

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

Vorwort	v
Quickfinder Schadensteckbriefe	xix
1 Einleitung	1
2 Aufbau und Funktion von Motoren	11
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
3 Schaden	43
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
3.4	Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren	121
3.4.1	Durchführung Schadensanalyse	122
3.4.2	Fallbeispiel Schadensanalyse	125
3.4.2.1	Schadensanalyse Pkw-Ottomotor	125
4	Motoröl und Ölverbrauch	133
4.1	Motoröl	133
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
4.2	Ölverbrauch von Verbrennungsmotoren	154
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

5.1	Aufgaben und Aufbau	161
5.2	Belastungen	162
5.3	Konstruktion und Aufbau	166
5.4	Werkstoffe und Fertigung	174
5.5	Kolbenkühlung	177
5.6	Schäden an Kolben	179
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

6.1	Aufgaben	271
6.2	Belastungen	272
6.3	Aufbau und Konstruktion	273
6.4	Werkstoffe, Beschichtungen und Fertigung	276
6.5	Kolbenbolzensicherungen	276
6.6	Schäden am Kolbenbolzen, seiner Lagerung und axialen Sicherung	277
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

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

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
------------	----------------------------------	------------

9.2	Bezeichnungen & Ausführungsformen	377
9.3	Funktion	378
9.4	Belastungen und Anforderungen an Lager	378
9.5	Auslegung und Konstruktion	381
9.6	Lageraufbau, Werkstoffe und Fertigung	386
9.7	Schäden an Gleitlagern	390
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
10	Kurbelwelle	435
10.1	Aufbau und Aufgaben	435
10.2	Belastungen	436
10.3	Aufbau, Konstruktion und Ausführungen	439
10.4	Werkstoffe, Fertigung	444
10.5	Schäden an Kurbelwellen	447
10.5.1	Biegedauerbruch.....	450
10.5.2	Torsionsdauerbruch	453
10.5.3	Heißrisse auf dem Lagerzapfen.....	458
11	Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderlaufbahn	461
11.1	Aufbau und Aufgaben	461

11.2	Belastungen	462
11.3	Aufbau, Gestaltung und Konstruktion	466
11.4	Werkstoffe, Laufbahntechnologien und Fertigung	472
11.5	Bearbeitung der Zylinderlaufbahn durch Honen, Laufbahnoberflächen	482
11.6	Schäden am Zylinderkurbelgehäuse und an Zylindern	487
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**

12.1	Aufgaben	523
12.2	Belastungen	524
12.3	Anforderungen	525
12.4	Konstruktion, Aufbau und Ausführungen.....	526
12.5	Schäden an der Zylinderkopfdichtung.....	530
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
12.6	Schadensfolgen durch defekte Zylinderkopfdichtungen	547

13 Steuertrieb 549

13.1	Aufgaben	549
13.2	Anforderungen und Ausführungen	551
13.3	Belastungen	552
13.4	Ausführungen, Aufbau und Konstruktion.....	555
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
13.5	Schäden am Steuertrieb.....	577
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

14.1	Aufbau und Aufgaben	611
14.2	Bauarten / Einteilung	613
14.3	Belastungen	614
14.4	Konstruktion und Aufbau.....	617
14.5	Kühlung des Zylinderkopfes – Wassermantel	618
14.6	Werkstoffe und Fertigung	621
14.7	Schäden an Zylinderköpfen	628
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

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

15.5	Konstruktion und Ausführungen	653
15.6	Schäden am Ventiltrieb	663

16 Nockenwelle 669

16.1	Aufgaben, Aufbau und Funktion	669
16.2	Belastungen	672
16.3	Konstruktion	673
16.4	Fertigung und Werkstoffe	676
16.5	Schäden an Nockenwellen	678
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

17.1	Aufgaben	689
17.2	Ausführung, Aufbau und Funktion	690
17.3	Belastungen	693
17.4	Konstruktion	694
17.5	Fertigung und Werkstoffe	695
17.6	Schäden an Nockenfolgern	697
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

