet werden und Motorkomponenten verbessert werden, sodass zukünftige Schäden verhindert werden können. Technikkompetenz und ein tiefes Verständnis in der Schadensanalyse hat uns zu einem der Branchenführer im Bereich der Motoreninstandsetzung gemacht. Wir waren immer bereit, das über die Jahre erlangte Wissen zu teilen und stets Anlaufstelle für den technischen Austausch. Mit der neu gegründeten Motorenakademie Wild wollen wir diesen Austausch professionalisieren und eine Plattform bieten, in der Sachverständige, Motoreninstandsetzer, Motorenentwickler und andere technische Interessierte Know-how rund um den Verbrennungsmotor und darüber hinaus erlangen können.

Das vorliegende Buch ist – wie die Motorenakademie auch – das Destillat jahrzehntelanger Erfahrung aus der Motoreninstandsetzung und der Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren in verschiedenen Anwendungen. Es kann als Nachschlagewerk dienen, wobei hierbei vor allem die Schadenssteckbriefe einen schnellen Überblick bieten sollen. Es soll aber auch technisch notwendiges Hintergrundwissen vermitteln, wozu ein ausführlicher Grundlagenteil, der einerseits Basiswissen zum Verbrennungsmotor beschreibt, andererseits den Schaden und die dazu führenden Mechanismen beleuchtet, verfasst wurde.

Neben der Erläuterung der verschiedenen Schäden, ihrer Ausprägung (Schadensbild), der Mechanismen und Ursachen ist in den Kapiteln zu den einzelnen Motorkomponenten eine ausführliche Beschreibung der Komponente selbst zu finden. Deren Aufgabe und Funktion im Verbrennungsmotor, die Belastungen, die sie im Motorbetrieb erfahren, konstruktive Ausführungen, Informationen zur Fertigung und eingesetzten Werkstoffen sind notwendige Kenntnisse, um Schäden und Ursachen zielsicher analysieren zu können. Abgerundet wird das Buch durch einen Blick in die Vergangenheit und in den Verlauf der Entwicklung von Verbrennungsmotoren, in der Motorschäden ein steter Begleiter waren. Am Ende des Buches richtet sich der Blick in die Zukunft und es werden verschiedene Zukunftsszenarien des in vielen Ländern bereits «totgesagten» Verbrenners beleuchtet.

Danke dem Vogel-Verlag, insbesondere STEFFEN DONATH, NIELS BERNAU, UTE JAXTHEIMER und STEFFEN DOMINSKY, für eine wirklich großartige Zusammenarbeit und viele hilfreiche Tipps und Ratschläge. Außerdem besonderer Dank an WALTER ESSENREITER und RALF DEUBEN

vom AutoFachmann. RALF DEUBEN hat mit zahlreichen CAD-Darstellungen die Anschaulichkeit der Bilder auf ein sehr hohes Niveau gehoben.

Besonderer Dank auch an meine Familie, meine Frau CHRISTIANE, die Kinder LUKAS, der tatkräftig beim Fotografieren und Sortieren unterstützt hat, JANNIK, MARIE und LENI WILD.

Danke außerdem an meine Mutter RENATE, meine Schwester SUSANNE, meinen Bruder MARKUS und meinen Onkel BURKARD, die direkt, durch fachliche Korrektur, Tipps beim Schreiben oder auch indirekt zum Gelingen des Buches beigetragen haben.

Großer Dank für fachliches Lektorat, konstruktive Gespräche und Hinweise gehen außerdem an:

- alle Mitarbeiter der Wild-Motoren GmbH & Co KG, PAUL BAIER, THORSTEN GÖB, BENNY POßMAYER, EDUARD SCHAULIS, MICHEL KRÜCKEL und NICOLE TIMM,
- JOCHEN SCHUMACHER, STEFAN ARPOGAUS (ehemals Kolbenschmidt),
- WOLFRAM KOTTE (Mitarbeit in Kapitel 21, BE Turbo GmbH),
- PROF. DR. SCHLACHTER (Fachhochschule Schweinfurt),
- SIMON MALCHER, SEBASTIAN SUSSET, CLEMENS HAMPE (Audi AG),
- SIMON SCHNAIBEL, REINER HOLWEIN, JÖRG SEIDEL, MARKUS ROIDER, CHRISTOPH ETTWEIN (MS Motorservice International),
- HOLGER GERMANN, EDWARD WERNINGHAUS (Kolbenschmidt),
- SEBASTIAN HAUPT, DANNY SCHWARZ, GERALD DÖPFERT, FRANK HOHBEIN, MARKUS KLAISSLE, JOHANNES SAILER (Senertec),
- LEANDER SCHRAMM (KS Huayu Alutech GMBH),
- MARK ERLWEIN (KS-Gleitlager),
- JOACHIM GÖTZ, SARAH-JO NICHOLS, FLORIAN KIZIAK (Elring Klinger AG),
- STEFAN ZECH (Tenneco Inc.),
- KARL-HEINZ MAYER (Unterstützung Kap. 19 Ventildfeder),
- HORST KÖHLER (dieselmotoren-historik.com)
- und die Engine Historic Society

Außerdem an alle Unternehmen die bereitwillig Bildfreigaben erteilt haben.

Der Inhalt dieses Buches wurde von uns durch umfangreiche Recherchen sorgfältig erwogen und mehrmals überprüft. Trotzdem können inhaltliche Fehler bei dieser komplexen interdisziplinären Thematik nicht ganz ausgeschlossen werden. Die Autoren übernehmen deshalb keine Haftung für etwaige Personen-, Sach- oder Vermögensschäden. Wir bitten im Fall eines sachlichen Fehlers um Kontaktaufnahme mit uns über E-Mail wild-a@gmx.de oder über den Verlag.

Nun wünschen die Autoren viel Spaß beim Lesen!

ANDREAS WILD

RICHARD WILD

Unterpleichfeld 10.10.2022



3.3.1.4	Bruchformen .....	59
3.3.2	Thermische Beanspruchung .....	67
3.3.2.1	Wärmeeintrag und Temperaturbelastung von Motorkomponenten .....	68
3.3.2.2	Thermische Belastung und Mischformen mit thermischer Belastung .....	69
3.3.3	Thermomechanische Beanspruchung (TMF-Ermüdung) .....	71
3.3.4	Tribologische Beanspruchung .....	75
3.3.4.1	Definitionen und tribologisches System .....	75
3.3.4.2	Physikalische Grundlagen – Reibung, Schmierung und Verschleiß .....	77
3.3.4.3	Stribeck-Kurve und hydrodynamische Gleitlagerung .....	80
3.3.4.4	Verschleiß .....	83
3.3.4.5	Schmierung .....	90
3.3.4.6	Tribologie im Verbrennungsmotor .....	93
3.3.5	Korrosive Beanspruchung .....	96
3.3.5.1	Grundformen der Korrosion .....	97
3.3.5.2	Korrosionsarten .....	98
3.3.5.3	Korrosionsmechanismen im Verbrennungsmotor ...	100
3.3.6	Kavitationserosion .....	107
3.3.7	Verbrennungsstörungen .....	111
3.3.7.1	Verbrennungsstörungen am Ottomotor .....	111
3.3.7.2	Verbrennungsstörungen am Dieselmotor .....	118
3.3.7.3	Allgemeine Verbrennungsstörungen .....	119
<b>3.4</b>	<b>Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>121</b>
3.4.1	Durchführung Schadensanalyse .....	122
3.4.2	Fallbeispiel Schadensanalyse .....	125
3.4.2.1	Schadensanalyse Pkw-Ottomotor .....	125
<b>4</b>	<b>Motoröl und Ölverbrauch .....</b>	<b>133</b>
<b>4.1</b>	<b>Motoröl .....</b>	<b>133</b>
4.1.1	Aufgaben und Anforderungen .....	133
4.1.2	Viskosität von Motoröl .....	134
4.1.3	Belastungen .....	137
4.1.4	Betriebseinflüsse und Veränderungen des Motoröls im Motorbetrieb .....	138
4.1.5	Aufbau, Herstellung und Eigenschaften von Motorölen (und Ausführungen) .....	144
4.1.6	Motoröle für moderne Verbrennungsmotoren .....	149
<b>4.2</b>	<b>Ölverbrauch von Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>154</b>
4.2.1	Ölverbrauch durch die Kolbengruppe .....	157
4.2.2	Ölverbrauch durch Ventilschaft / Ventilführung / Ventilschaftabdichtung .....	159
4.2.3	Ölverbrauch durch den Abgasturbolader .....	159

4.2.4	Ölverbrauch durch die Motorentlüftung .....	160
-------	---	-----

## **5 Kolben..... 161**

<b>5.1</b>	<b>Aufgaben und Aufbau .....</b>	<b>161</b>
<b>5.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>162</b>
<b>5.3</b>	<b>Konstruktion und Aufbau .....</b>	<b>166</b>
<b>5.4</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>174</b>
<b>5.5</b>	<b>Kolbenkühlung .....</b>	<b>177</b>
<b>5.6</b>	<b>Schäden an Kolben .....</b>	<b>179</b>
5.6.1	Mechanische Schäden & Brüche am Kolben .....	181
5.6.1.1	Brüche ausgehend vom Kolbenboden oder der Kolbenmulde .....	182
5.6.1.1.1	Risse und Brüche am Kolbenboden – Muldenrand- und Muldengrundrisse an Alu-Kolben für direkteinspritzende Dieselmotoren .....	182
5.6.1.1.2	Risse und Brüche am Kolbenboden – Muldenrandrisse Stahlkolben + Verzunderung.....	191
5.6.1.1.3	Risse und Brüche am Kolbenboden – Vor- und Wirbelkammermotoren (Diesel) .....	195
5.6.1.2	Brüche im Ringfeld (Ringstegbrüche) und am Feuersteg .....	197
5.6.1.3	Brüche ausgehend vom Kühlkanal des Kolbens .....	205
5.6.1.4	Brüche ausgehend vom Ringträger – Debonding .....	210
5.6.1.5	Brüche am Kolbenschaft .....	214
5.6.1.6	Brüche der Kolbennabe.....	218
5.6.2	Thermische Schäden an Kolben – Aufschmelzungen & durchgebrannte Kolbenbereiche, Klopfschäden.....	223
5.6.2.1	Erosionsartiger Materialabtrag am Kolben – Klopfschäden Ottomotor.....	223
5.6.2.2	Durchgebrannter Kolbenboden Ottomotor.....	228
5.6.2.3	Abschmelzungen Kolbenboden Ottomotor .....	230
5.6.2.4	Abschmelzungen oder Loch im Kolbenboden Dieselmotor .....	234
5.6.3	Tribologische Schäden an Kolben – Verschleiß und Fresser.....	239
5.6.3.1	Grundlegende Schadensmechanismen und Erscheinungsmerkmale.....	241
5.6.3.1.1	Verschleißbedingter Materialabtrag .....	241
5.6.3.1.2	Überhitzungsfresser .....	242
5.6.3.1.3	Trockenlauffresser.....	243
5.6.3.1.4	Spielfresser .....	245

	5.6.3.1.5	Systematik zur Analyse von Fresserscheinungen an Kolben .....	246
	5.6.3.2	Verschleiß und Fresser am Feuersteg .....	247
	5.6.3.3	Verschleiß und Fresser am Kolbenschaft .....	252
	5.6.3.3.1	Kolbenschaftverschleiß .....	252
	5.6.3.3.2	Flucht- und Formabweichungen – Tragbilder am Kolbenschaft .....	256
	5.6.3.3.3	Kolbenschaftfresser .....	258
	5.6.3.3.3.1	Kolbenschaftfresser, beidseitig .....	259
	5.6.3.3.3.2	Kolbenschaftfresser, einseitig .....	261
	5.6.3.3.3.3	Kolbenschaftfresser in 45°-Lage (Diagonal) .....	263
	5.6.3.3.3.4	Kolbenschaftfresser am unteren Schaftende .....	266
5.6.4		Sonstige Kolbenschäden .....	267
	5.6.4.1	Beschädigung des Kolbenbodens durch Fremdkörper / durch Ventilkontakt .....	267

## **6 Kolbenbolzen und Kolbenbolzensicherungen..... 271**

<b>6.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>271</b>
<b>6.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>272</b>
<b>6.3</b>	<b>Aufbau und Konstruktion .....</b>	<b>273</b>
<b>6.4</b>	<b>Werkstoffe, Beschichtungen und Fertigung .....</b>	<b>276</b>
<b>6.5</b>	<b>Kolbenbolzensicherungen .....</b>	<b>276</b>
<b>6.6</b>	<b>Schäden am Kolbenbolzen, seiner Lagerung und axialen Sicherung .....</b>	<b>277</b>
6.6.1	Mechanische Schäden .....	277
	6.6.1.1 Brüche des Kolbenbolzens .....	277
	6.6.1.2 Schäden bei der Bolzenmontage und axiales Auswandern des Kolbenbolzens .....	281
6.6.2	Tribologische Schäden am Kolbenbolzen und seiner Lagerung .....	285
	6.6.2.1 Verschleiß an Kolbenbolzen, Kolbennaben und im kleinen Pleuelauge .....	285

## **7 Kolbenringe .....** 295

<b>7.1</b>	<b>Aufgaben und Funktionsprinzip .....</b>	<b>295</b>
<b>7.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>298</b>
<b>7.3</b>	<b>Aufbau und Konstruktion .....</b>	<b>299</b>
<b>7.4</b>	<b>Ausführungen .....</b>	<b>301</b>
<b>7.5</b>	<b>Werkstoffe, Beschichtungen, Fertigung .....</b>	<b>304</b>
<b>7.6</b>	<b>Schäden an Kolbenringen .....</b>	<b>306</b>

7.6.1	Mechanische Schäden & Brüche an Kolbenringen.....	307
7.6.1.1	Brüche an Verdichtungsringen.....	307
7.6.1.2	Verformungen von Kolbenringen, Maulweitenverlust.....	310
7.6.1.3	Brüche an 3-tlg. Ölabstreifringen, Einfedern in Drainagebohrungen .....	313
7.6.2	Tribologische Schäden – Verschleiß an Kolbenringen und Ringnuten, Sekundärverschleiß an Ölabstreifringen .....	316
7.6.2.1	Verschleiß der Lauffläche.....	316
7.6.2.2	Brandspurbildung.....	322
7.6.2.3	Ringnutverschleiß am Kolben und Flankenverschleiß an Kolbenringen.....	325
7.6.2.4	Ringnut stark ausgeschlagen / Auswaschungen der Ringnut durch gebrochene Kolbenringe .....	332
7.6.2.5	Sekundärverschleiß an Ölabstreifringen .....	335
7.6.3	Sonstige Auffälligkeiten & Schäden an Kolbenringen.....	339
7.6.3.1	Probleme mit Beschichtungen auf den Laufflächen .....	339
7.6.3.2	Funktionsprobleme durch Bildung von Ölkohle.....	341
7.6.3.2.1	Klemmen / Stecken des Kolbenrings in der Ringnut .....	342
7.6.3.2.2	Zugesetzte Drainageöffnungen an Ölabstreifringen.....	345

## **8 Pleuel ..... 347**

### **8.1 Aufbau und Aufgaben ..... 348**

### **8.2 Belastungen ..... 348**

### **8.3 Ausführungen, Aufbau und Konstruktion..... 350**

### **8.4 Werkstoffe, Fertigung..... 353**

### **8.5 Schäden an Pleuel..... 355**

8.5.1	Mechanische Schäden an Pleuelstangen.....	356
8.5.1.1	Verformung des Pleuels – Flüssigkeitsschlag .....	356
8.5.1.2	Brüche am Pleuel .....	358
8.5.1.2.1	Bruch der Pleuelbuchse und Brüche im kleinen Pleuelauge.....	359
8.5.1.2.2	Brüche des Pleuelschafts.....	362
8.5.1.2.3	Bruch des Pleuels im großen Pleuelauge.....	366
8.5.1.3	Schäden an der Pleuelverschraubung .....	369
8.5.2	Tribologische Schäden am Pleuel .....	372
8.5.2.1	Fretting / Reibschwingverschleiß .....	372

