

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
	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 / Ventildführung / 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 Kolbenoden – Muldenrand- und Muldengrundrisse an Alu-Kolben für direkteinspritzende Dieselmotoren	182
5.6.1.1.2	Risse und Brüche am Kolbenoden – Muldenrandrisse Stahlkolben + Verzunderung.....	191
5.6.1.1.3	Risse und Brüche am Kolbenoden – 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, Klopfeschäden.....	223
5.6.2.1	Erosionsartiger Materialabtrag am Kolben – Klopfeschäden 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. Ölabbstreifringen, Einfedern in Drainagebohrungen.....	313
7.6.2	Tribologische Schäden – Verschleiß an Kolbenringen und Ringnuten, Sekundärverschleiß an Ölabbstreifringen	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 Ölabbstreifringen	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 Ölabbstreifringen.....	345
	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 Zylinderlaufbahn	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

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

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	Ventilfeder, 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 Ventilfedern und Federtellern.....	768
19.6.1	Bruch der Ventilfeder	770
19.6.2	Setzen / Erlahmen der Ventilfeder.....	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