18.1	Aufgaben und Aufbau	712
18.2	Belastungen	712
18.3	Konstruktion und Ausführungsformen	715
18.4	Ventilkühlung	719
18.5	Werkstoffe und Fertigung	721
18.6	Schäden an Ventilen	727
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

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

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

20.1	Aufgaben	779
20.2	Aufbau und Funktion	780
20.3	Belastungen	782
20.4	Konstruktion	784
20.5	Fertigung und Werkstoffe	786
20.6	Schäden am Ventilsitz, an der Ventilführung und an Ventilschaftabdichtungen	790
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

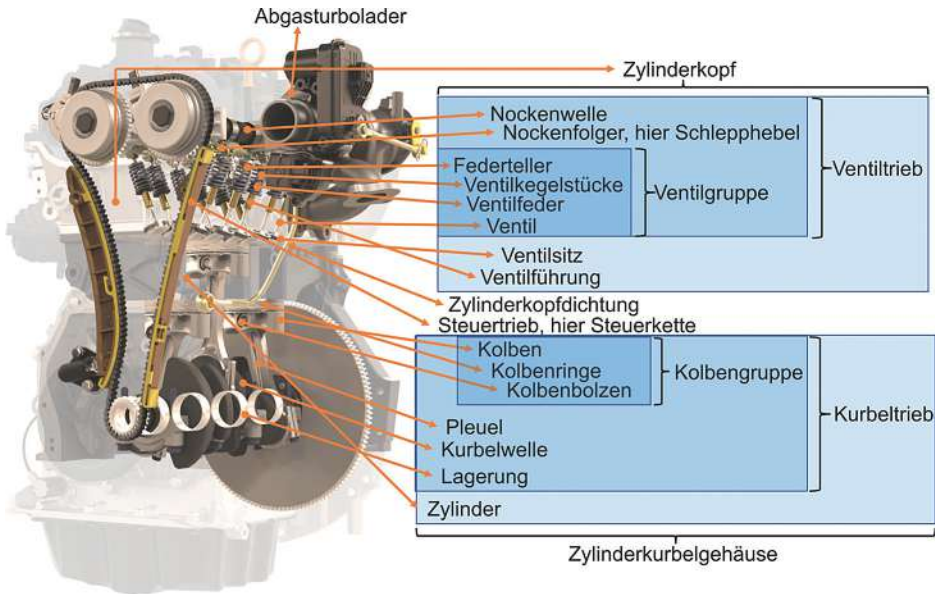
21.1	Aufbau und Grundfunktion	820
21.2	Belastungen	824

21.3	Ausführungen & Funktionen	825
21.4	Betriebsverhalten und Betriebsgrenzen des Turboladers.....	830
21.5	Werkstoffe & Fertigung	832
21.6	Schäden an Turboladern	833
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

22	Ausblick	859
-----------	-----------------------	------------

Quellenverzeichnis	869
Formelverzeichnis	879
Stichwortverzeichnis	885

Quickfinder Schadensteckbriefe



	Schaden	Steckbrief	Seite
Kolben	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
Kolbenbolzen	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
Kolbenring	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

Pleuel	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
Lager	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer»	9.1	394
	Ermüdung / Dauerbruch des Lagermetalls	9.2	396
	Einlaufverschleiß / Anpassungverschleiß	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
Kurbel- welle	Biegedauerbruch Kurbelwelle	10.1	451
	Torsionsbruch Kurbelwelle	10.2	454
	Heißrisse Kurbelwelle	10.3	458
Zylinder- kurbelge- häuse & Zylinder- laufbahn	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