## **9 Lagerung ..... 375**

### **9.1 Aufgaben und Aufbau ..... 375**

<b>9.2</b>	<b>Bezeichnungen &amp; Ausführungsformen</b> .....	<b>377</b>
<b>9.3</b>	<b>Funktion</b> .....	<b>378</b>
<b>9.4</b>	<b>Belastungen und Anforderungen an Lager</b> .....	<b>378</b>
<b>9.5</b>	<b>Auslegung und Konstruktion</b> .....	<b>381</b>
<b>9.6</b>	<b>Lageraufbau, Werkstoffe und Fertigung</b> .....	<b>386</b>
<b>9.7</b>	<b>Schäden an Gleitlagern</b> .....	<b>390</b>
9.7.1	Mechanische Schäden an Lagern – Ermüdung.....	393
9.7.1.1	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer» .....	393
9.7.1.2	Ermüdung des Lagermetalls .....	395
9.7.2	Tribologische Schäden an Lagern – Verschleiß, Tragbilder und Fresser .....	400
9.7.2.1	Einlaufverschleiß / Anpassungverschleiß .....	402
9.7.2.2	Lagerverschleiß .....	404
9.7.2.3	Abrasivverschleiß durch Fremdkörper .....	406
9.7.2.4	Verschleiß durch unterlegte Partikel am Lagerrücken .....	408
9.7.2.5	Tragbilder & Verschleiß durch Form- und Lageabweichungen .....	410
9.7.2.5.1	Kantenträger und verschleißfreie Bereiche an den Lagerkanten.....	411
9.7.2.5.2	Verschleiß im Lagerzentrum.....	414
9.7.2.5.3	Verschleiß im Stoßbereich.....	415
9.7.2.6	Schmierspuren / Anreiber .....	416
9.7.2.7	Fresser.....	419
9.7.3	Thermische Schäden an Lagern – Überhitzung .....	423
9.7.4	Korrosion, Kavitation und sonstige Schäden an Lagern.....	425
9.7.4.1	Kavitation .....	425
9.7.4.2	Korrosion .....	429
9.7.4.2.1	Korrosion der Lagerlauffläche .....	430
9.7.4.2.2	Korrosionsangriff am Lagerrücken / Fretting.....	431
<b>10</b>	<b>Kurbelwelle</b> .....	<b>435</b>
<b>10.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben</b> .....	<b>435</b>
<b>10.2</b>	<b>Belastungen</b> .....	<b>436</b>
<b>10.3</b>	<b>Aufbau, Konstruktion und Ausführungen</b> .....	<b>439</b>
<b>10.4</b>	<b>Werkstoffe, Fertigung</b> .....	<b>444</b>
<b>10.5</b>	<b>Schäden an Kurbelwellen</b> .....	<b>447</b>
10.5.1	Biegedauerbruch.....	450
10.5.2	Torsionsdauerbruch .....	453
10.5.3	Heißrisse auf dem Lagerzapfen.....	458
<b>11</b>	<b>Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderlaufbahn</b> .....	<b>461</b>
<b>11.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben</b> .....	<b>461</b>

<b>11.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>462</b>
<b>11.3</b>	<b>Aufbau, Gestaltung und Konstruktion .....</b>	<b>466</b>
<b>11.4</b>	<b>Werkstoffe, Laufbahntechnologien und Fertigung .....</b>	<b>472</b>
<b>11.5</b>	<b>Bearbeitung der Zylinderlaufbahn durch Honen, Laufbahnoberflächen .....</b>	<b>482</b>
<b>11.6</b>	<b>Schäden am Zylinderkurbelgehäuse und an Zylindern .....</b>	<b>487</b>
11.6.1	Schäden an der Struktur von Zylinderkurbelgehäusen.....	489
11.6.1.1	Risse oder Brüche des Zylinders und im Zylinderstegbereich .....	489
11.6.1.2	Risse / Brüche in festigkeitskritischen Bereichen, Hauptlagerstuhl / Verschraubung Zylinderkopf .....	494
11.6.2	Tribologische Schäden an der Zylinderlauffläche .....	497
11.6.2.1	Spiegelbildung und Bore Polishing.....	497
11.6.2.2	Zwickelverschleiß – Verschleiß durch Kolbenringe .....	501
11.6.2.3	Fresser.....	506
11.6.3	Fertigungs- und Bearbeitungsfehler an der Zylinderlaufbahn...	509
11.6.3.1	Abplatzen von Beschichtungen, Haftungsprobleme .....	509
11.6.3.2	Fehler beim Honen.....	512
11.6.3.2.1	Blechmantelbildung.....	513
11.6.3.2.2	hoher Zerstörungsgrad Silizium-Kristalle .....	515
11.6.4	Schäden an Zylinderlaufbuchsen .....	516
11.6.4.1	Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen.....	517
11.6.4.2	Brüche des Buchsenbundes .....	520

## **12 Zylinderkopfdichtung .....** **523**

<b>12.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>523</b>
<b>12.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>524</b>
<b>12.3</b>	<b>Anforderungen .....</b>	<b>525</b>
<b>12.4</b>	<b>Konstruktion, Aufbau und Ausführungen.....</b>	<b>526</b>
<b>12.5</b>	<b>Schäden an der Zylinderkopfdichtung.....</b>	<b>530</b>
12.5.1	Verlust der Verpressung der Brennraumdichtung – Undichtigkeit Brennraum.....	534
12.5.2	Brüche der Brennraumdichtung – Übertritt Zylinderdruck .....	536
12.5.2.1	Stegbruch .....	538
12.5.2.2	Sickenbruch – Mehrlagen Stahl ZKD.....	540
12.5.3	Überhitzungen der Zylinderkopfdichtung.....	540
12.5.3.1	Überhitzung Weichstoff-Metall ZKD – Aufquellungen.....	541
12.5.3.2	Überhitzung Mehrlagen-Stahl ZKD – Ablösungen Elastomer-Beschichtung.....	542
12.5.4	Oberflächenfehler .....	543

12.5.4.1	Nicht plane oder beschädigte Oberflächen am ZKD oder Zylinderkopf.....	543
12.5.4.2	Undichtigkeit Brennraum – zu hohe Oberflächenrauigkeit.....	545
12.5.5	Sonstige Schäden an Zylinderkopfdichtungen.....	546
12.5.5.1	Beschädigungen an Elastomer-Dichtelementen.....	547
<b>12.6</b>	<b>Schadensfolgen durch defekte Zylinderkopfdichtungen .....</b>	<b>547</b>

## **13 Steuertrieb ..... 549**

<b>13.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>549</b>
<b>13.2</b>	<b>Anforderungen und Ausführungen .....</b>	<b>551</b>
<b>13.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>552</b>
<b>13.4</b>	<b>Ausführungen, Aufbau und Konstruktion.....</b>	<b>555</b>
13.4.1	Steuerkettentrieb .....	556
13.4.2	Zahnriementrieb / Synchronriementrieb .....	563
13.4.3	Stirnradtrieb / Rädertrieb .....	568
13.4.4	Vergleich der verschiedenen Steuertriebsausführungen.....	574
<b>13.5</b>	<b>Schäden am Steuertrieb.....</b>	<b>577</b>
13.5.1	Schäden an Steuerketten .....	579
13.5.1.1	Verschleiß von Steuerketten und Kettenrädern .....	580
13.5.1.2	Riss der Steuerkette.....	587
13.5.2	Schäden an Synchronriemen / Zahnriemen .....	591
13.5.2.1	Zahnriemenriss.....	600
13.5.3	Schäden an Zahnrädern bzw. in Rädertrieben .....	603
13.5.3.1	Zahnfußbrüche .....	606

## **14 Zylinderkopf..... 611**

<b>14.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben .....</b>	<b>611</b>
<b>14.2</b>	<b>Bauarten / Einteilung .....</b>	<b>613</b>
<b>14.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>614</b>
<b>14.4</b>	<b>Konstruktion und Aufbau.....</b>	<b>617</b>
<b>14.5</b>	<b>Kühlung des Zylinderkopfes – Wassermantel .....</b>	<b>618</b>
<b>14.6</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>621</b>
<b>14.7</b>	<b>Schäden an Zylinderköpfen .....</b>	<b>628</b>
14.7.1	Risse des Zylinderkopfs.....	632
14.7.1.1	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums.....	632
14.7.1.2	Risse in brennraumfernen Bereichen.....	635

## **15 Ventiltrieb ..... 641**

<b>15.1</b>	<b>Aufgaben und Anforderungen.....</b>	<b>641</b>
<b>15.2</b>	<b>Aufbau, Bauarten und Einteilung .....</b>	<b>642</b>
<b>15.3</b>	<b>Funktion: Ventilerhebung – Hubfunktion – Kinematik.....</b>	<b>643</b>
<b>15.4</b>	<b>Belastungen: Ventiltriebsdynamik und wirkende Kräfte .....</b>	<b>648</b>

<b>15.5</b>	<b>Konstruktion und Ausführungen .....</b>	<b>653</b>
<b>15.6</b>	<b>Schäden am Ventiltrieb .....</b>	<b>663</b>

## **16 Nockenwelle .....** 669

<b>16.1</b>	<b>Aufgaben, Aufbau und Funktion .....</b>	<b>669</b>
<b>16.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>672</b>
<b>16.3</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>673</b>
<b>16.4</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>676</b>
<b>16.5</b>	<b>Schäden an Nockenwellen .....</b>	<b>678</b>
16.5.1	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen .....	680
16.5.2	Tribologische Schäden .....	682
16.5.2.1	Verschleiß der Nocken und der Nockenfolger .....	682
16.5.2.2	Verschleiß und Fressen der Nockenwellenlagerung .....	683

## **17 Nockenfolger .....** 689

<b>17.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>689</b>
<b>17.2</b>	<b>Ausführung, Aufbau und Funktion .....</b>	<b>690</b>
<b>17.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>693</b>
<b>17.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>694</b>
<b>17.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>695</b>
<b>17.6</b>	<b>Schäden an Nockenfolgern .....</b>	<b>697</b>
17.6.1	Tribologische Schäden an Nockenfolgern .....	698
17.6.1.1	Verschleiß Ventilbetätigung zwischen Nocken und Nockenfolger .....	699
17.6.1.2	Verschleiß Ventilbetätigung zwischen Nockenfolger und oberem Ventilende .....	706

## **18 Ventile .....** 711

<b>18.1</b>	<b>Aufgaben und Aufbau .....</b>	<b>712</b>
<b>18.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>712</b>
<b>18.3</b>	<b>Konstruktion und Ausführungsformen .....</b>	<b>715</b>
<b>18.4</b>	<b>Ventilkühlung .....</b>	<b>719</b>
<b>18.5</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>721</b>
<b>18.6</b>	<b>Schäden an Ventilen .....</b>	<b>727</b>
18.6.1	Thermische Schäden an Ventilen .....	728
18.6.1.1	Durchgebrannte Ventile .....	728
18.6.1.2	Radiale Risse im Sitzbereich .....	732
18.6.1.3	Durchgezogener Ventilsitzbereich .....	735
18.6.2	Mechanische Schäden an Ventilen – Ventilbrüche, Verbiegen des Ventils .....	737
18.6.2.1	Ventilschaft plastisch verformt / verbogen / Gewaltbruch am Ventilschaft .....	738

18.6.2.2	Biegedauerbrüche am Ventilschaft .....	741
18.6.2.3	Schäden im Bereich der Ventilbefestigung / am oberen Schaftende .....	745
18.6.2.4	Durchgebogener Ventilteller / Tulpenbildung / Bruch des Ventiltellers .....	750
18.6.3	Korrosive Schäden an Ventilen – Heißgaskorrosion .....	753
18.6.4	Tribologische Schäden an Ventilen .....	757

## **19 Ventalfeder, Ventilkegelstücke, Federteller..... 759**

<b>19.1</b>	<b>Aufgaben, Aufbau .....</b>	<b>759</b>
<b>19.2</b>	<b>Funktion .....</b>	<b>760</b>
<b>19.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>761</b>
<b>19.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>763</b>
<b>19.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>766</b>
<b>19.6</b>	<b>Schäden an Ventalfedern und Federtellern.....</b>	<b>768</b>
19.6.1	Bruch der Ventalfeder .....	770
19.6.2	Setzen / Erlahmen der Ventalfeder.....	775

## **20 Ventilsitz, Ventilführung und Ventilschaftabdichtung..... 779**

<b>20.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>779</b>
<b>20.2</b>	<b>Aufbau und Funktion .....</b>	<b>780</b>
<b>20.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>782</b>
<b>20.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>784</b>
<b>20.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>786</b>
<b>20.6</b>	<b>Schäden am Ventilsitz, an der Ventilführung und an Ventilschaftabdichtungen .....</b>	<b>790</b>
20.6.1	Tribologische Schäden, Verschleiß und Fresser .....	792
20.6.1.1	Ventilführungs- und Ventilschaftverschleiß, Ventilführungsfresser.....	792
20.6.1.2	Ventilsitzverschleiß .....	800
20.6.2	Mechanische Schäden, Verschleiß und Fresser .....	808
20.6.2.1	Brüche der Ventilführung .....	808
20.6.3	Korrosive Schäden am Ventilsitz .....	810
20.6.4	Sonstige Schäden.....	813
20.6.4.1	Verlust der Überdeckung / Lösen von Ventilsitz oder Ventilführung .....	813
20.6.4.2	Verschleiß und Aushärten von Ventilschaftabdichtungen.....	815

## **21 Aufladung / Abgasturbolader..... 819**

<b>21.1</b>	<b>Aufbau und Grundfunktion .....</b>	<b>820</b>
<b>21.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>824</b>

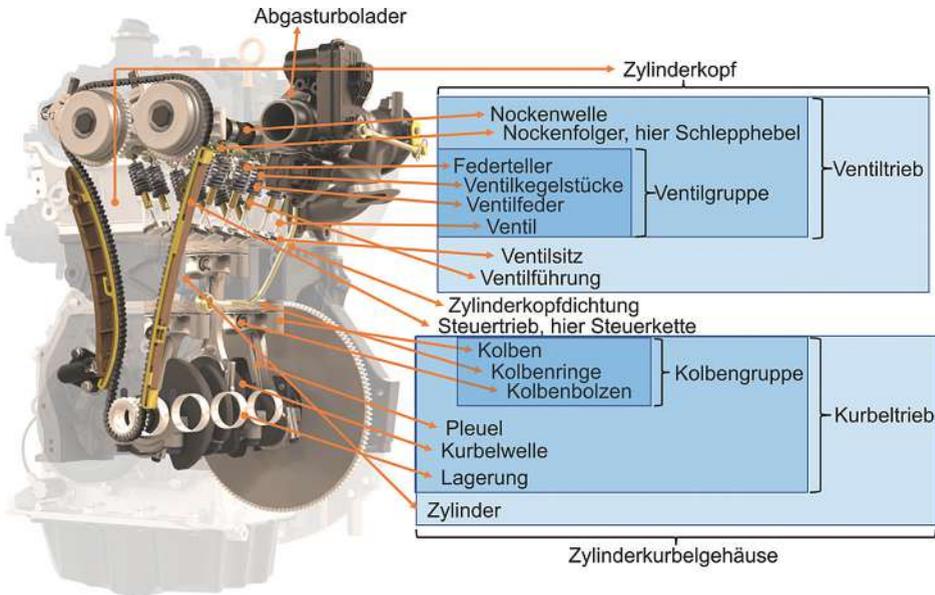
<b>21.3</b>	<b>Ausführungen &amp; Funktionen .....</b>	<b>825</b>
<b>21.4</b>	<b>Betriebsverhalten und Betriebsgrenzen des Turboladers.....</b>	<b>830</b>
<b>21.5</b>	<b>Werkstoffe &amp; Fertigung .....</b>	<b>832</b>
<b>21.6</b>	<b>Schäden an Turboladern .....</b>	<b>833</b>
21.6.1	Beschädigung von Verdichter- oder Turbinenrädern .....	839
21.6.2	Schäden / Verschleiß der Lagerung .....	843
21.6.2.1	Schäden der Radiallagerung .....	843
21.6.2.2	Verschleiß Axiallagerung .....	847
21.6.3	Bruch der Läuferwelle .....	850
21.6.4	Risse im Turbinengehäuse.....	853
21.6.5	Schäden am Verstellmechanismus von VTG-Ladern .....	855

<b>22</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>859</b>
-----------	-----------------------	------------

<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>869</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>879</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>885</b>



## Quickfinder Schadensteckbriefe



	Schaden	Steckbrief	Seite
<b>Kolben</b>	Bruch am Kolbenboden – Muldengrundriss	5.1	182
	Bruch am Kolbenboden – Muldenrandriss	5.2	183
	Verzunderung / Muldenrandrisse am Stahlkolben	5.3	191
	Risse am Kolbenboden – Vor- und Wirbelkammermotoren	5.4	195
	Ringstegbruch	5.5	198
	Feuerstegbruch	5.6	198
	Brüche ausgehend vom Kühlkanal	5.7	205
	Brüche ausgehend vom Ringträger – Debonding Ringträger	5.8	210
	Schaftbruch	5.9	214
	Nabenbruch – Gaskraft	5.10	219
	Nabenbruch – Massenkraft	5.11	219
	Erosionen am Kolben – Klopfschaden – Ottomotor	5.12	224

	Loch im Kolbenboden, Boden durchgebrannt – Ottomotor	5.13	228
	Abschmelzungen Kolbenboden – Ottomotor	5.14	231
	Abschmelzungen Kolbenboden / Loch im Kolben – Dieselmotor	5.15	234
	Verschleiß am Feuersteg	5.16	248
	Fresser Feuersteg	5.17	248
	Verschleiß am Kolbenschaft	5.18	253
	asymmetrisches Tragbild am Kolbenschaft	5.19	257
	Kolbenschaftfresser beidseitig	5.20	259
	Fresser Kolbenschaft, einseitig	5.21	261
	Fresser Kolbenschaft in 45°-Lage	5.22	263
	Fresser Kolbenschaft am unteren Schaftende	5.23	266
	Beschädigung Kolbenboden – Fremdkörper / Ventilkontakt	5.24	267
<b>Kolbenbolzen</b>	Bruch des Kolbenbolzens	6.1	278
	Schäden bei der Bolzenmontage, axiales Auswandern des Kolbenbolzens	6.2	281
	Verschleiß Kolbenbolzen, Kolbennaben, im kleinen Pleuelauge	6.3	285
	Brüche an Verdichtungsringen	7.1	307
<b>Kolbenring</b>	Maulweitenverlust und Verformungen an Verdichtungsringen	7.2	311
	Brüche an Ölabbstreifringen, Einhaken in Drainagebohrungen	7.3	313
	Verschleiß an der Lauffläche von Kolbenringen	7.4	316
	Brandspurbildung an der Lauffläche von Kolbenringen	7.5	322
	Sekundärverschleiß an 2-tlg. Ölabbstreifringen	7.6	326
	Sekundärverschleiß an 3-tlg. Ölabbstreifringen	7.7	333
	Ringnutverschleiß an Kolben / Flankenverschleiß an Ringen	7.8	335
	Folge Ringbruch: Ringnut ausgeschlagen / ausgewaschen	7.9	336
	Abplatzen / Verlust der Beschichtung des Kolbenrings	7.10	339
	Starker Ölkohlaufbau in der Ringnut – Klemmen Kolbenring in der Nut, fehlender Freigang	7.11	342
	Zusetzen von Drainageöffnungen in Ölabbstreifringen	7.12	345