Zylinderkopfdichtung	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
Steuertrieb	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
Zylinderkopf	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums	14.1	633
	Risse des Zylinderkopfs in brennraumfernen Bereichen	14.2	637
Nockenwelle	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen	16.1	681
	Verschleiß der Nockenwellenlagerung	16.2	683
	Fressen der Nockenwellenlagerung	16.3	683
Nockenfolger	Verschleiß – Nockenwelle / Nockenfolger	17.1	701
	Verschleiß Nockenfolger / oberes Ventilende	17.2	707
Ventil	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

Ventilfeder, Ventilkegelstücke, Federteller	Bruch der Ventildfeder	19.1	770
	Setzen / Erlahmen der Ventildfeder	19.2	775
Ventilsitz, Ventilführung, Ventilschaftabdichtung	Ventilführungs-/ Ventilschaftverschleiß	20.1	793
	Ventilführungsresser	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
Abgasturbolader	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

Vorwort	v
Quickfinder Schadensteckbriefe	xix
1 Einleitung	1
2 Aufbau und Funktion von Motoren	11
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
3 Schaden	43
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
3.4	Schadensanalyse an Verbrennungsmotoren	121
3.4.1	Durchführung Schadensanalyse	122
3.4.2	Fallbeispiel Schadensanalyse	125
3.4.2.1	Schadensanalyse Pkw-Ottomotor	125
4	Motoröl und Ölverbrauch	133
4.1	Motoröl	133
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
4.2	Ölverbrauch von Verbrennungsmotoren	154
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

5.1	Aufgaben und Aufbau	161
5.2	Belastungen	162
5.3	Konstruktion und Aufbau	166
5.4	Werkstoffe und Fertigung	174
5.5	Kolbenkühlung	177
5.6	Schäden an Kolben	179
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

6.1	Aufgaben	271
6.2	Belastungen	272
6.3	Aufbau und Konstruktion	273
6.4	Werkstoffe, Beschichtungen und Fertigung	276
6.5	Kolbenbolzensicherungen	276
6.6	Schäden am Kolbenbolzen, seiner Lagerung und axialen Sicherung	277
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

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

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

9.2	Bezeichnungen & Ausführungsformen	377
9.3	Funktion	378
9.4	Belastungen und Anforderungen an Lager	378
9.5	Auslegung und Konstruktion	381
9.6	Lageraufbau, Werkstoffe und Fertigung	386
9.7	Schäden an Gleitlagern	390
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
10	Kurbelwelle	435
10.1	Aufbau und Aufgaben	435
10.2	Belastungen	436
10.3	Aufbau, Konstruktion und Ausführungen	439
10.4	Werkstoffe, Fertigung	444
10.5	Schäden an Kurbelwellen	447
10.5.1	Biegedauerbruch.....	450
10.5.2	Torsionsdauerbruch	453
10.5.3	Heißrisse auf dem Lagerzapfen.....	458
11	Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderlaufbahn	461
11.1	Aufbau und Aufgaben	461

11.2	Belastungen	462
11.3	Aufbau, Gestaltung und Konstruktion	466
11.4	Werkstoffe, Laufbahntechnologien und Fertigung	472
11.5	Bearbeitung der Zylinderlaufbahn durch Honen, Laufbahnoberflächen	482
11.6	Schäden am Zylinderkurbelgehäuse und an Zylindern	487
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**

12.1	Aufgaben	523
12.2	Belastungen	524
12.3	Anforderungen	525
12.4	Konstruktion, Aufbau und Ausführungen.....	526
12.5	Schäden an der Zylinderkopfdichtung.....	530
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
12.6	Schadensfolgen durch defekte Zylinderkopfdichtungen	547

13 Steuertrieb 549

13.1	Aufgaben	549
13.2	Anforderungen und Ausführungen	551
13.3	Belastungen	552
13.4	Ausführungen, Aufbau und Konstruktion.....	555
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
13.5	Schäden am Steuertrieb.....	577
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

14.1	Aufbau und Aufgaben	611
14.2	Bauarten / Einteilung	613
14.3	Belastungen	614
14.4	Konstruktion und Aufbau.....	617
14.5	Kühlung des Zylinderkopfes – Wassermantel	618
14.6	Werkstoffe und Fertigung	621
14.7	Schäden an Zylinderköpfen	628
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