<b>Pleuel</b>	Flüssigkeitsschlag – verbogenes Pleuel	8.1	356
	Brüche der Pleuelbuchse / im kleinen Pleuelauge	8.2	359
	Brüche des Pleuels im Schaftbereich	8.3	362
	Brüche des Pleuels im großen Pleuelauge	8.4	367
	Schäden / Lösen der Pleuelverschraubung	8.5	369
	Fretting im großen Pleuelauge	8.6	372
<b>Lager</b>	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer»	9.1	394
	Ermüdung / Dauerbruch des Lagermetalls	9.2	396
	Einlaufverschleiß / Anpassungsverschleiß	9.3	402
	Lagerverschleiß	9.4	404
	Lagerverschleiß durch Partikel / Drittkörper-Abra- sivverschleiß	9.5	406
	Lokaler Verschleiß durch unterlegte Partikel am Lagerrücken	9.6	409
	Kantentrag: einseitig, einseitig-wechselnd, beid- seitig	9.7	412
	Verschleißfreie Lagerkanten	9.8	412
	Konzentrierter Verschleiß im Lagerzentrum	9.9	414
	Verschleiß im Stoßbereich	9.10	415
	Schmierspur / Anreiber	9.11	416
	Fressen des Lagers	9.12	419
	Überhitzung des Lagers	9.13	423
	Kavitation	9.14	426
	Korrosion der Lagerlauffläche	9.15	430
	Korrosion am Lagerrücken / Fretting	9.16	432
<b>Kurbel- welle</b>	Biegedauerbruch Kurbelwelle	10.1	451
	Torsionsbruch Kurbelwelle	10.2	454
	Heißrisse Kurbelwelle	10.3	458
<b>Zylinder- kurbelge- häuse &amp; Zylinder- laufbahn</b>	Deformation / Risse im Zylinderstegbereich	11.1	489
	Risse im ZKG – Muttergewinde vom Hauptlager / der ZK-Schrauben	11.2	494
	Verschleiß der Honstruktur & Bore-Polishing	11.3	498
	Zwickelverschleiß & Verschleiß durch Kolbenrin- ge	11.4	501
	Fresser Zylinderlaufbahn	11.5	506
	Ablösung der Zylinderlaufbahnbeschichtung	11.6	510
	Fehler beim Honen: Blechmantelbildung	11.7	513
	Fehler beim Honen: hoher Zerstörungsgrad der Si-Kristalle	11.8	515
	Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen	11.9	517
	Brüche des Buchsenbundes	11.10	520

<b>Zylinderkopfdichtung</b>	Undichtigkeit Brennraum – Verlust der Verpressung	12.1	534
	Bruch der Brennraumdichtung	12.2	537
	Stegbruch der Zylinderkopfdichtung	12.3	538
	Sickenbruch der Brennraumdichtung	12.4	540
	Überhitzung von Weichstoff-Metall ZKD – Aufquellungen	12.5	541
	Überhitzung MLS-ZKD – Ablösung Elastomer-Beschichtung	12.6	542
	Beschädigte, nicht-plane oder verzogene ZKD-Auflage	12.7	543
	Undichtigkeit Brennraum – zu hohe Oberflächenrauigkeit	12.8	544
	Undichtigkeit – Beschädigung von Elastomer-Dichtelementen	12.9	547
<b>Steuertrieb</b>	Verschleiß der Steuerkette und der Kettenräder	13.1	581
	Riss der Steuerkette	13.2	587
	Riss des Zahn- / Synchronriemens	13.3	600
	Zahnfußbrüche an Zahnädern	13.4	606
<b>Zylinderkopf</b>	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums	14.1	633
	Risse des Zylinderkopfs in brennraumfernen Bereichen	14.2	637
<b>Nockenwelle</b>	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen	16.1	681
	Verschleiß der Nockenwellenlagerung	16.2	683
	Fressen der Nockenwellenlagerung	16.3	683
<b>Nockenfolger</b>	Verschleiß – Nockenwelle / Nockenfolger	17.1	701
	Verschleiß Nockenfolger / oberes Ventilende	17.2	707
<b>Ventil</b>	Durchgebranntes Ventil	18.1	729
	Radiale Risse am Ventilteller	18.2	732
	Durchgezogener Ventilsitzbereich	18.3	736
	Ventil plastisch verformt / verbogen / Gewaltbruch am Schaft	18.4	738
	Biegedauerbruch am Ventilschaft	18.5	742
	Brüche des Ventilschafts im Bereich der Ventilbefestigung	18.6	746
	Tulpenbildung, Verbiegen und Bruch des Ventiltellers	18.7	750
	Heißgaskorrosion und Bruch des Ventilschafts	18.8	754

<b>Ventilfeder, Ventilkegelstücke, Federteller</b>	Bruch der Ventildfeder	19.1	770
	Setzen / Erlahmen der Ventildfeder	19.2	775
<b>Ventilsitz, Ventilführung, Ventilschaftabdichtung</b>	Ventilführungs-/ Ventilschaftverschleiß	20.1	793
	Ventilführungsfresser	20.2	793
	Ventilsitzverschleiß	20.3	800
	Brüche von Ventilführungen	20.4	808
	Korrosionsangriff am Ventilsitzring	20.5	810
	Lösen von Ventilsitzen oder Ventilführungen	20.6	813
	Verschleiß und Verhärten der Ventilschaftabdichtung	20.7	816
<b>Abgasturbolader</b>	Beschädigung von Verdichter- oder Turbinenrädern	21.1	839
	Schäden / Verschleiß der Radiallagerung	21.2	844
	Verschleiß Axiallager	21.3	848
	Bruch der Läuferwelle	21.4	850
	Risse im Turbinengehäuse	21.5	853
	Schwergängiger / blockierter VTG-Verstellmechanismus	21.6	855

## Vorwort

Die lateinische Redewendung «Quae nocent docent.», zu Deutsch: «Was schadet, lehrt.», übersetzte der Reformator MARTIN LUTHER mit: «Durch Schaden wird man klug.», womit sich der Spruch mit Beginn der Neuzeit (16. Jahrhundert) in unserem Sprachraum verbreitete. Schäden waren seit jeher Begleiter der Entwicklung und das Lernen aus ihnen konnte zu einem echten Wissens- und Technologievorsprung führen.

Das Lernen aus Schäden begleitet uns bei der Firma Wild-Motoren seit über 40 Jahren und ist zum «täglich Brot» geworden. Nur durch eine systematische und treffsichere Analyse des vorliegenden Motorschadens können Wiederholungsschäden verhindert werden und es kann eine hohe Qualität der Motorreparatur erzielt werden. Mit technischem Hintergrundwissen zu Motorschäden sowie zur Entwicklung und Fertigung von Motorkomponenten können außerdem Reparaturlösungen erarbeitet werden und Motorkomponenten verbessert werden, sodass zukünftige Schäden verhindert werden können. Technikkompetenz und ein tiefes Verständnis in der Schadensanalyse hat uns zu einem der Branchenführer im Bereich der Motoreninstandsetzung gemacht. Wir waren immer bereit, das über die Jahre erlangte Wissen zu teilen und stets Anlaufstelle für den technischen Austausch. Mit der neu gegründeten Motorenakademie Wild wollen wir diesen Austausch professionalisieren und eine Plattform bieten, in der Sachverständige, Motoreninstandsetzer, Motorenentwickler und andere technische Interessierte Know-how rund um den Verbrennungsmotor und darüber hinaus erlangen können.

Das vorliegende Buch ist – wie die Motorenakademie auch – das Destillat jahrzehntelanger Erfahrung aus der Motoreninstandsetzung und der Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren in verschiedenen Anwendungen. Es kann als Nachschlagewerk dienen, wobei hierbei vor allem die Schadenssteckbriefe einen schnellen Überblick bieten sollen. Es soll aber auch technisch notwendiges Hintergrundwissen vermitteln, wozu ein ausführlicher Grundlagenteil, der einerseits Basiswissen zum Verbrennungsmotor beschreibt, andererseits den Schaden und die dazu führenden Mechanismen beleuchtet, verfasst wurde.

Neben der Erläuterung der verschiedenen Schäden, ihrer Ausprägung (Schadensbild), der Mechanismen und Ursachen ist in den Kapiteln zu den einzelnen Motorkomponenten eine ausführliche Beschreibung der Komponente selbst zu finden. Deren Aufgabe und Funktion im Verbrennungsmotor, die Belastungen, die sie im Motorbetrieb erfahren, konstruktive Ausführungen, Informationen zur Fertigung und eingesetzten Werkstoffen sind notwendige Kenntnisse, um Schäden und Ursachen zielsicher analysieren zu können. Abgerundet wird das Buch durch einen Blick in die Vergangenheit und in den Verlauf der Entwicklung von Verbrennungsmotoren, in der Motorschäden ein steter Begleiter waren. Am Ende des Buches richtet sich der Blick in die Zukunft und es werden verschiedene Zukunftsszenarien des in vielen Ländern bereits «totgesagten» Verbrenners beleuchtet.

Danke dem Vogel-Verlag, insbesondere STEFFEN DONATH, NIELS BERNAU, UTE JAXTHEIMER und STEFFEN DOMINSKY, für eine wirklich großartige Zusammenarbeit und viele hilfreiche Tipps und Ratschläge. Außerdem besonderer Dank an WALTER ESSENREITER und RALF DEUBEN

vom AutoFachmann. RALF DEUBEN hat mit zahlreichen CAD-Darstellungen die Anschaulichkeit der Bilder auf ein sehr hohes Niveau gehoben.

Besonderer Dank auch an meine Familie, meine Frau CHRISTIANE, die Kinder LUKAS, der tatkräftig beim Fotografieren und Sortieren unterstützt hat, JANNIK, MARIE und LENI WILD.

Danke außerdem an meine Mutter RENATE, meine Schwester SUSANNE, meinen Bruder MARKUS und meinen Onkel BURKARD, die direkt, durch fachliche Korrektur, Tipps beim Schreiben oder auch indirekt zum Gelingen des Buches beigetragen haben.

Großer Dank für fachliches Lektorat, konstruktive Gespräche und Hinweise gehen außerdem an:

- alle Mitarbeiter der Wild-Motoren GmbH & Co KG, PAUL BAIER, THORSTEN GÖB, BENNY POßMAYER, EDUARD SCHAULIS, MICHEL KRÜCKEL und NICOLE TIMM,
- JOCHEN SCHUMACHER, STEFAN ARPOGAUS (ehemals Kolbenschmidt),
- WOLFRAM KOTTE (Mitarbeit in Kapitel 21, BE Turbo GmbH),
- PROF. DR. SCHLACHTER (Fachhochschule Schweinfurt),
- SIMON MALCHER, SEBASTIAN SUSSET, CLEMENS HAMPE (Audi AG),
- SIMON SCHNAIBEL, REINER HOLWEIN, JÖRG SEIDEL, MARKUS ROIDER, CHRISTOPH ETTWEIN (MS Motorservice International),
- HOLGER GERMANN, EDWARD WERNINGHAUS (Kolbenschmidt),
- SEBASTIAN HAUPT, DANNY SCHWARZ, GERALD DÖPFERT, FRANK HOHBEIN, MARKUS KLAISSLE, JOHANNES SAILER (Senertec),
- LEANDER SCHRAMM (KS Huayu Alutech GMBH),
- MARK ERLWEIN (KS-Gleitlager),
- JOACHIM GÖTZ, SARAH-JO NICHOLS, FLORIAN KIZIAK (Elring Klinger AG),
- STEFAN ZECH (Tenneco Inc.),
- KARL-HEINZ MAYER (Unterstützung Kap. 19 Ventildfeder),
- HORST KÖHLER (dieselmotoren-historik.com)
- und die Engine Historic Society

Außerdem an alle Unternehmen die bereitwillig Bildfreigaben erteilt haben.

Der Inhalt dieses Buches wurde von uns durch umfangreiche Recherchen sorgfältig erwogen und mehrmals überprüft. Trotzdem können inhaltliche Fehler bei dieser komplexen interdisziplinären Thematik nicht ganz ausgeschlossen werden. Die Autoren übernehmen deshalb keine Haftung für etwaige Personen-, Sach- oder Vermögensschäden. Wir bitten im Fall eines sachlichen Fehlers um Kontaktaufnahme mit uns über E-Mail wild-a@gmx.de oder über den Verlag.

Nun wünschen die Autoren viel Spaß beim Lesen!

ANDREAS WILD

RICHARD WILD

Unterpleichfeld 10.10.2022

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	v
<b>Quickfinder Schadensteckbriefe</b> .....	xix
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Aufbau und Funktion von Motoren</b> .....	<b>11</b>
2.1 Definitionen und Begriffe .....	11
2.2 Definitionen und Begriffe .....	12
2.3 Funktion und Einteilung von Motoren .....	14
2.4 Kinematik des Kurbeltriebs, Kräfte und Momente .....	20
2.5 Kenngrößen und Wirkungsgrade.....	32
2.6 Betriebsverhalten von Verbrennungsmotoren.....	40
<b>3 Schaden</b> .....	<b>43</b>
3.1 Definition und Begriffe .....	43
3.2 Motorschäden und ihre Ursachen .....	44
3.2.1 Produktfehler .....	44
3.2.1.1 Auslegungsfehler .....	44
3.2.1.2 Werkstoff- / Materialfehler .....	45
3.2.1.3 Fertigungsfehler .....	46
3.2.2 Betriebsfehler .....	47
3.2.2.1 Betrieb außerhalb des freigegebenen Betriebsbereichs .....	47
3.2.2.2 Spezielle Betriebsbedingungen .....	48
3.2.2.3 Bedienfehler .....	50
3.2.3 Reparatur- und Wartungsfehler .....	51
3.2.3.1 Wartungsfehler .....	51
3.2.3.2 Bearbeitungsfehler .....	52
3.2.3.3 Montagefehler .....	53
3.3 Beanspruchungen und Schadensarten.....	53
3.3.1 Mechanische Beanspruchung – Brüche.....	53
3.3.1.1 Mechanische Kräfte und Spannungen in Bauteilen .....	54
3.3.1.2 Bruchursachen, Bruchmechanismus.....	56
3.3.1.3 Werkstoffeigenschaften und Verformungsverhalten von Werkstoffen .....	56

3.3.1.4	Bruchformen .....	59
3.3.2	Thermische Beanspruchung .....	67
3.3.2.1	Wärmeeintrag und Temperaturbelastung von Motorkomponenten .....	68
3.3.2.2	Thermische Belastung und Mischformen mit thermischer Belastung .....	69
3.3.3	Thermomechanische Beanspruchung (TMF-Ermüdung) .....	71
3.3.4	Tribologische Beanspruchung .....	75
3.3.4.1	Definitionen und tribologisches System .....	75
3.3.4.2	Physikalische Grundlagen – Reibung, Schmierung und Verschleiß .....	77
3.3.4.3	Stribeck-Kurve und hydrodynamische Gleitlagerung .....	80
3.3.4.4	Verschleiß .....	83
3.3.4.5	Schmierung .....	90
3.3.4.6	Tribologie im Verbrennungsmotor .....	93
3.3.5	Korrosive Beanspruchung .....	96
3.3.5.1	Grundformen der Korrosion .....	97
3.3.5.2	Korrosionsarten .....	98
3.3.5.3	Korrosionsmechanismen im Verbrennungsmotor ...	100
3.3.6	Kavitationserosion .....	107
3.3.7	Verbrennungsstörungen .....	111
3.3.7.1	Verbrennungsstörungen am Ottomotor .....	111
3.3.7.2	Verbrennungsstörungen am Dieselmotor .....	118
3.3.7.3	Allgemeine Verbrennungsstörungen .....	119
<b>3.4</b>	<b>Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>121</b>
3.4.1	Durchführung Schadensanalyse .....	122
3.4.2	Fallbeispiel Schadensanalyse .....	125
3.4.2.1	Schadensanalyse Pkw-Ottomotor .....	125
<b>4</b>	<b>Motoröl und Ölverbrauch .....</b>	<b>133</b>
<b>4.1</b>	<b>Motoröl .....</b>	<b>133</b>
4.1.1	Aufgaben und Anforderungen .....	133
4.1.2	Viskosität von Motoröl .....	134
4.1.3	Belastungen .....	137
4.1.4	Betriebseinflüsse und Veränderungen des Motoröls im Motorbetrieb .....	138
4.1.5	Aufbau, Herstellung und Eigenschaften von Motorölen (und Ausführungen) .....	144
4.1.6	Motoröle für moderne Verbrennungsmotoren .....	149
<b>4.2</b>	<b>Ölverbrauch von Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>154</b>
4.2.1	Ölverbrauch durch die Kolbengruppe .....	157
4.2.2	Ölverbrauch durch Ventilschaft / Ventilführung / Ventilschaftabdichtung .....	159
4.2.3	Ölverbrauch durch den Abgasturbolader .....	159

4.2.4	Ölverbrauch durch die Motorentlüftung .....	160
-------	---	-----

## **5 Kolben..... 161**

<b>5.1</b>	<b>Aufgaben und Aufbau .....</b>	<b>161</b>
<b>5.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>162</b>
<b>5.3</b>	<b>Konstruktion und Aufbau .....</b>	<b>166</b>
<b>5.4</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>174</b>
<b>5.5</b>	<b>Kolbenkühlung .....</b>	<b>177</b>
<b>5.6</b>	<b>Schäden an Kolben .....</b>	<b>179</b>
5.6.1	Mechanische Schäden & Brüche am Kolben .....	181
5.6.1.1	Brüche ausgehend vom Kolbenboden oder der Kolbenmulde .....	182
5.6.1.1.1	Risse und Brüche am Kolbenboden – Muldenrand- und Muldengrundrisse an Alu-Kolben für direkteinspritzende Dieselmotoren .....	182
5.6.1.1.2	Risse und Brüche am Kolbenboden – Muldenrandrisse Stahlkolben + Verzunderung.....	191
5.6.1.1.3	Risse und Brüche am Kolbenboden – Vor- und Wirbelkammermotoren (Diesel) .....	195
5.6.1.2	Brüche im Ringfeld (Ringstegbrüche) und am Feuersteg .....	197
5.6.1.3	Brüche ausgehend vom Kühlkanal des Kolbens .....	205
5.6.1.4	Brüche ausgehend vom Ringträger – Debonding .....	210
5.6.1.5	Brüche am Kolbenschaft .....	214
5.6.1.6	Brüche der Kolbennabe.....	218
5.6.2	Thermische Schäden an Kolben – Aufschmelzungen & durchgebrannte Kolbenbereiche, Klopfschäden.....	223
5.6.2.1	Erosionsartiger Materialabtrag am Kolben – Klopfschäden Ottomotor.....	223
5.6.2.2	Durchgebrannter Kolbenboden Ottomotor.....	228
5.6.2.3	Abschmelzungen Kolbenboden Ottomotor .....	230
5.6.2.4	Abschmelzungen oder Loch im Kolbenboden Dieselmotor .....	234
5.6.3	Tribologische Schäden an Kolben – Verschleiß und Fresser.....	239
5.6.3.1	Grundlegende Schadensmechanismen und Erscheinungsmerkmale.....	241
5.6.3.1.1	Verschleißbedingter Materialabtrag .....	241
5.6.3.1.2	Überhitzungsfresser .....	242
5.6.3.1.3	Trockenlauffresser.....	243
5.6.3.1.4	Spielfresser .....	245

	5.6.3.1.5	Systematik zur Analyse von Fresserscheinungen an Kolben .....	246
	5.6.3.2	Verschleiß und Fresser am Feuersteg .....	247
	5.6.3.3	Verschleiß und Fresser am Kolbenschaft .....	252
	5.6.3.3.1	Kolbenschaftverschleiß .....	252
	5.6.3.3.2	Flucht- und Formabweichungen – Tragbilder am Kolbenschaft .....	256
	5.6.3.3.3	Kolbenschaftfresser .....	258
	5.6.3.3.3.1	Kolbenschaftfresser, beidseitig .....	259
	5.6.3.3.3.2	Kolbenschaftfresser, einseitig .....	261
	5.6.3.3.3.3	Kolbenschaftfresser in 45°-Lage (Diagonal) .....	263
	5.6.3.3.3.4	Kolbenschaftfresser am unteren Schaftende .....	266
5.6.4		Sonstige Kolbenschäden .....	267
	5.6.4.1	Beschädigung des Kolbenbodens durch Fremdkörper / durch Ventilkontakt .....	267

## **6 Kolbenbolzen und Kolbenbolzensicherungen..... 271**

<b>6.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>271</b>
<b>6.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>272</b>
<b>6.3</b>	<b>Aufbau und Konstruktion .....</b>	<b>273</b>
<b>6.4</b>	<b>Werkstoffe, Beschichtungen und Fertigung .....</b>	<b>276</b>
<b>6.5</b>	<b>Kolbenbolzensicherungen .....</b>	<b>276</b>
<b>6.6</b>	<b>Schäden am Kolbenbolzen, seiner Lagerung und axialen Sicherung .....</b>	<b>277</b>
6.6.1	Mechanische Schäden .....	277
	6.6.1.1 Brüche des Kolbenbolzens .....	277
	6.6.1.2 Schäden bei der Bolzenmontage und axiales Auswandern des Kolbenbolzens .....	281
6.6.2	Tribologische Schäden am Kolbenbolzen und seiner Lagerung .....	285
	6.6.2.1 Verschleiß an Kolbenbolzen, Kolbennaben und im kleinen Pleuelauge .....	285

## **7 Kolbenringe .....** 295

<b>7.1</b>	<b>Aufgaben und Funktionsprinzip .....</b>	<b>295</b>
<b>7.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>298</b>
<b>7.3</b>	<b>Aufbau und Konstruktion .....</b>	<b>299</b>
<b>7.4</b>	<b>Ausführungen .....</b>	<b>301</b>
<b>7.5</b>	<b>Werkstoffe, Beschichtungen, Fertigung .....</b>	<b>304</b>
<b>7.6</b>	<b>Schäden an Kolbenringen .....</b>	<b>306</b>

7.6.1	Mechanische Schäden & Brüche an Kolbenringen.....	307
7.6.1.1	Brüche an Verdichtungsringen.....	307
7.6.1.2	Verformungen von Kolbenringen, Maulweitenverlust.....	310
7.6.1.3	Brüche an 3-tlg. Ölabstreifringen, Einfedern in Drainagebohrungen .....	313
7.6.2	Tribologische Schäden – Verschleiß an Kolbenringen und Ringnuten, Sekundärverschleiß an Ölabstreifringen .....	316
7.6.2.1	Verschleiß der Lauffläche.....	316
7.6.2.2	Brandspurbildung.....	322
7.6.2.3	Ringnutverschleiß am Kolben und Flankenverschleiß an Kolbenringen.....	325
7.6.2.4	Ringnut stark ausgeschlagen / Auswaschungen der Ringnut durch gebrochene Kolbenringe .....	332
7.6.2.5	Sekundärverschleiß an Ölabstreifringen .....	335
7.6.3	Sonstige Auffälligkeiten & Schäden an Kolbenringen.....	339
7.6.3.1	Probleme mit Beschichtungen auf den Laufflächen .....	339
7.6.3.2	Funktionsprobleme durch Bildung von Ölkohle.....	341
7.6.3.2.1	Klemmen / Stecken des Kolbenrings in der Ringnut .....	342
7.6.3.2.2	Zugesetzte Drainageöffnungen an Ölabstreifringen.....	345

## **8 Pleuel ..... 347**

### **8.1 Aufbau und Aufgaben ..... 348**

### **8.2 Belastungen ..... 348**

### **8.3 Ausführungen, Aufbau und Konstruktion..... 350**

### **8.4 Werkstoffe, Fertigung..... 353**

### **8.5 Schäden an Pleuel..... 355**

8.5.1	Mechanische Schäden an Pleuelstangen.....	356
8.5.1.1	Verformung des Pleuels – Flüssigkeitsschlag .....	356
8.5.1.2	Brüche am Pleuel .....	358
8.5.1.2.1	Bruch der Pleuelbuchse und Brüche im kleinen Pleuelauge.....	359
8.5.1.2.2	Brüche des Pleuelschafts.....	362
8.5.1.2.3	Bruch des Pleuels im großen Pleuelauge.....	366
8.5.1.3	Schäden an der Pleuelverschraubung .....	369
8.5.2	Tribologische Schäden am Pleuel .....	372
8.5.2.1	Fretting / Reibschwingverschleiß .....	372

## **9 Lagerung ..... 375**

### **9.1 Aufgaben und Aufbau ..... 375**

<b>9.2</b>	<b>Bezeichnungen &amp; Ausführungsformen</b> .....	<b>377</b>
<b>9.3</b>	<b>Funktion</b> .....	<b>378</b>
<b>9.4</b>	<b>Belastungen und Anforderungen an Lager</b> .....	<b>378</b>
<b>9.5</b>	<b>Auslegung und Konstruktion</b> .....	<b>381</b>
<b>9.6</b>	<b>Lageraufbau, Werkstoffe und Fertigung</b> .....	<b>386</b>
<b>9.7</b>	<b>Schäden an Gleitlagern</b> .....	<b>390</b>
9.7.1	Mechanische Schäden an Lagern – Ermüdung.....	393
9.7.1.1	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer» .....	393
9.7.1.2	Ermüdung des Lagermetalls .....	395
9.7.2	Tribologische Schäden an Lagern – Verschleiß, Tragbilder und Fresser .....	400
9.7.2.1	Einlaufverschleiß / Anpassungverschleiß .....	402
9.7.2.2	Lagerverschleiß .....	404
9.7.2.3	Abrasivverschleiß durch Fremdkörper .....	406
9.7.2.4	Verschleiß durch unterlegte Partikel am Lagerrücken .....	408
9.7.2.5	Tragbilder & Verschleiß durch Form- und Lageabweichungen .....	410
9.7.2.5.1	Kantenträger und verschleißfreie Bereiche an den Lagerkanten.....	411
9.7.2.5.2	Verschleiß im Lagerzentrum.....	414
9.7.2.5.3	Verschleiß im Stoßbereich.....	415
9.7.2.6	Schmierspuren / Anreiber .....	416
9.7.2.7	Fresser.....	419
9.7.3	Thermische Schäden an Lagern – Überhitzung .....	423
9.7.4	Korrosion, Kavitation und sonstige Schäden an Lagern.....	425
9.7.4.1	Kavitation .....	425
9.7.4.2	Korrosion .....	429
9.7.4.2.1	Korrosion der Lagerlauffläche .....	430
9.7.4.2.2	Korrosionsangriff am Lagerrücken / Fretting.....	431
<b>10</b>	<b>Kurbelwelle</b> .....	<b>435</b>
<b>10.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben</b> .....	<b>435</b>
<b>10.2</b>	<b>Belastungen</b> .....	<b>436</b>
<b>10.3</b>	<b>Aufbau, Konstruktion und Ausführungen</b> .....	<b>439</b>
<b>10.4</b>	<b>Werkstoffe, Fertigung</b> .....	<b>444</b>
<b>10.5</b>	<b>Schäden an Kurbelwellen</b> .....	<b>447</b>
10.5.1	Biegedauerbruch.....	450
10.5.2	Torsionsdauerbruch .....	453
10.5.3	Heißrisse auf dem Lagerzapfen.....	458
<b>11</b>	<b>Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderlaufbahn</b> .....	<b>461</b>
<b>11.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben</b> .....	<b>461</b>

<b>11.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>462</b>
<b>11.3</b>	<b>Aufbau, Gestaltung und Konstruktion .....</b>	<b>466</b>
<b>11.4</b>	<b>Werkstoffe, Laufbahntechnologien und Fertigung .....</b>	<b>472</b>
<b>11.5</b>	<b>Bearbeitung der Zylinderlaufbahn durch Honen, Laufbahnoberflächen .....</b>	<b>482</b>
<b>11.6</b>	<b>Schäden am Zylinderkurbelgehäuse und an Zylindern .....</b>	<b>487</b>
11.6.1	Schäden an der Struktur von Zylinderkurbelgehäusen.....	489
11.6.1.1	Risse oder Brüche des Zylinders und im Zylinderstegbereich .....	489
11.6.1.2	Risse / Brüche in festigkeitskritischen Bereichen, Hauptlagerstuhl / Verschraubung Zylinderkopf .....	494
11.6.2	Tribologische Schäden an der Zylinderlauffläche .....	497
11.6.2.1	Spiegelbildung und Bore Polishing.....	497
11.6.2.2	Zwickelverschleiß – Verschleiß durch Kolbenringe .....	501
11.6.2.3	Fresser.....	506
11.6.3	Fertigungs- und Bearbeitungsfehler an der Zylinderlaufbahn...	509
11.6.3.1	Abplatzen von Beschichtungen, Haftungsprobleme .....	509
11.6.3.2	Fehler beim Honen.....	512
11.6.3.2.1	Blechmantelbildung.....	513
11.6.3.2.2	hoher Zerstörungsgrad Silizium-Kristalle .....	515
11.6.4	Schäden an Zylinderlaufbuchsen .....	516
11.6.4.1	Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen.....	517
11.6.4.2	Brüche des Buchsenbundes .....	520

## **12 Zylinderkopfdichtung .....** **523**

<b>12.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>523</b>
<b>12.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>524</b>
<b>12.3</b>	<b>Anforderungen .....</b>	<b>525</b>
<b>12.4</b>	<b>Konstruktion, Aufbau und Ausführungen.....</b>	<b>526</b>
<b>12.5</b>	<b>Schäden an der Zylinderkopfdichtung.....</b>	<b>530</b>
12.5.1	Verlust der Verpressung der Brennraumdichtung – Undichtigkeit Brennraum.....	534
12.5.2	Brüche der Brennraumdichtung – Übertritt Zylinderdruck .....	536
12.5.2.1	Stegbruch .....	538
12.5.2.2	Sickenbruch – Mehrlagen Stahl ZKD.....	540
12.5.3	Überhitzungen der Zylinderkopfdichtung.....	540
12.5.3.1	Überhitzung Weichstoff-Metall ZKD – Aufquellungen.....	541
12.5.3.2	Überhitzung Mehrlagen-Stahl ZKD – Ablösungen Elastomer-Beschichtung.....	542
12.5.4	Oberflächenfehler .....	543

12.5.4.1	Nicht plane oder beschädigte Oberflächen am ZKD oder Zylinderkopf.....	543
12.5.4.2	Undichtigkeit Brennraum – zu hohe Oberflächenrauigkeit.....	545
12.5.5	Sonstige Schäden an Zylinderkopfdichtungen.....	546
12.5.5.1	Beschädigungen an Elastomer-Dichtelementen.....	547
<b>12.6</b>	<b>Schadensfolgen durch defekte Zylinderkopfdichtungen .....</b>	<b>547</b>

## **13 Steuertrieb ..... 549**

<b>13.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>549</b>
<b>13.2</b>	<b>Anforderungen und Ausführungen .....</b>	<b>551</b>
<b>13.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>552</b>
<b>13.4</b>	<b>Ausführungen, Aufbau und Konstruktion.....</b>	<b>555</b>
13.4.1	Steuerkettentrieb .....	556
13.4.2	Zahnriementrieb / Synchronriementrieb .....	563
13.4.3	Stirnradtrieb / Rädertrieb .....	568
13.4.4	Vergleich der verschiedenen Steuertriebsausführungen.....	574
<b>13.5</b>	<b>Schäden am Steuertrieb.....</b>	<b>577</b>
13.5.1	Schäden an Steuerketten .....	579
13.5.1.1	Verschleiß von Steuerketten und Kettenrädern .....	580
13.5.1.2	Riss der Steuerkette.....	587
13.5.2	Schäden an Synchronriemen / Zahnriemen .....	591
13.5.2.1	Zahnriemenriss.....	600
13.5.3	Schäden an Zahnrädern bzw. in Rädertrieben .....	603
13.5.3.1	Zahnfußbrüche .....	606

## **14 Zylinderkopf..... 611**

<b>14.1</b>	<b>Aufbau und Aufgaben .....</b>	<b>611</b>
<b>14.2</b>	<b>Bauarten / Einteilung .....</b>	<b>613</b>
<b>14.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>614</b>
<b>14.4</b>	<b>Konstruktion und Aufbau.....</b>	<b>617</b>
<b>14.5</b>	<b>Kühlung des Zylinderkopfes – Wassermantel .....</b>	<b>618</b>
<b>14.6</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>621</b>
<b>14.7</b>	<b>Schäden an Zylinderköpfen .....</b>	<b>628</b>
14.7.1	Risse des Zylinderkopfs.....	632
14.7.1.1	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums.....	632
14.7.1.2	Risse in brennraumfernen Bereichen.....	635

## **15 Ventiltrieb ..... 641**

<b>15.1</b>	<b>Aufgaben und Anforderungen.....</b>	<b>641</b>
<b>15.2</b>	<b>Aufbau, Bauarten und Einteilung .....</b>	<b>642</b>
<b>15.3</b>	<b>Funktion: Ventilerhebung – Hubfunktion – Kinematik.....</b>	<b>643</b>
<b>15.4</b>	<b>Belastungen: Ventiltriebsdynamik und wirkende Kräfte .....</b>	<b>648</b>

<b>15.5</b>	<b>Konstruktion und Ausführungen .....</b>	<b>653</b>
<b>15.6</b>	<b>Schäden am Ventiltrieb .....</b>	<b>663</b>

## **16 Nockenwelle .....** 669

<b>16.1</b>	<b>Aufgaben, Aufbau und Funktion .....</b>	<b>669</b>
<b>16.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>672</b>
<b>16.3</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>673</b>
<b>16.4</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>676</b>
<b>16.5</b>	<b>Schäden an Nockenwellen .....</b>	<b>678</b>
16.5.1	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen .....	680
16.5.2	Tribologische Schäden .....	682
16.5.2.1	Verschleiß der Nocken und der Nockenfolger .....	682
16.5.2.2	Verschleiß und Fressen der Nockenwellenlagerung .....	683