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

15.5	Konstruktion und Ausführungen	653
15.6	Schäden am Ventiltrieb	663

16 Nockenwelle **669**

16.1	Aufgaben, Aufbau und Funktion	669
16.2	Belastungen	672
16.3	Konstruktion	673
16.4	Fertigung und Werkstoffe	676
16.5	Schäden an Nockenwellen	678
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**

17.1	Aufgaben	689
17.2	Ausführung, Aufbau und Funktion	690
17.3	Belastungen	693
17.4	Konstruktion	694
17.5	Fertigung und Werkstoffe	695
17.6	Schäden an Nockenfolgern	697
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**

18.1	Aufgaben und Aufbau	712
18.2	Belastungen	712
18.3	Konstruktion und Ausführungsformen	715
18.4	Ventilkühlung	719
18.5	Werkstoffe und Fertigung	721
18.6	Schäden an Ventilen	727
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

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

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

20.1	Aufgaben	779
20.2	Aufbau und Funktion	780
20.3	Belastungen	782
20.4	Konstruktion	784
20.5	Fertigung und Werkstoffe	786
20.6	Schäden am Ventilsitz, an der Ventilführung und an Ventilschaftabdichtungen	790
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

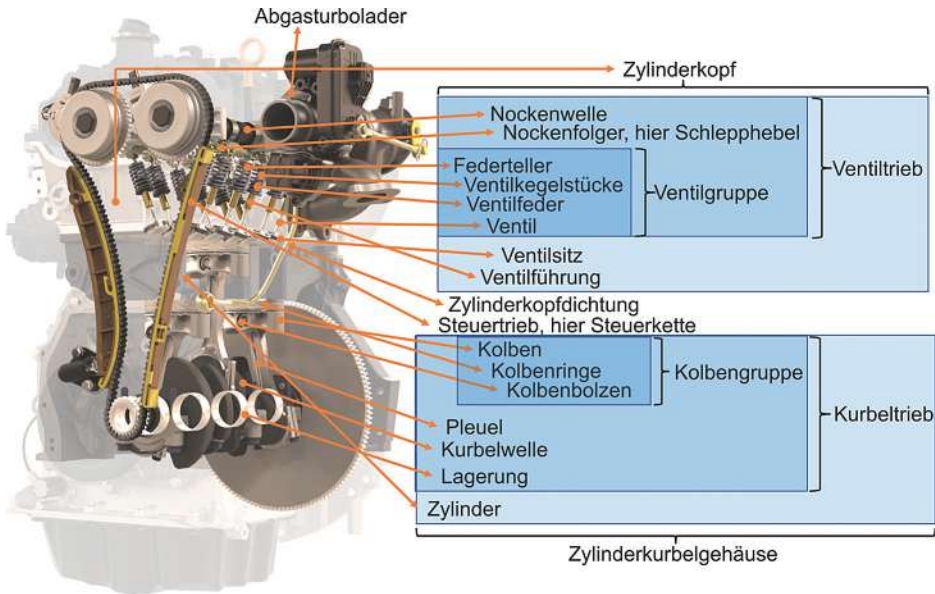
21.1	Aufbau und Grundfunktion	820
21.2	Belastungen	824

21.3	Ausführungen & Funktionen	825
21.4	Betriebsverhalten und Betriebsgrenzen des Turboladers.....	830
21.5	Werkstoffe & Fertigung	832
21.6	Schäden an Turboladern	833
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

22	Ausblick	859
-----------	-----------------------	------------

Quellenverzeichnis	869
Formelverzeichnis	879
Stichwortverzeichnis	885

Quickfinder Schadensteckbriefe



	Schaden	Steckbrief	Seite
Kolben	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
Kolbenbolzen	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
Kolbenring	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