## **17 Nockenfolger .....** 689

<b>17.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>689</b>
<b>17.2</b>	<b>Ausführung, Aufbau und Funktion .....</b>	<b>690</b>
<b>17.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>693</b>
<b>17.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>694</b>
<b>17.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>695</b>
<b>17.6</b>	<b>Schäden an Nockenfolgern .....</b>	<b>697</b>
17.6.1	Tribologische Schäden an Nockenfolgern .....	698
17.6.1.1	Verschleiß Ventilbetätigung zwischen Nocken und Nockenfolger .....	699
17.6.1.2	Verschleiß Ventilbetätigung zwischen Nockenfolger und oberem Ventilende .....	706

## **18 Ventile .....** 711

<b>18.1</b>	<b>Aufgaben und Aufbau .....</b>	<b>712</b>
<b>18.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>712</b>
<b>18.3</b>	<b>Konstruktion und Ausführungsformen .....</b>	<b>715</b>
<b>18.4</b>	<b>Ventilkühlung .....</b>	<b>719</b>
<b>18.5</b>	<b>Werkstoffe und Fertigung .....</b>	<b>721</b>
<b>18.6</b>	<b>Schäden an Ventilen .....</b>	<b>727</b>
18.6.1	Thermische Schäden an Ventilen .....	728
18.6.1.1	Durchgebrannte Ventile .....	728
18.6.1.2	Radiale Risse im Sitzbereich .....	732
18.6.1.3	Durchgezogener Ventilsitzbereich .....	735
18.6.2	Mechanische Schäden an Ventilen – Ventilbrüche, Verbiegen des Ventils .....	737
18.6.2.1	Ventilschaft plastisch verformt / verbogen / Gewaltbruch am Ventilschaft .....	738

18.6.2.2	Biegedauerbrüche am Ventilschaft .....	741
18.6.2.3	Schäden im Bereich der Ventilbefestigung / am oberen Schaftende .....	745
18.6.2.4	Durchgebogener Ventilteller / Tulpenbildung / Bruch des Ventiltellers .....	750
18.6.3	Korrosive Schäden an Ventilen – Heißgaskorrosion .....	753
18.6.4	Tribologische Schäden an Ventilen .....	757

## **19 Ventalfeder, Ventilkegelstücke, Federteller..... 759**

<b>19.1</b>	<b>Aufgaben, Aufbau .....</b>	<b>759</b>
<b>19.2</b>	<b>Funktion .....</b>	<b>760</b>
<b>19.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>761</b>
<b>19.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>763</b>
<b>19.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>766</b>
<b>19.6</b>	<b>Schäden an Ventalfedern und Federtellern.....</b>	<b>768</b>
19.6.1	Bruch der Ventalfeder .....	770
19.6.2	Setzen / Erlahmen der Ventalfeder.....	775

## **20 Ventilsitz, Ventilführung und Ventilschaftabdichtung..... 779**

<b>20.1</b>	<b>Aufgaben .....</b>	<b>779</b>
<b>20.2</b>	<b>Aufbau und Funktion .....</b>	<b>780</b>
<b>20.3</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>782</b>
<b>20.4</b>	<b>Konstruktion .....</b>	<b>784</b>
<b>20.5</b>	<b>Fertigung und Werkstoffe .....</b>	<b>786</b>
<b>20.6</b>	<b>Schäden am Ventilsitz, an der Ventilführung und an Ventilschaftabdichtungen .....</b>	<b>790</b>
20.6.1	Tribologische Schäden, Verschleiß und Fresser .....	792
20.6.1.1	Ventilführungs- und Ventilschaftverschleiß, Ventilführungsfresser.....	792
20.6.1.2	Ventilsitzverschleiß .....	800
20.6.2	Mechanische Schäden, Verschleiß und Fresser .....	808
20.6.2.1	Brüche der Ventilführung .....	808
20.6.3	Korrosive Schäden am Ventilsitz .....	810
20.6.4	Sonstige Schäden.....	813
20.6.4.1	Verlust der Überdeckung / Lösen von Ventilsitz oder Ventilführung .....	813
20.6.4.2	Verschleiß und Aushärten von Ventilschaftabdichtungen.....	815

## **21 Aufladung / Abgasturbolader..... 819**

<b>21.1</b>	<b>Aufbau und Grundfunktion .....</b>	<b>820</b>
<b>21.2</b>	<b>Belastungen .....</b>	<b>824</b>

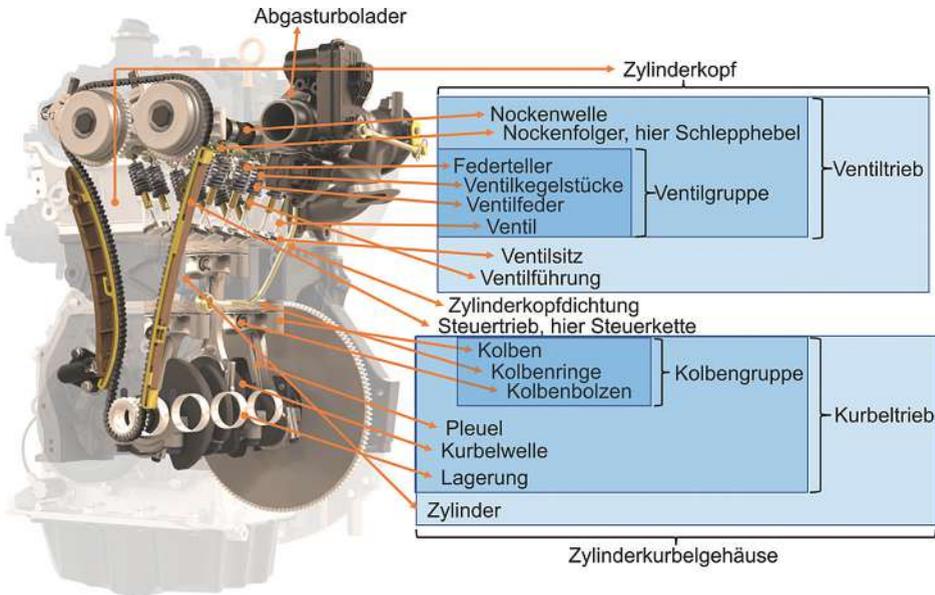
<b>21.3</b>	<b>Ausführungen &amp; Funktionen .....</b>	<b>825</b>
<b>21.4</b>	<b>Betriebsverhalten und Betriebsgrenzen des Turboladers.....</b>	<b>830</b>
<b>21.5</b>	<b>Werkstoffe &amp; Fertigung .....</b>	<b>832</b>
<b>21.6</b>	<b>Schäden an Turboladern .....</b>	<b>833</b>
21.6.1	Beschädigung von Verdichter- oder Turbinenrädern .....	839
21.6.2	Schäden / Verschleiß der Lagerung .....	843
21.6.2.1	Schäden der Radiallagerung .....	843
21.6.2.2	Verschleiß Axiallagerung .....	847
21.6.3	Bruch der Läuferwelle .....	850
21.6.4	Risse im Turbinengehäuse.....	853
21.6.5	Schäden am Verstellmechanismus von VTG-Ladern .....	855

<b>22</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>859</b>
-----------	-----------------------	------------

<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>869</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>879</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>885</b>



## Quickfinder Schadensteckbriefe



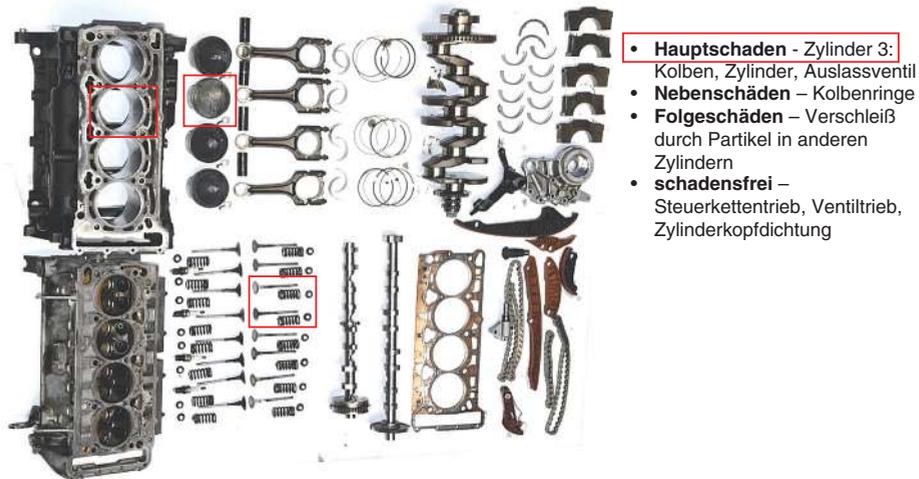
	Schaden	Steckbrief	Seite
<b>Kolben</b>	Bruch am Kolbenboden – Muldengrundriss	5.1	182
	Bruch am Kolbenboden – Muldenrandriss	5.2	183
	Verzunderung / Muldenrandrisse am Stahlkolben	5.3	191
	Risse am Kolbenboden – Vor- und Wirbelkammermotoren	5.4	195
	Ringstegbruch	5.5	198
	Feuerstegbruch	5.6	198
	Brüche ausgehend vom Kühlkanal	5.7	205
	Brüche ausgehend vom Ringträger – Debonding Ringträger	5.8	210
	Schaftbruch	5.9	214
	Nabenbruch – Gaskraft	5.10	219
	Nabenbruch – Massenkraft	5.11	219
	Erosionen am Kolben – Klopfschaden – Ottomotor	5.12	224

	Loch im Kolbenboden, Boden durchgebrannt – Ottomotor	5.13	228
	Abschmelzungen Kolbenboden – Ottomotor	5.14	231
	Abschmelzungen Kolbenboden / Loch im Kolben – Dieselmotor	5.15	234
	Verschleiß am Feuersteg	5.16	248
	Fresser Feuersteg	5.17	248
	Verschleiß am Kolbenschaft	5.18	253
	asymmetrisches Tragbild am Kolbenschaft	5.19	257
	Kolbenschaftfresser beidseitig	5.20	259
	Fresser Kolbenschaft, einseitig	5.21	261
	Fresser Kolbenschaft in 45°-Lage	5.22	263
	Fresser Kolbenschaft am unteren Schaftende	5.23	266
	Beschädigung Kolbenboden – Fremdkörper / Ventilkontakt	5.24	267
<b>Kolbenbolzen</b>	Bruch des Kolbenbolzens	6.1	278
	Schäden bei der Bolzenmontage, axiales Auswandern des Kolbenbolzens	6.2	281
	Verschleiß Kolbenbolzen, Kolbennaben, im kleinen Pleuelauge	6.3	285
	Brüche an Verdichtungsringen	7.1	307
<b>Kolbenring</b>	Maulweitenverlust und Verformungen an Verdichtungsringen	7.2	311
	Brüche an Ölabbstreifringen, Einhaken in Drainagebohrungen	7.3	313
	Verschleiß an der Lauffläche von Kolbenringen	7.4	316
	Brandspurbildung an der Lauffläche von Kolbenringen	7.5	322
	Sekundärverschleiß an 2-tlg. Ölabbstreifringen	7.6	326
	Sekundärverschleiß an 3-tlg. Ölabbstreifringen	7.7	333
	Ringnutverschleiß an Kolben / Flankenverschleiß an Ringen	7.8	335
	Folge Ringbruch: Ringnut ausgeschlagen / ausgewaschen	7.9	336
	Abplatzen / Verlust der Beschichtung des Kolbenrings	7.10	339
	Starker Ölkohleaufbau in der Ringnut – Klemmen Kolbenring in der Nut, fehlender Freigang	7.11	342
	Zusetzen von Drainageöffnungen in Ölabbstreifringen	7.12	345

<b>Pleuel</b>	Flüssigkeitsschlag – verbogenes Pleuel	8.1	356
	Brüche der Pleuelbuchse / im kleinen Pleuelauge	8.2	359
	Brüche des Pleuels im Schaftbereich	8.3	362
	Brüche des Pleuels im großen Pleuelauge	8.4	367
	Schäden / Lösen der Pleuelverschraubung	8.5	369
	Fretting im großen Pleuelauge	8.6	372
<b>Lager</b>	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer»	9.1	394
	Ermüdung / Dauerbruch des Lagermetalls	9.2	396
	Einlaufverschleiß / Anpassungsverschleiß	9.3	402
	Lagerverschleiß	9.4	404
	Lagerverschleiß durch Partikel / Drittkörper-Abra- sivverschleiß	9.5	406
	Lokaler Verschleiß durch unterlegte Partikel am Lagerrücken	9.6	409
	Kantentrag: einseitig, einseitig-wechselnd, beid- seitig	9.7	412
	Verschleißfreie Lagerkanten	9.8	412
	Konzentrierter Verschleiß im Lagerzentrum	9.9	414
	Verschleiß im Stoßbereich	9.10	415
	Schmierspur / Anreiber	9.11	416
	Fressen des Lagers	9.12	419
	Überhitzung des Lagers	9.13	423
	Kavitation	9.14	426
	Korrosion der Lagerlauffläche	9.15	430
	Korrosion am Lagerrücken / Fretting	9.16	432
<b>Kurbel- welle</b>	Biegedauerbruch Kurbelwelle	10.1	451
	Torsionsbruch Kurbelwelle	10.2	454
	Heißrisse Kurbelwelle	10.3	458
<b>Zylinder- kurbelge- häuse &amp; Zylinder- laufbahn</b>	Deformation / Risse im Zylinderstegbereich	11.1	489
	Risse im ZKG – Muttergewinde vom Hauptlager / der ZK-Schrauben	11.2	494
	Verschleiß der Honstruktur & Bore-Polishing	11.3	498
	Zwickelverschleiß & Verschleiß durch Kolbenrin- ge	11.4	501
	Fresser Zylinderlaufbahn	11.5	506
	Ablösung der Zylinderlaufbahnbeschichtung	11.6	510
	Fehler beim Honen: Blechmantelbildung	11.7	513
	Fehler beim Honen: hoher Zerstörungsgrad der Si-Kristalle	11.8	515
	Kavitation an nassen Zylinderlaufbuchsen	11.9	517
	Brüche des Buchsenbundes	11.10	520

<b>Zylinderkopfdichtung</b>	Undichtigkeit Brennraum – Verlust der Verpressung	12.1	534
	Bruch der Brennraumdichtung	12.2	537
	Stegbruch der Zylinderkopfdichtung	12.3	538
	Sickenbruch der Brennraumdichtung	12.4	540
	Überhitzung von Weichstoff-Metall ZKD – Aufquellungen	12.5	541
	Überhitzung MLS-ZKD – Ablösung Elastomer-Beschichtung	12.6	542
	Beschädigte, nicht-plane oder verzogene ZKD-Auflage	12.7	543
	Undichtigkeit Brennraum – zu hohe Oberflächenrauigkeit	12.8	544
	Undichtigkeit – Beschädigung von Elastomer-Dichtelementen	12.9	547
<b>Steuertrieb</b>	Verschleiß der Steuerkette und der Kettenräder	13.1	581
	Riss der Steuerkette	13.2	587
	Riss des Zahn- / Synchronriemens	13.3	600
	Zahnfußbrüche an Zahnädern	13.4	606
<b>Zylinderkopf</b>	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums	14.1	633
	Risse des Zylinderkopfs in brennraumfernen Bereichen	14.2	637
<b>Nockenwelle</b>	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen	16.1	681
	Verschleiß der Nockenwellenlagerung	16.2	683
	Fressen der Nockenwellenlagerung	16.3	683
<b>Nockenfolger</b>	Verschleiß – Nockenwelle / Nockenfolger	17.1	701
	Verschleiß Nockenfolger / oberes Ventilende	17.2	707
<b>Ventil</b>	Durchgebranntes Ventil	18.1	729
	Radiale Risse am Ventilteller	18.2	732
	Durchgezogener Ventilsitzbereich	18.3	736
	Ventil plastisch verformt / verbogen / Gewaltbruch am Schaft	18.4	738
	Biegedauerbruch am Ventilschaft	18.5	742
	Brüche des Ventilschafts im Bereich der Ventilbefestigung	18.6	746
	Tulpenbildung, Verbiegen und Bruch des Ventiltellers	18.7	750
	Heißgaskorrosion und Bruch des Ventilschafts	18.8	754

<b>Ventilfeder, Ventilkegelstücke, Federteller</b>	Bruch der Ventildfeder	19.1	770
	Setzen / Erlahmen der Ventildfeder	19.2	775
<b>Ventilsitz, Ventilführung, Ventilschaftabdichtung</b>	Ventilführungs-/ Ventilschaftverschleiß	20.1	793
	Ventilführungsfresser	20.2	793
	Ventilsitzverschleiß	20.3	800
	Brüche von Ventilführungen	20.4	808
	Korrosionsangriff am Ventilsitzring	20.5	810
	Lösen von Ventilsitzen oder Ventilführungen	20.6	813
	Verschleiß und Verhärten der Ventilschaftabdichtung	20.7	816
<b>Abgasturbolader</b>	Beschädigung von Verdichter- oder Turbinenrädern	21.1	839
	Schäden / Verschleiß der Radiallagerung	21.2	844
	Verschleiß Axiallager	21.3	848
	Bruch der Läuferwelle	21.4	850
	Risse im Turbinengehäuse	21.5	853
	Schwergängiger / blockierter VTG-Verstellmechanismus	21.6	855



- **Hauptschaden - Zylinder 3:**  
Kolben, Zylinder, Auslassventil
- **Nebenschäden** – Kolbenringe
- **Folgeschäden** – Verschleiß durch Partikel in anderen Zylindern
- **schadensfrei** – Steuerkettentrieb, Ventiltrieb, Zylinderkopfdichtung

**Bild 3.81** Demontierter Schadensmotor, Gruppierung der Bauteile in Schadenskategorien  
[Bild: Motorenakademie Wild]

Zunächst muss der Hauptschaden beschrieben und fotografisch dokumentiert werden. Dabei muss die Schadensart entsprechend den in 3.3 beschriebenen Belastungen festgestellt werden. Bild 3.82 zeigt die Kolben aller Zylinder und beschreibt die Schäden an Kolben 3, bei dem der Kolbenboden auf der Auslassseite bis zum Ringträger abgeschmolzen ist. Auf dem Kolbenboden befinden sich zahlreiche Partikel. Beide Kolbenschäfte sowie der Feuersteg und das gesamte Ringfeld haben starke Fressspuren. Durch die Erfahrung aus anderen Motorschäden kann das Abschmelzen des Kolbenbodens als primärer Schaden eingestuft werden, in dessen Folge es zum Fressen des Kolbens gegen die Zylinderwand kam.