Pleuel	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
Lager	Ermüdung der Gleitschicht / «Borkenkäfer»	9.1	394
	Ermüdung / Dauerbruch des Lagermetalls	9.2	396
	Einlaufverschleiß / Anpassungverschleiß	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
Kurbel- welle	Biegedauerbruch Kurbelwelle	10.1	451
	Torsionsbruch Kurbelwelle	10.2	454
	Heißrisse Kurbelwelle	10.3	458
Zylinder- kurbelge- häuse & Zylinder- laufbahn	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

Zylinderkopfdichtung	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
Steuertrieb	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
Zylinderkopf	Risse des Zylinderkopfs im Bereich des Brennraums	14.1	633
	Risse des Zylinderkopfs in brennraumfernen Bereichen	14.2	637
Nockenwelle	Lösen / Verdrehen des Nockens bei gebauten Nockenwellen	16.1	681
	Verschleiß der Nockenwellenlagerung	16.2	683
	Fressen der Nockenwellenlagerung	16.3	683
Nockenfolger	Verschleiß – Nockenwelle / Nockenfolger	17.1	701
	Verschleiß Nockenfolger / oberes Ventilende	17.2	707
Ventil	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

Ventilfeder, Ventilkegelstücke, Federteller	Bruch der Ventildfeder	19.1	770
	Setzen / Erlahmen der Ventildfeder	19.2	775
Ventilsitz, Ventilführung, Ventilschaftabdichtung	Ventilführungs-/ Ventilschaftverschleiß	20.1	793
	Ventilführungsresser	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
Abgasturbolader	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

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.

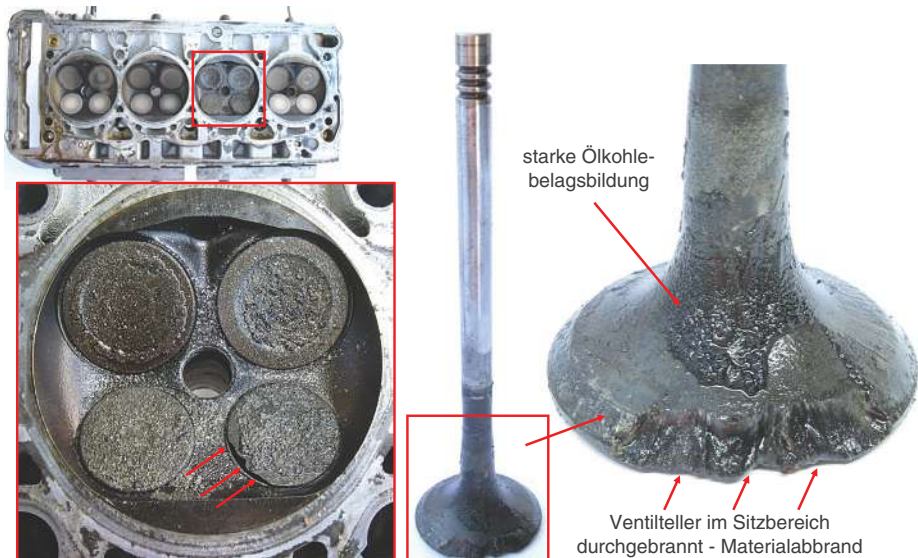


Bild 3.84 Durchgebranntes Auslassventil 6 am Schadenszylinder 3
[Bild: Motorenakademie Wild]