- Kolben vom Feuersteg bis zum Ringträger abgeschmolzen
- starkes Fressen an beiden Schäften, dem Feuersteg und den Pleuellagerpleuellagerbolzen und Pleuellagerbuchsen

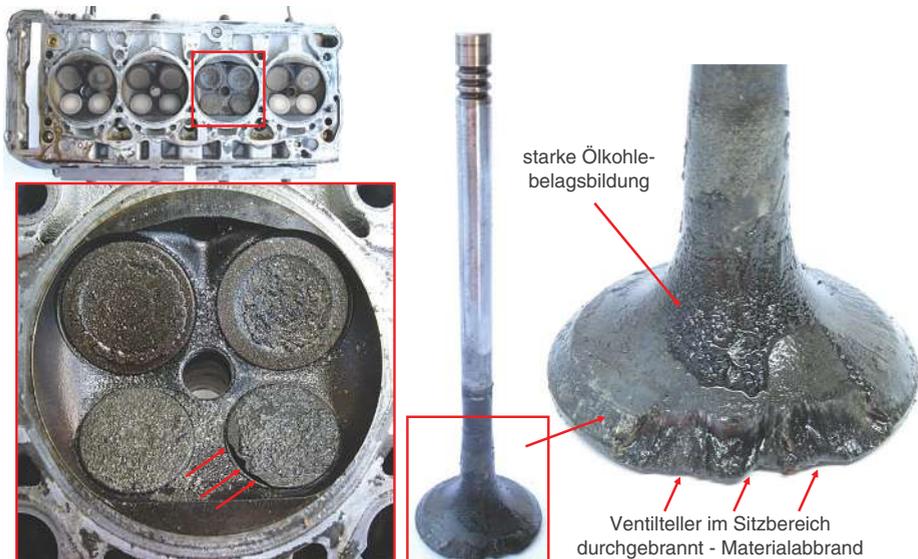
**Bild 3.82** Kolben des Schadensmotors, Hauptschaden Kolben 3  
[Bild: Motorenakademie Wild]

Der Fresser entsteht durch die hohen Temperaturen ausgehend vom Kolbenboden und Feuerstegbereich. Der adhäsive Verschleißvorgang setzt sich über das Ringpaket bis in die Kolbenschäfte fort. Bild 3.83 zeigt die Fressspuren an Zylinder 3. Der 2. Zylinder weist keine dieser für adhäsiven Verschleiß typischen Merkmale auf. Dort sind deutlich Honriefen (Spiralgleithonung, steiler Honwinkel) zu erkennen, wodurch mit anderen Begutachtungsergebnisse geschlussfolgert werden kann, dass die Kolbengruppe keinen allgemein erhöhten Verschleißzustand aufweist.



**Bild 3.83** Adhäsiver Verschleiß und Fresser an Zylinder 3, Zylinder 2 zum Vergleich  
[Bild: Motorenakademie Wild]

Das Auslassventil 6 aus dem Schadenszylinder ist am Ventilteller im Ventilsitzbereich durchgebrannt (Bild 3.84). Dabei ist auf ca. 60° des Umfangs Material aus dem Sitz abgebrannt.



**Bild 3.84** Durchgebranntes Auslassventil 6 am Schadenszylinder 3  
[Bild: Motorenakademie Wild]

Wie bereits beschrieben, ist der primäre Schadensmechanismus, das Abschmelzen des Kolbens und das Durchbrennen des Auslassventils, auf eine thermische Überlastung zurückzuführen. Dazu können Störungen bei der Wärmeabfuhr brennraumbegrenzten Bauteilen oder eine Steigerung der Wärmezufuhr führen. Die zentrale Frage zur Klärung der Schadensursache ist, durch welche Umstände konnten so hohe Temperaturen auftreten, dass sowohl Kolben (Alu-Legierung) als auch Ventile (Stahl) durchgebrannt sind. Die Erfahrung aus anderen Motorschäden und der Fakt, dass beide Komponenten durchgebrannt sind, weisen auf Verbrennungsstörungen hin. Typische Merkmale «klassischer Klopfschäden» wie erosiver Materialabtrag konnten nicht festgestellt werden. Die Erfahrung aus anderen gleichartigen Motorschäden an hochaufgeladenen modernen Ottomotoren zeigt, dass diese Schäden durch Defekte an Injektoren oder durch Ölverbrennung auftreten können. Diese beiden Möglichkeiten müssen untersucht werden.

Im Allgemeinen gilt an Mehrzylindermotoren, dass neben dem Hauptschaden, der im konkreten Schadensfall an Zylinder 3 identifiziert wurde, durch die Begutachtung der anderen Zylinder wertvolle Hinweise zur Klärung der Schadenursache gefunden werden können. Dabei zeigen sich an den Nachbarzylindern häufig Vorstufen des Hauptschadens, z. B. können bei einem Dauerbruch am Pleuel, an den Pleueln von Nachbarzylindern Anrisse gefunden werden. Dies gilt ebenfalls für Ventiltriebsbauteile, z. B. empfiehlt sich beim Ventilbruch, die Rissprüfung und ggf. die Prüfung des Rundlaufs an allen anderen Ventilen. Auch bei verschiedenen Verschleißmechanismen sind im Regelfall Abstufungen über die einzelnen Zylinder bzw. Ventile, Kolben etc. feststellbar.

Bild 3.85 zeigt die Kolben und die Ein- sowie die Auslassventile aller Zylinder. Schon bei makroskopischer Betrachtung fällt eine starke Ölkohlebelgung auf. Am Kolben ist diese am Boden, am Feuersteg und im Ringfeld sowie bis in den Nabenbereich erkennbar. Die Einlassventile im unteren Bildbereich haben im Bereich der Hohlkehle einen starken Aufbau von Ölbelägen. An den Auslassventilen sind dünnere Ölkohlebelege feststellbar.



**Bild 3.85** Auffällig starke Ölkohlebelgung an Kolben und Ventilen der Nachbarzylinder zum Hauptschaden [Bild: Motorenakademie Wild]

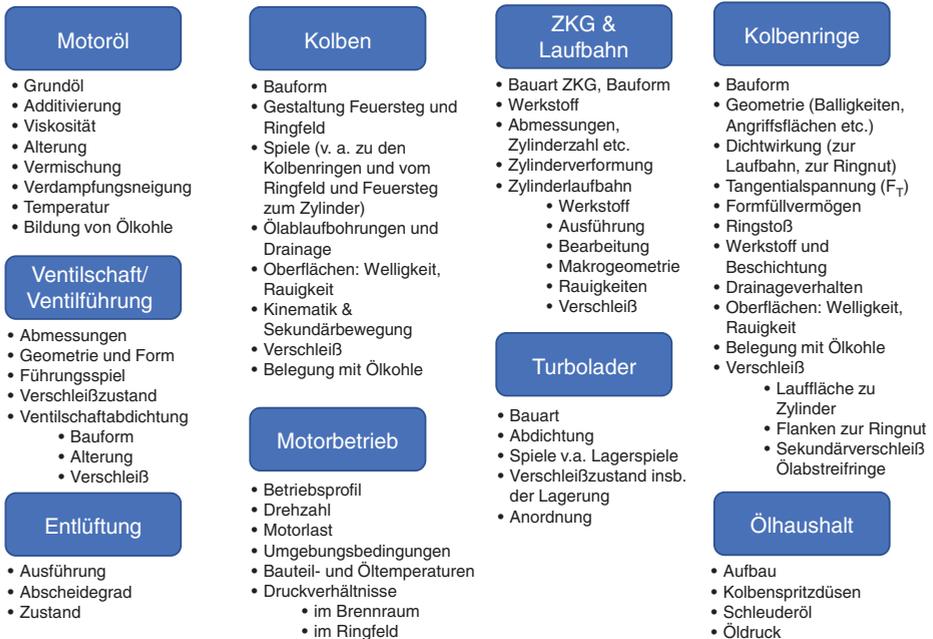


starke Ölkohlebelegung am Pleu:

- Kohleplatten auf dem Pleuboden
- Feuersteg zugesetzt

flüssiges Öl und Ölschlamm in den Ladungswechselkanälen

**Bild 4.18** Folgen von starkem Ölverbrauch, starke Ölkohle- und Ölschlammbelegung  
[Bild: Motorenakademie Wild]

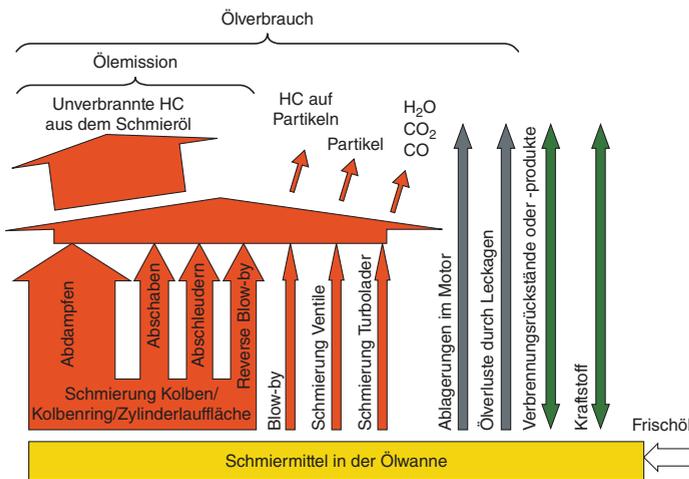


**Bild 4.19** Einflussgrößen Ölverbrauch [Bild: Motorenakademie Wild]

Anteil hat das System Ventilschaft, Ventilführung und die Schaftabdichtung sowie der Abgasturbolader und die Motorentlüftung, deren Öleinträge über die Ansaugstrecke in den Brennraum gelangen. Der Ölhaushalt regelt die Ölmenge, die an die einzelnen Dichtstellen gelangt. Auch das Motoröl nimmt durch seine Zusammensetzung, verschiedene Eigenschaften und auch durch den Alterungszustand Einfluss auf den Ölverbrauch

im Motor (4.1.6). Einige der in der Praxis auftretende Ursachen für erhöhten Ölverbrauch an aktuellen Verbrennungsmotoren werden am Ende des Kapitels dargestellt und dabei auf die entsprechenden Komponentenkapitel verwiesen.

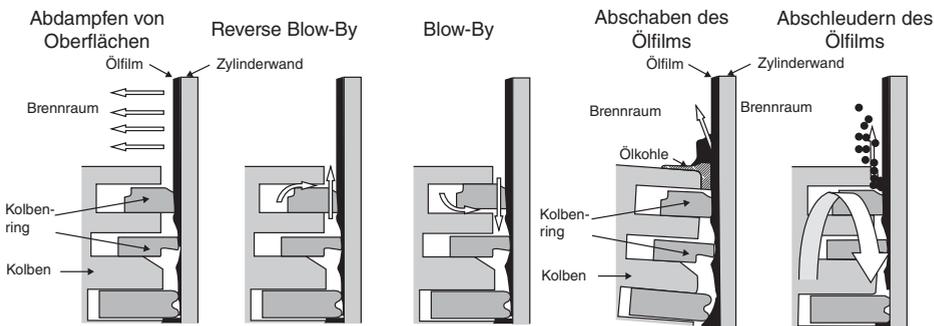
Das Motoröl wird über verschiedene Mechanismen verbraucht. Bild 4.20 zeigt die Bilanzierung des Motoröls im Verbrennungsmotor. Ein großer Teil des Motoröls gelangt unverbrannt als Ölemission in den Abgastrakt. Andere Bestandteile werden verbrannt und als Partikel ausgetragen. Zum Ölverbrauch werden auch die Anteile des Öls gerechnet, die als Rückstände im Motor verbleiben oder diesen durch Leckage verlassen. Wechselwirkungen mit dem Kraftstoff oder Verbrennungsprodukten beeinflussen die Ölbilanz. So kann ein überhöhter Kraftstoffeintrag, z. B. in der Folge eines Injektordefekts, dazu führen, dass der gemessene Ölstand über der Motorauszeit steigt.



**Bild 4.20** Bilanz des Motoröls im Verbrennungsmotor [62]

### 4.2.1 Ölverbrauch durch die Kolbengruppe

Die Kolbengruppe (mit dem Kolben, den Kolbenringen und der Zylinderlaufbahn) ist der Hauptverursacher von Ölverbrauch im Verbrennungsmotor. [12] beziffert deren Anteil am Gesamtölverbrauch mit 95 %. Das Öl wird über verschiedene Mechanismen, entsprechend Bild 4.21, verbraucht.



**Bild 4.21** Ölverbrauchsmechanismen durch Strömung und Kolbenbewegung [63]

Dies sind Mechanismen, die durch hohe Temperaturen und durch Gasströmungen sowie durch die Kolbenbewegung entstehen. Daneben sind es vor allem bei direkt einspritzenden Motoren Interaktionen zwischen dem Kraftstoff und dem Motoröl.

Der Ölverbrauch durch das Abdampfen vom Motoröl an Bauteiloberflächen, an der Zylinderwand und auch an der Kolbenoberfläche wird bestimmt durch den Stofftransport zwischen dem Schmierfilm und den heißen Gasen im Brennraum. Relevante Einflussgrößen sind die Gastemperatur, der Druck, die Gasgeschwindigkeit an der Phasengrenze, die Oberflächentemperatur des Schmierfilms, die brennraumseitigen Wandwärmübergangskoeffizienten und die Ölzusammensetzung [63].

Der Begriff Blow-By bezeichnet den Gasstrom, der ausgehend vom Brennraum, Kolben und Kolbenringe passiert und ins Kurbelgehäuse gelangt. Diese Strömung reißt Öl, meist in Form kleiner Tröpfchen mit und transportiert diese aus dem Kurbelraum. Es ist Aufgabe der Motorentlüftung, die unter Abschnitt 4.2.4 beschrieben wird, die Ölbestandteile im Blow-By abzuschneiden und dem Ölkreislauf zurückzuführen.

In umgekehrter Richtung, also in Richtung des Brennraums, kann es zu Reverse-Blow-By-Effekten kommen. Dabei kann Gas aus dem Ringfeld, den Zwischenringbereichen, in den Brennraum strömen und Öl mitreißen. Entscheidend dabei sind die lokalen Druckverhältnisse. Kritisch bezüglich Reverse-Blow-By sind die Bereiche im Arbeitszyklus mit niedrigen Zylinderdrücken, z. B. der Ansaug- oder späte Bereiche im Ausstoßtakt. Übersteigt der Druck zwischen dem 1. und 2. Ring den Zylinderdruck, kann Gas in Richtung des Brennraums strömen. Die Zwischenringdrücke können durch die Gestaltung der Ringstege, z. B. durch zusätzliche Volumina sowie durch die Auslegung des Ringpakets (Größe der Stoßspiele etc.) beeinflusst werden.

Durch die Kolbenbewegung werden die Effekte des Ölabschabens und des Ölabschleuderns verursacht. Beim Abschaben schiebt der Feuersteg des Kolbens, bzw. dort aufgebaute Ölkohle, Motoröl in den Brennraum. Der Effekt des Abschleuderns wird durch die Kolbenbeschleunigung hervorgerufen. Motoröl wird durch Massenträgheitskräfte in den Brennraum geschleudert.

Auch durch die Wirkung von Kraftstoff auf den Ölfilm auf der Zylinderwand kann der Ölverbrauch beeinflusst werden. [63] nennt dazu drei Mechanismen, die zu Viskositätsänderungen und zur Beeinflussung des Abdampfens führen können:

- Abwaschen des Ölfilms durch eingespritzten Kraftstoff von der Zylinderwand,
- Erhöhte Neigung des mit Kraftstoff verdünnten Motoröls zum Abdampfen,
- Lokal erhöhte Ölfilmdicke durch den Kraftstoff.