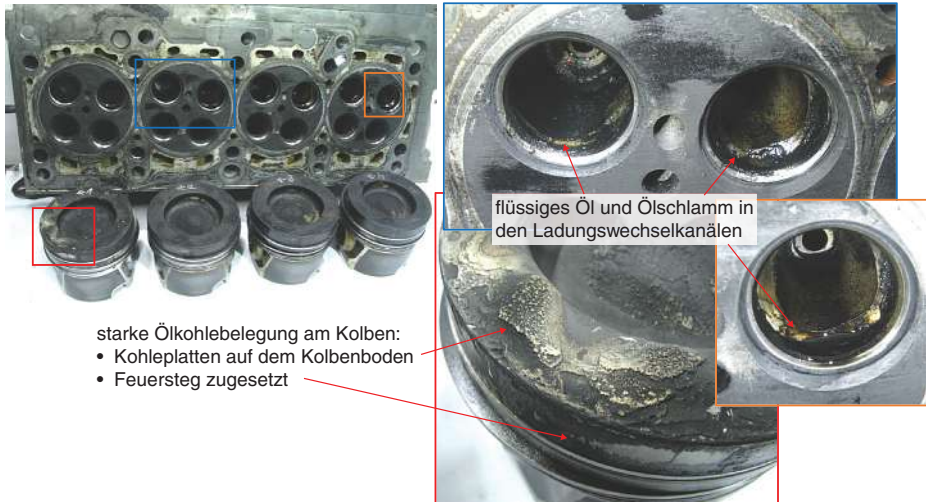
Wie bereits beschrieben, ist der primäre Schadensmechanismus, das Abschmelzen des Kolbens und das Durchbrennen des Auslassventils, auf eine thermische Überlastung zurückzuführen. Dazu können Störungen bei der Wärmeabfuhr brennraumbegrenzten Bauteilen oder eine Steigerung der Wärmezufuhr führen. Die zentrale 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 Ölkohlebelegung an Kolben und Ventilen der Nachbarzylinder zum Hauptschaden [Bild: Motorenakademie Wild]



starke Ölkohlebelegung am Pleuellenschlitz:

- Kohleplatten auf dem Pleuellenschlitzboden
- Pleuellenschlitz zugeseigt

flüssiges Öl und Ölschlamm in den Pleuellenschlitzkanälen

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

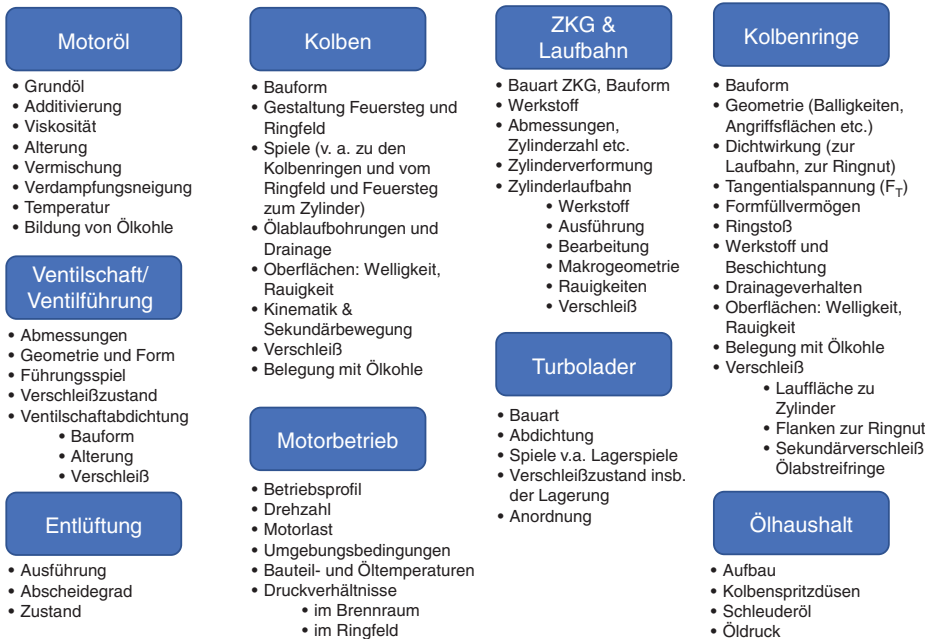


Bild 4.19 Einflussgrößen Ölverbrauch [Bild: Motorenakademie Wild]

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.