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Schäden bzw. Auffälligkeiten an der Kolbengruppe beschrieben, die zu einem Anstieg des Ölverbrauchs führen können:

- Laufflächenverschleiß Kolbenringe – Verlust der Abdichtwirkung (Abschnitt 7.6.2.1),
- Ringnutverschleiß, insbesondere wenn dadurch Ölpumpeffekte auftreten (Abschnitt 7.6.2.3),
- Sekundärverschleiß Ölabbstreifring – Verlust der Tangentialkraft und der Abstreifwirkung (Abschnitt 7.6.2.5),
- Ringverformung / Maulweitenverlust – Verlust der Tangentialkraft und der Abdichtung zur Ringnut (Abschnitt 7.6.1.2),

- Honung / Laufbahn / Zylinderverzug – Verlust der Dichtwirkung (Abschnitt 11.6.2),
- Verschleiß und Aushärten von Ventilschaftabdichtungen (Abschnitt 20.6.4.2).

Diese Auflistung kann nicht vollständig alle Ursachen für einen erhöhten Ölverbrauch erfassen. Ölverbrauchsbeanstandungen sollten immer motoren- und anwendungsspezifisch betrachtet werden. Neben konstruktiven Gegebenheiten haben der Motorbetrieb und das Motoröl großen Einfluss. Als Basis für die Ursachenfindung kann die Darstellung aus Bild 4.19 dienen, welche Einflussgrößen und damit mögliche Ursachen aufführt.

#### 4.2.2 Ölverbrauch durch Ventilschaft / Ventilfehrung / Ventilschaftabdichtung

Zur Schmierung der Kontaktstelle zwischen den Ventilschäften und den Ventilfehrungen ist ein Schmierfilm nötig, der dem System vom oberen Ende der Föhrung aus dem Ventilsteuerraum zugeföhrt wird. Dort sitzt die Ventilschaftabdichtung, deren Aufgabe es ist, den Ventilsteuerraum zur Ventilfehrung und den Ansaug- und Abgaskanälen hin abzudichten. Dabei muss sie eine geringe Ölmenge passieren lassen, um die Komponenten ausreichend mit Öl zu versorgen. Die Funktion sowie verschiedene Ausführungen von Ventilschaftabdichtungen werden in Kapitel 20 beschrieben. Abhängig vom Ventilfehrungsspiel, den lokalen Drücken und Temperaturen und anderen Einflussgrößen gelangt Öl, welches die Schaftabdichtung passiert, dann in die Ladungswechselkanäle und von dort in den Brennraum bzw. auch direkt in die Abgastrecke. Bei funktionierendem System ist diese Ölmenge sehr gering und hat nur einen sehr kleinen Anteil am Gesamtölverbrauch.

Verschiedene Störung an den Schaftabdichtungen, aber auch an Ventilfehrungen oder Ventilschäften können dazu föhren, dass die Ölmenge stark ansteigt. Dazu kann z. B. der Verschleiß der Dichtlippe der Ventilschaftabdichtung föhren. Diese sind bei erhöhtem Ölverbrauch und im Verdachtsfall zu überprüfen. Daneben gibt es häufig auch das Problem, dass die Elastomerdichtlippen der Ventilschaftabdichtungen verhärtet sind. Durch den Einfluss des Motoröls und hoher Betriebstemperaturen altert die Elastomer-Dichtlippe und verliert ihre Elastizität. Die harte unflexible Dichtlippe kann den Ölfilm vom Ventilschaft nicht mehr in ausreichendem Maß abstreifen. Der Ölverbrauch wird dann vor allem in Schubphasen des Motors, bei Unterdruck im Ansaugkanal, durch bläulich, weißen Qualm aus dem Auspuff sichtbar. Auffälligkeiten an Ventilschaftabdichtungen, die zu einem Anstieg des Ölverbrauchs föhren können, werden unter Abschnitt 20.6.4.2 beschrieben.

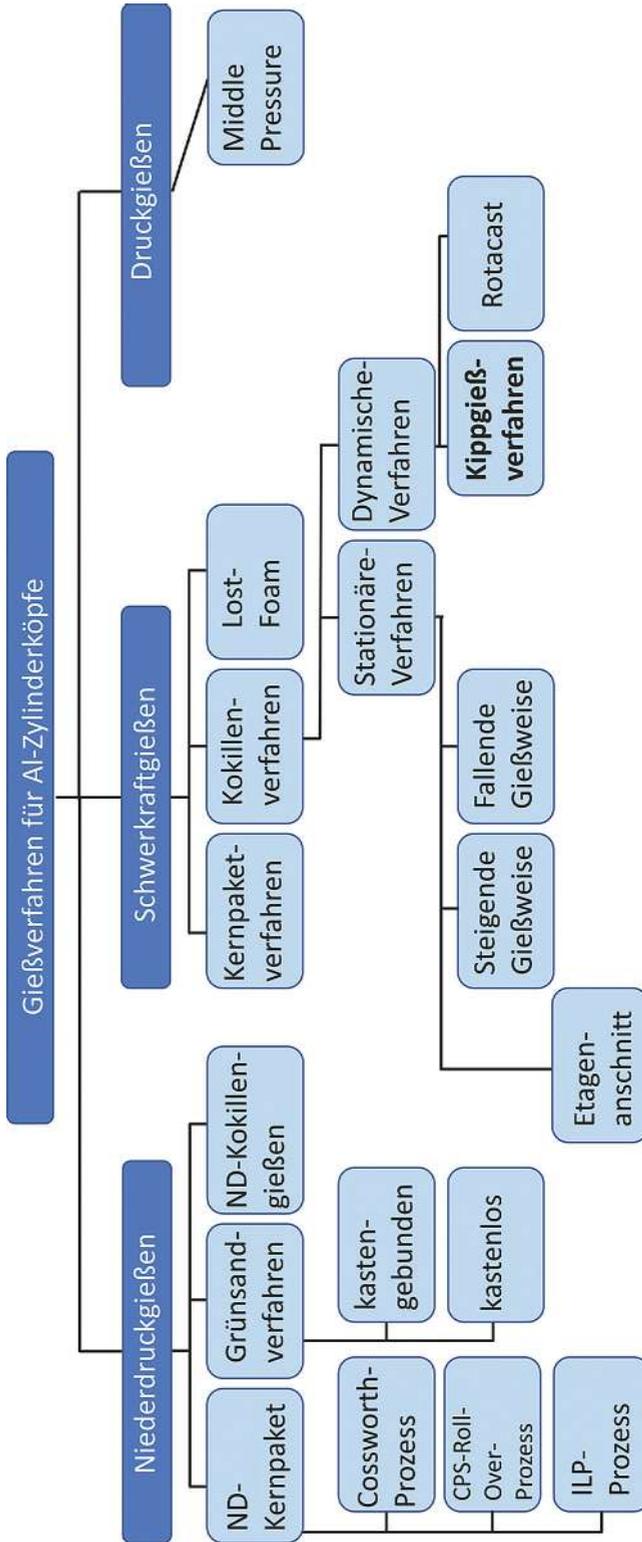
#### 4.2.3 Ölverbrauch durch den Abgasturbolader

Die Lagerung des Turboladers wird mit Motoröl geschmiert, dass dem Turbolader über den Ölkreislauf zugeföhrt wird. Zum Abgasturbinen- und zum Verdichterrad bzw. zu den Ladungswechselkanälen, wird die Lagerung im Regelfall über ein Labyrinthsystem abgedichtet. Das kann sich aus verschiedenen Querschnittsverengungen und einem oder mehreren hintereinander angeordneten Kolbenringen zusammensetzen. Die hohen Temperaturen und die hohen Drehzahlen erlauben keinen Einsatz von Radialwellendichtringen. Unvermeidbar fließt durch die Labyrinthdichtung eine geringe Leckagemenge des Motoröls in die Ladungswechselkanäle. Durch Verschleiß an den Kolbenringen und deren Nut, steigt

Tabelle 14.2 Al-Gusslegierungen für Zylinderköpfe

Legierung	Gießverfahren			Dehngrenze $R_{p_{0,2}}$ [MPa] min.						Zugfestigkeit $R_m$ [MPa] min.						
	S	N	D	Sandguss			Kokillenguss			Sandguss			Kokillenguss			
				F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64	
AlSi6Cu4	X	X		90			100				150			170		
AlSi8Cu3	X	X	X	90			100				150			170		
AlSi9Cu3	X	X	X	140 (Druckguss)						240 (Druckguss)						
AlSi7Mg0,3	X	X		190			210	180			230			290	250	
AlSi7Mg0,6	X	X		220			240	210			250			320	290	
AlSi9Mg	X	X		190			210	180			230			290	250	
AlSi10Mg	X	X	X	80	180		90	220	200		150	220		180	260	250
AlSi10Mg(Cu)	X	X		80	180		90	200			150	220		180	240	240
AlSi7MgCu0,5																
AlSi9MgCu0,5																
AlSi9Cu2Mg																
AlSi12CuNiMg	X	X	X					240							280	

Legierung	Dehngrenze $R_{p_{0,2}}$ [MPa] min.						Zugfestigkeit $R_m$ [MPa] min.						Biegefestigkeit $\sigma_{bW}$ [Mpa]	
	Sandguss			Kokillenguss			Sandguss			Kokillenguss			Sand. (wa)	Kok. (wa)
	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64		
AlSi6Cu4	1			1			60			75				
AlSi8Cu3	1			1			60			75			60 bis 90	
AlSi9Cu3	<1 (Druckguss)						89 (Druckguss)							
AlSi7Mg0,3		2		4	8		75			90	80		90 bis 100	
AlSi7Mg0,6		1		4	6		90			100	90		90 bis 100	110 bis 115
AlSi9Mg		2		4	6		75			90	80			
AlSi10Mg	2	1		2,5	1	2	50	75		55	90	80	70 bis 90	
AlSi10Mg(Cu)	1	1		1	1		50	75		55	80			
AlSi7MgCu0,5														
AlSi9MgCu0,5													80 bis 100	90 bis 100
AlSi9Cu2Mg														
AlSi12CuNiMg					<1						100		95 bis 105	100 bis 110



**Bild 14.8** Gießverfahren für Aluminium-Zylinderköpfe [121]

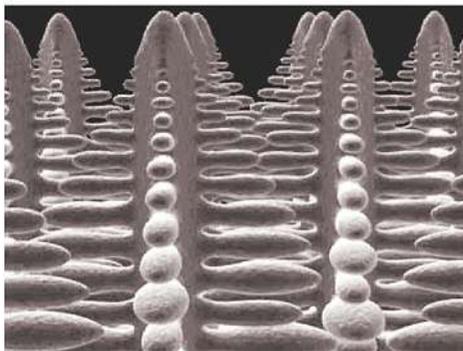
Als mögliche zukünftige Alternative zu Gießverfahren gibt es außerdem Entwicklungen, um Zylinderköpfe in additiven Fertigungsmethoden herzustellen. Dadurch gibt es unter anderem mehr Freiheiten bei der Gestaltung des Wassermantels oder der Ladungswechselkanäle, zudem kann erheblich Gewicht eingespart werden. In [124] wird die Fertigung eines additiv gefertigten Zylinderkopfs für einen Pkw-Ottomotor beschrieben.

## Qualitätsmerkmale

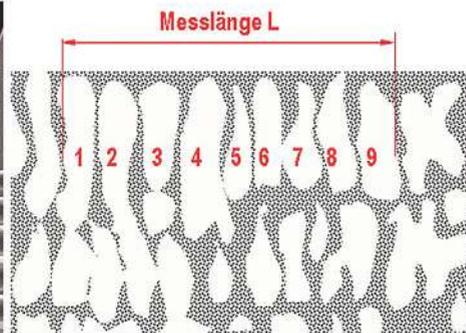
### Dendritenarmabstand:

Neben den einzelnen Legierungselementen sowie der Form und Verteilung des Siliziums und anderer Phasen hat die Feinheit des Gefüges entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Al-Si Werkstoffs. Deren Einfluss auf die TMF-Beständigkeit wurde auch schon in Bezug auf Schäden am Muldenrand von Dieselkolben beschrieben (Muldenrandumschmelzen, Abschnitt 5.4 und 3.3.3). Als Bewertungskriterium für die Gefügefinesse wird dabei üblicherweise der **Dendritenarmabstand (DAS)** verwendet, der Rückschlüsse auf die lokalen Erstarrungszeit Gussgefüge zulässt. Detaillierte Erläuterungen zur dendritischen Erstarrung von Al-Si-Legierungen beim Gießprozess und zur Bestimmung des Dendritenarmabstands finden sich z. B. unter [125] und [126]. Bild 14.10 zeigt den Aufbau eines Dendriten und den Abstand zwischen zwei Armen, der mit Dendritenarmabstand bezeichnet wird.

### Dendriten mit sekundären Dendritenarmen



### Bestimmung des Dendritenarmabstandes aus dem Schlibbild



**Bild 14.9** Dendriten mit sekundären Armen und Bestimmung des Armabstandes (DAS) [Bild: www.giessereilexikon.com]

Bild 14.10 zeigt den Einfluss des DAS auf die Zugfestigkeit, die Dehngrenze und die Bruchdehnung für eine Aluminiumgusslegierung.

Mit kleiner werdenden DAS-Werten lassen sich erhebliche Festigkeitssteigerungen erzielen. Neben den in Bild 14.10 dargestellten statischen Festigkeitswerten lässt sich durch Reduktion des DAS auch die Lebensdauer unter dynamischen Belastungen sowie die Thermoschockbeständigkeit steigern.

# Stichwortverzeichnis

## A

Abdichtfunktion 298  
 Abgasturboaufladung 18, 820  
 Abgasturbolader 159  
 Ablagerung 49  
 Abbott-Kurve 484  
 Abplatzen von Beschichtungen 509  
 Abrasivverschleiß 87, 133, 255, 339, 406  
 Abschaben von Ölkohle 303  
 Abschmelzung 230, 233, 234  
 Abstreifwirkung 303  
 Additive 144, 146  
 Adhäsion 507  
 Adhäsionsverschleiß 86  
 adhäsiver Verschleiß 86, 239  
 Adhäsivverschleiß 322  
 Alfinieren 213  
 AlSi-Legierung 69, 73, 473  
 Alterung des Motoröls 138  
 Aluminium-Silizium-Legierungen 175  
 Anpassungverschleiß 400, 403  
 Anreiber 243, 416, 418, 422, 424  
 APS-Verfahren 480  
 Arbeitsverfahrens 15  
 Aufbau des tribologischen Systems 317, 326, 581  
 Aufladung 18  
 Aufschmelzung 223  
 Auslagerungskurve 69  
 Auslegung 172  
 Auslegungsfehler 44  
 Auslegungsschäden 632  
 axiales Auswandern des Kolbenbolzens 281  
 Axiallager 376, 380, 389

## B

Balligkeiten 302  
 Beanspruchungsarten 61  
 Bearbeitungsfehler 44, 52  
 Bedienfehler 50  
 Bedplate 471

Belagsbildung 141  
 Belastung 162  
 Belt in Oil 565  
 Beschichtung 305, 479  
 Bestandsaufnahme 123  
 Betriebsfehler 44, 47, 48  
 Biegedauerbrüche 741  
 Bildung von Ölkohle 341  
 Blechmantelbildung 513, 514  
 Blow-By 158, 180, 306, 343  
 Bolzenbruch 278  
 Bolzenmontage 281, 284  
 Bolzenschub 281, 283  
 Bolzenverschleiß 293  
 Bore Polishing 497, 498, 500, 509  
 Borkenkäfer 393  
 Brandspurbildung 322  
 Brennverfahren 16, 166  
 Brüche 53  
 Brüche am Pleuel 358  
 Brüche an 3-tlg. Ölabstreifringen 313  
 Brüche der Brennraumdichtung 536  
 Brüche des Buchsenbundes 520  
 Bruchflächenanalyse 56  
 Bruchformen 59  
 Bruchmechanismus 56  
 Bruchoberfläche 67  
 Bruch und Verschleiß an Spann- und Führungsschienen 579  
 Bruchursachen 56  
 Bruchverlauf 61

## C

Chiptuning 47, 213, 218, 238, 635  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen 861  
 Cracken 354  
 cradle-to-grave 861

## D

Dauerfestigkeit 62  
 Debonding 210, 213, 331  
 Deep-Skirt-Design 471  
 defekter Injektor 236

- Dehngrenze 57  
Dehnungsbehinderung 72  
Dentridenarmabstand 625  
Desachsierung 171  
Dichtspaltschwingung 524, 537, 539,  
540  
Direkteinspritzer 17  
Dispergieren 133  
DLC 481  
DLC-Beschichtung 290  
DLC-Schichten 276, 305  
Downsizing-Ottomotoren 197  
Drainagebohrung 346  
Drehmoment an der Kurbelwelle 29  
Drehschwingungen 438, 457, 553, 572,  
603  
Drehschwingungsdämpfer 457  
Drei-Körper-Abrasion 87  
Drittkörper-Abrasiveverschleißes 406  
Druckseite 164  
Duktilität 58  
Duplexketten 558  
durchgebrannter Kolbenboden Ottomo-  
tor 228  
durchgebrannte Ventile 728
- E**  
effektive Leistung 33, 34  
effektive Mitteldruck 34  
effektive Wirkungsgrad 34  
E-Fuels 865  
EHD 582  
Eigenspannung 615, 616, 627  
Einbauspiel 170, 218  
eingelaufenen Nockenwelle 684  
Eingießen 213  
Einlauf 48  
Einlaufverschleiß 301  
Einlaufvorgang 403  
Einschnürbereich 58  
Elastohydrodynamik 79  
Elefantenhaut 192  
elektrochemische Korrosion 97  
Elementanalyse 143  
E-Modul 57  
Ermüdungsbruch 61  
erosionsartiger Materialabtrag 223  
Ethanol 152  
Extremklopfen 115  
Extremklopfereignisse 113, 313
- F**  
Ferrosil® 481  
Fertigung 174, 622  
Fertigungsfehler 44, 46, 213, 512  
Fertigungs- und Bearbeitungsfehler 509  
Festkörperreibung 77  
Feuersteg 167  
Flächenkorrosion 99  
Flankenbewehrung 306, 332  
Flankenverschleiß 325  
Flash 387  
Flüssigkeitsreibung 78  
Flüssigkeitsschlag 356  
Formbohrung 169, 220, 275  
Formfüllvermögen 300, 305  
Freilegeprozess 486  
Fremdkörper 267, 406  
Fremdstoffen 143  
Fressen 85, 291  
Fresser 239, 419, 497, 506, 507  
Fresserscheinungen 244  
Fressspuren 420  
Fretting 369, 372, 384, 429, 431
- G**  
Gaskraft 25, 163  
Gasmotoren 153  
Gegendruckseite 164  
Gelenkverschleiß 581  
Geräusche 578, 835  
Gewaltbruch 59  
Gießen 622  
Gießverfahren 622  
Gleitbruch 60  
Gleitschichtermüdung 394  
Glühzündungen 113, 119, 204, 223,  
232, 233, 238  
Graufleckigkeit 604  
Graugusswerkstoff 472  
Grenzreibung 78  
Grübchen 89, 583

- Grübchenbildung 604  
Grundöl 144  
Gussfehler 496, 626  
Gütegrad 35
- H**
- Haftungsprobleme 509  
Haftverschleiß 85  
Hart-Anodisieren 332  
Hauptlager 376, 389  
Hauptlagerstuhl 494  
Heißfahren 51  
Heißgaskorrosion 70, 103, 753  
Heißrisse 424, 447, 458  
Heißschlamm 140  
Heizkesseln 101  
Heizwert 34  
heterogene ZKG 477  
High-Cycle-Fatigue 62  
Hochdruckschleife 32  
Hochtemperaturkorrosion 70, 103, 192, 754, 812  
Hohlkehle 717  
Hohlventil 719, 720  
Honen 482, 512  
Honstruktur 499  
Honung 498  
Honverfahren 485  
Hookesche Gerade 57  
Hot Spots 117, 204  
HTHS-Viskosität 137  
Hubvolumen 13, 23  
Hülsenketten 557  
Hydrodynamik 78  
hydrodynamische Gleitlager 378  
hydrodynamische Reibung 78
- I**
- indizierten Mitteldruck 33  
innere Arbeit 32  
innere (indizierte) Leistung 33
- K**
- Kaltlaufnageln 119  
Kaltschlamm 140  
Kaltstart 49, 265  
Kaltstartfresser 49, 245, 246  
Kantenträgers 411  
Kavernenbildung 226  
Kavitation 97, 107, 426  
Kavitationserosion 107, 110, 426, 630, 516  
Kavitationskorrosion 111  
Kavitationsschädigung 427  
Kettenrasseln 575, 578  
Kettenspanner 559  
Kipphebel 691  
Klemmen / Stecken des Kolbenrings in der Ringnut 342  
Klemmpleuel 275  
Klingeln 113  
Klopfbetrieb 113, 233  
Klopfen 113, 223  
klopfende Verbrennung 112, 166  
Klopfestigkeit 114  
Klopfregelung 115, 313  
Klopfschäden 115, 223  
Klopfschädigung 226  
Kolben 161  
Kolbenbeschleunigung 22  
Kolbenboden 161, 166  
Kolbenbolzen 271  
Kolbenbolzenlager 376, 378  
Kolbenbolzennabe 169  
Kolbenbolzensicherung 271, 276  
Kolbenflächenleistung 166  
Kolbenform 169  
Kolbengeräusch 180  
Kolbengeschwindigkeit 22  
Kolbenkraft 24  
Kolbenkühlung 175, 177  
Kolbennabe 218, 281  
Kolbennormalkraft 28, 164, 168, 240, 490  
Kolbenringe 295  
Kolbenschaft 168  
Kolbenschaftbruch 214  
Kolbenschaftfresser 258  
Kolbenschaftfresser in 45°-Lage 263  
Kolbensekundärbewegung 171, 217, 240, 252  
Kolbenweg 21

Kompressionshöhe 172  
Kompressionsvolumen 13, 23  
Konstruktion 166  
Kopfrückfall 170  
Korrosion 96, 429, 629  
Korrosionsangriff 100, 429, 431  
Korrosionsmechanismus 96  
Korrosionsmulden 192  
Kräfte im Kurbeltrieb 24  
Kraftstoffeintrag 586  
Kraftstoffmasse pro Zeit 34  
Kraftstoffverdünnung 253  
Kriechen 70  
Kühlkanal 205  
Kühlkanalkolben 178, 205  
Kühlung 18, 134  
Kühlung des Zylinderkopfes 618  
Kurbeltrieb 21  
Kurbelwellenbruch 453  
Kurzzeitfestigkeit 62

**L**

Ladungswechselschleife 32  
Ladungszufuhr 18  
Lagerfestsitz 384  
Lagerfresser 416, 419, 422  
Lagermetall-Risse 398  
Lagerspiel 383  
Lagerspreizung 374  
Lagerstuhl 463  
Lagertraverse 471  
Lagerüberstand 384  
Längsstromkühlung 619  
Langzeitfestigkeit 62  
Laser-Cladding 789  
Lastfälle 62  
Laufbahntechnologie 476  
Laufbuchse 477  
Laufspiel 169  
LDS-Verfahren 480  
Leckagewege 530  
Leerlaufdrehzahl 42  
Leistungsdichte 6  
Leistungssteigerung 37  
Leiterrahmen 471, 495  
Literleistung 6

Lochfraß 99, 101  
Loch im Kolbenboden Dieselmotor 234  
Lochkorrosion 101, 629  
Longlife-Öle 154  
Low-Cycle-Fatigue 62  
Low Speed Pre Ignition 112  
LSPI 115, 116

**M**

Massenausgleich 441  
Massenkraft 26, 163  
Materialabtrag 241  
Materialermüdung 89  
Materialfehler 44, 45  
Materialübertrag 85  
Maulweite 297, 301, 311  
Maulweitenverlust 310, 311  
Mäusebiss 399  
Maximaldrehzahl 42  
mechanischer Wirkungsgrad 35  
Mega-Knock 115  
Metall-Elastomer-Zylinderkopfdichtungen 529  
Metalllagen-Zylinderkopfdichtungen 527  
Methanolgehalte 152  
Micro-Welding 328  
Mikrobrechen 88  
Mikroermüdung 88  
Mikrorisse 89  
Mikrospanen 88  
Mikroverschweißung 85, 323, 327, 419, 420, 422, 507  
Mindestklemmkraft 370  
Minutenringe 302  
Mischreibung 78  
mittlere Kolbengeschwindigkeit 23  
monolithische ZKG 476  
Montagefehler 44, 53, 315, 516  
Motordrehmoment 31  
Motorgeräusche 180, 285, 497, 699  
Motorkennfeld 40  
Motoröl 133  
Motorschaden 43  
Muldengrundriss 182, 186  
Muldenkorrosion 99

Muldenrandriss 72, 183, 191  
Muldenrandumschmelzen 74

## N

Nabenabstützung 169  
Nabenbruch 218  
Nachtropfen 121  
nagelnde Verbrennung 118  
Nasenminutenring 302  
Nassumpfschmierung 92  
Nikasil® 481  
Nockenfolger 653  
Nockenform 676  
Nulllast 41

## O

Oberflächenermüdung 582, 701  
Oberflächenzerrüttung 89  
Ölabstreifring 303  
Ölabstreifvermögen 335  
Ölalterung 138  
Ölasche 141  
Ölkohle 141, 155, 500  
Ölkohleablagerungen 230  
Ölkohleaufbau 509  
Ölkohlebildung 344  
Ölkreislaufs 92  
Öloxidation 424  
Ölpumpeffekte 325  
Ölslots 169  
Ölverbrauch 133, 142, 154, 296, 300,  
306, 325, 335, 343  
Ölverbrennung 364  
Ölversorgung 675  
Ölversorgung der Gleitlager 442  
Ovalitäten 170  
Oxideinschlüsse 213  
Oxidwurzeln 193

## P

Partikelunterleger am Lagerrücken 409  
Passungsrost 107, 431  
Pflastersteinbildung 192  
Phasenlage 71  
Pitting 89  
Plattenbildung 192

Pleuelbuchse 378, 387  
Pleuelkopf 348  
Pleuelkraft 28  
Pleuellager 376, 379, 388  
Pleuelschaft 364  
Pleuelschrauben 350, 353  
Pleuelverhältnis 23  
Pleuelverschraubung 369  
Preforms 479  
Produktfehler 44  
PTWA-Verfahren 480, 487  
Pumpgrenze 831  
p-V-Diagramm 32  
PVD-Verfahren 481

## Q

quasi-monolithische ZKG 479  
Querbewegung 164  
Querstromkühlung 619

## R

Rädertrieb 568, 575  
Rädertriebshämmern 572  
Radialkraft 29  
Rastlinien 64, 65, 184  
Rauigkeitskennwerte 483  
Reibkoeffizient 96  
Reibkorrosion 107  
Reibleistung 34, 300  
Reibmitteldruck 34  
Reiboxidation 70, 90, 339  
Reibrost 107  
Reibung 75, 77, 133  
Reibungsreduktion 151  
Reverse-Blow-By 158  
Reverse-Blow-By-Effekte 301  
Ringbruch 307, 332  
Ringfeld 168  
Ringflanken 297  
Ringflattern 300, 308, 310  
Ringhöhenspiel 307, 332  
Ringnutverschleiß 307, 325  
Ringpaket 296  
Ringstecken 343  
Ringstegbruch 116, 216  
Ringstegbrüche 197

- Ringträger 210, 235, 331  
Ringverformung 312  
Rissausbreitung 56, 63  
Rissausgang 183  
Riss der Steuerkette 587  
Riss des Zahnriemens 574  
Rollen 557  
Rollspuren 329  
Rückstände 142  
Rußpartikel 139
- S**
- Säurebelastung 140  
Schaden 43  
Schäden an Steuerketten 579  
Schäden an Zahnriemen 591  
Schadensanalyse 121  
Schadensbeschreibung 122  
Schadenshypothese 122, 123  
Schädigung 43  
Schaftabdichtung 155  
Schaftanbindung 214  
Schaftbelastung 215  
Scherstabilität 138  
Schichtabplatzer 340  
Schiebebetrieb 41  
Schlamm bildung 140  
Schlepphebel 691  
schmieren 133  
Schmierfilmdicke 382  
Schmierspuren 416, 417, 418  
Schmierung 75, 90, 133  
Schmierzahl 701  
Schrumpfen der Lagerschalen 421  
Schrumpfsitz 275  
Schubumluftventil 830  
schwimmenden Lagerung 275  
Schwingbruch 61  
Schwingstreifen 64  
Schwingungskavitation 107, 518  
Schwingungsreibverschleiß 107  
Schwingungsrissskorrosion 105, 629  
Schwungradflattern 437  
Sekundärrisse 196  
Sekundärverschleiß 316, 335  
Sekundärzündung 114  
Selbstentzündung 114  
Short-Skirt-Design 471  
Sicherungsring 281  
Sicherungsringnut 283  
Sickenbruch 540  
Spaltbruch 60, 218  
Spaltkorrosion 103  
Spannrollen 566  
Spannungsrissskorrosion 105, 629  
spezifische Lagerbelastung 382, 395  
spezifischen Kraftstoffverbrauch 37  
Spiegelbildung 497, 498  
Spielfresser 239, 245  
Spreizung 385  
Sputter-Lager 387  
Stahlkolben 174, 175, 191  
Stahlwerkstoffe 176  
Starthilfen 265  
Start-Stopp-Betrieb 50, 71  
Staubeintrag 255  
Staubschaden 320  
Stegbruch 539  
Stegkühlung 73, 620  
Stegriss 492  
Steuerkettenriss 587  
Steuerkettentriebe 574  
Steuertrieb 549  
Steuertriebsausführungen 574  
Steuerzeit 641  
Steuerzeitenverlust 663, 739  
Stirnradtrieb 568  
Stopfgrenze 832  
Stößelstange 690  
Stoßspiel 297, 301  
Streckgrenze 57  
Streckgrenzeneffekt 57  
Streckgrenzenverhältnis 58  
Stribeck-Kurve 80  
Strömungskavitation 107  
Synchronriementrieb 563
- T**
- Tangentialkraft 29, 300  
Tassenstößel 692

Tastschnittverfahren 483  
Teillast 41  
Temperaturgradienten 70  
thermischen Wirkungsgrad 35  
thermische Schäden 223  
thermische Spritzschichten 479  
thermisch gespritzten Zylinderlaufbahn 487  
thermo-mechanical fatigue 70  
thermomechanische Beanspruchung 71, 616  
thermomechanische Ermüdung 70, 166, 182, 614, 632  
Thermoschock 70  
Thermowechselrisse 72  
TMF 166  
TMF-Ermüdung 71  
Topring 297  
Torsionsdauerbruch 453, 457  
Tragbild 410, 414  
Tragbilder am Kolbenschaft 256  
Traghöhe 319  
Tragverhalten 256  
Trapezringe 303  
Tribokorrosion 107  
Tribologie 75  
tribologische Prüfkette 96  
tribologische Schäden an Kolben 239  
tribologisches System 76, 286, 401, 497  
Tribooxidation 90  
Trockenlauffresser 239, 243  
Trockensumpfschmierung 92  
Tulpenbildung 751

## U

Überdeckung 245  
überdreht 739  
Überdrehzahl 48  
Überdrehzahl-Schaden 48  
Überhitzungsfresser 239, 242, 424  
Überlastung 47  
Umlaufschmierung 92  
Umlenkrollen / Führungsrollen 565  
unkontrollierte Ölverbrennung 238  
Ursachen für Motorschäden 44

## V

Ventilaufsetzer 270  
Ventilbefestigung 745  
Ventilbetätigung 653  
Ventilbruch 577  
Ventilbrüche 737  
Ventildurchbrand 731  
Ventilerhebung 643  
Ventilfeder 648  
Ventilführung 779  
Ventilführungsspiel 785  
Ventilkühlung 719  
Ventilschaft 716  
Ventilschaftabdichtung 159, 780  
Ventilschaftende 717  
Ventilsitz 716  
Ventilsitzring 779  
Ventilsitzverschleiß 620  
Ventilsitzwinkel 784  
Ventilspiel 644, 655  
Ventilspielausgleich 655  
Ventilsteuerzeit 646  
Ventilteller 715  
Ventiltriebsdynamik 648  
Verbrennungsstörungen 111, 204, 218, 223, 233, 311, 313, 324  
Verdampfungsverlust 139  
Verdichtungsverhältnis 14, 35  
Verformungen von Kolbenringen 310  
Verkoken 318  
verkoktes Motoröl 424  
Versäuerung 139  
Versäuerung des Öls 101  
Verschleiß 75, 83, 133, 285  
Verschleiß am Kettenspanner 580  
Verschleißmechanismen 85  
Verschleiß und Anrisse der Kettenhülsen 585  
Verschleiß und Fressen der Nockenwellenlagerung 683  
Verschleiß und Fresser am Kolbenschaft 252  
verschlossene Steuerkette 583  
Verschraubung Zylinderkopf 494  
Verzundern 191

Verzunderung 191  
Viertakt-Verfahren 16  
Viskosität 134, 150  
Viskositätsanstieg 139  
Viskositätsindex 135  
Viskositätsverringern 138  
VI-Verbesserer 148  
Volllast 41  
Vorentflammung 112, 116, 204, 223, 313  
Vor- und Wirbelkammermotoren 195  
VTG-Ladern 855  
VTG-Turbolader 826

## W

Wabenbruch 60  
Wärmefluss 67  
Wärmestromdichte 68  
Wärmetauscher 101  
Wärmeübertragung 68  
Wartungsfehler 51  
Wartungsintervall 153  
Wassermantel 618  
Wasserschlag 50, 358, 631  
Wasserstoff 865  
Wastegate 826  
Weichstoff-Metalldichtungen 527  
well-to-wheel 860  
Werkstoff 174, 620  
Werkstoffeigenschaften 56  
Werkstofffehler 44, 278  
Wirkungsgradkette 34  
Wöhler-Versuch 62

## Z

Zahnflankenspiel 571, 603, 609  
Zahnkette 558  
Zahnrad 570  
Zahnriemen- oder Steuerkettenriss 578  
Zahnriemenriss 600  
Zahnriementrieb 563, 574  
Zapfenverlagerungsbahn 382  
Zerstörungsgrad 515  
zugesetzte Drainageöffnungen an Ölabstreifringen 345  
Zugfestigkeit 58  
Zugversuchen 56  
Zunderbeständigkeit 195  
Zwei-Körper-Abrasion 87, 405  
Zwei- oder Dreistofflagern 386  
Zweitaktmotor 16, 121  
Zwickelverschleiß 497, 502  
Zylinderdruckindizierung 25  
Zylinderkopfdichtung 523  
Zylinderkopfverschraubung 523  
Zylinderlaufbahn 465, 482, 497  
Zylinderlauffläche 497  
Zylindersteg 464  
Zylinderstegbereich 489, 492  
Zylinderstegrisse 494  
Zylinderverformung 528  
Zylinderverschleiß 497  
Zylinderverzug 500  
Zylinderzwickel 505