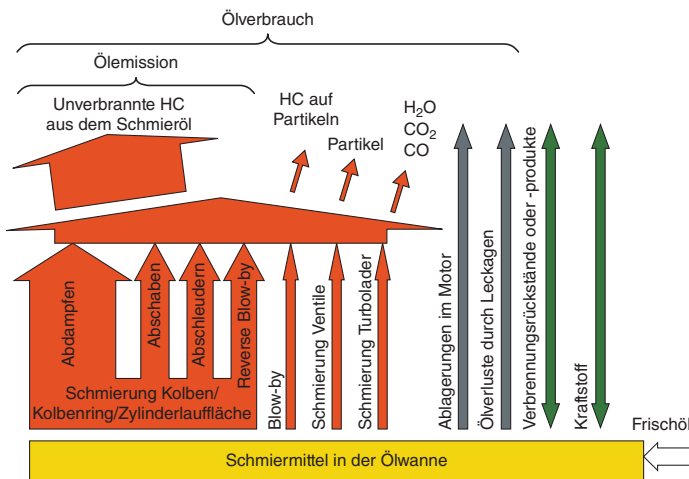


Bild 4.20 Bilanz des Motoröls im Verbrennungsmotor [62]

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.

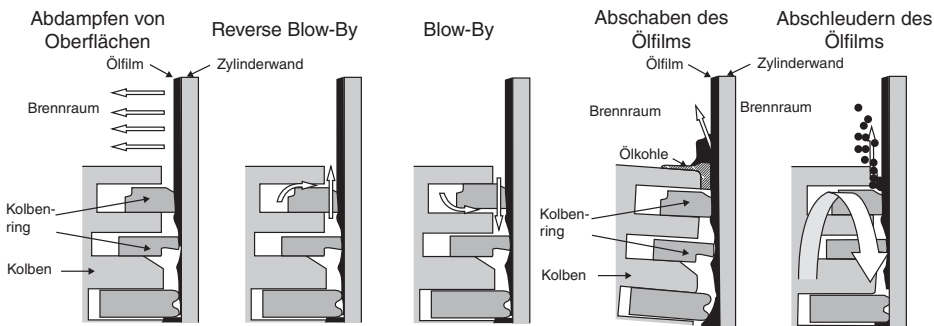


Bild 4.21 Ölverbrauchsmechanismen durch Strömung und Kolbenbewegung [63]

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 Motorenlüftung, 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 σ_{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

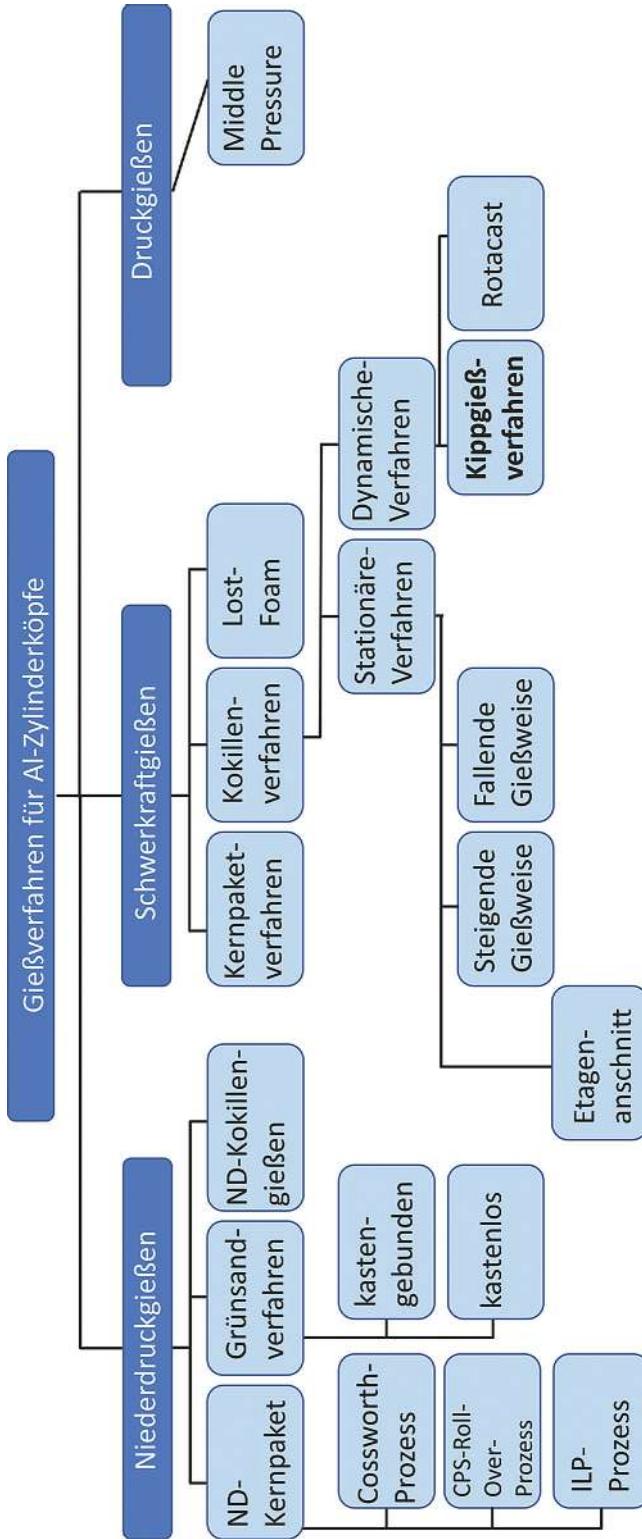


Bild 14.8 Gießverfahren für Aluminium-Zylinderköpfe [121]

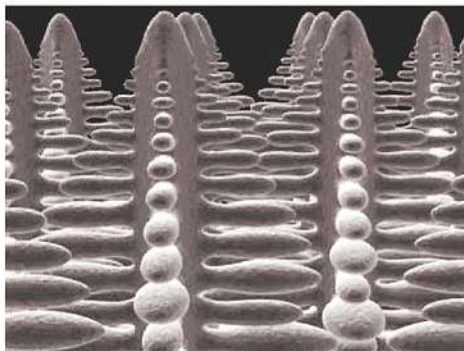
Als mögliche zukünftige Alternative zu Gießverfahren gibt es außerdem Entwicklungen, um Zylinderköpfe in additiven Fertigungsmethoden herzustellen. Dadurch gibt es unter anderem mehr Freiheiten bei der Gestaltung des Wassermantels oder der Ladungswechselkanäle, zudem kann erheblich Gewicht eingespart 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

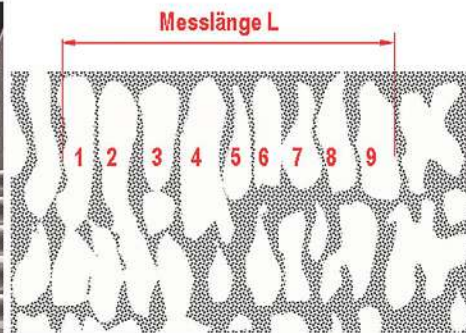


Bild 14.9 Dendriten mit sekundären Armen und Bestimmung des Armabstandes (DAS) [Bild: www.giessereilexikon.com]

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
 CO₂-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 Ottomotor 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
Öalterung 138
Ölasche 141
Ölkohle 141, 155, 500
Ölkohleablagerungen 230
Ölkohleaufbau 509
Ölkohlebildung 344
Ökreislaufs 92
Öoxidation 424
Öpumpeffekte 325
Öslots 169
Överbrauch 133, 142, 154, 296, 300,
306, 325, 335, 343
Överbrennung 364
Översorgung 675
Översorgung 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
Rädertriebhämmern 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
Schubluftventil 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
verschlissene 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