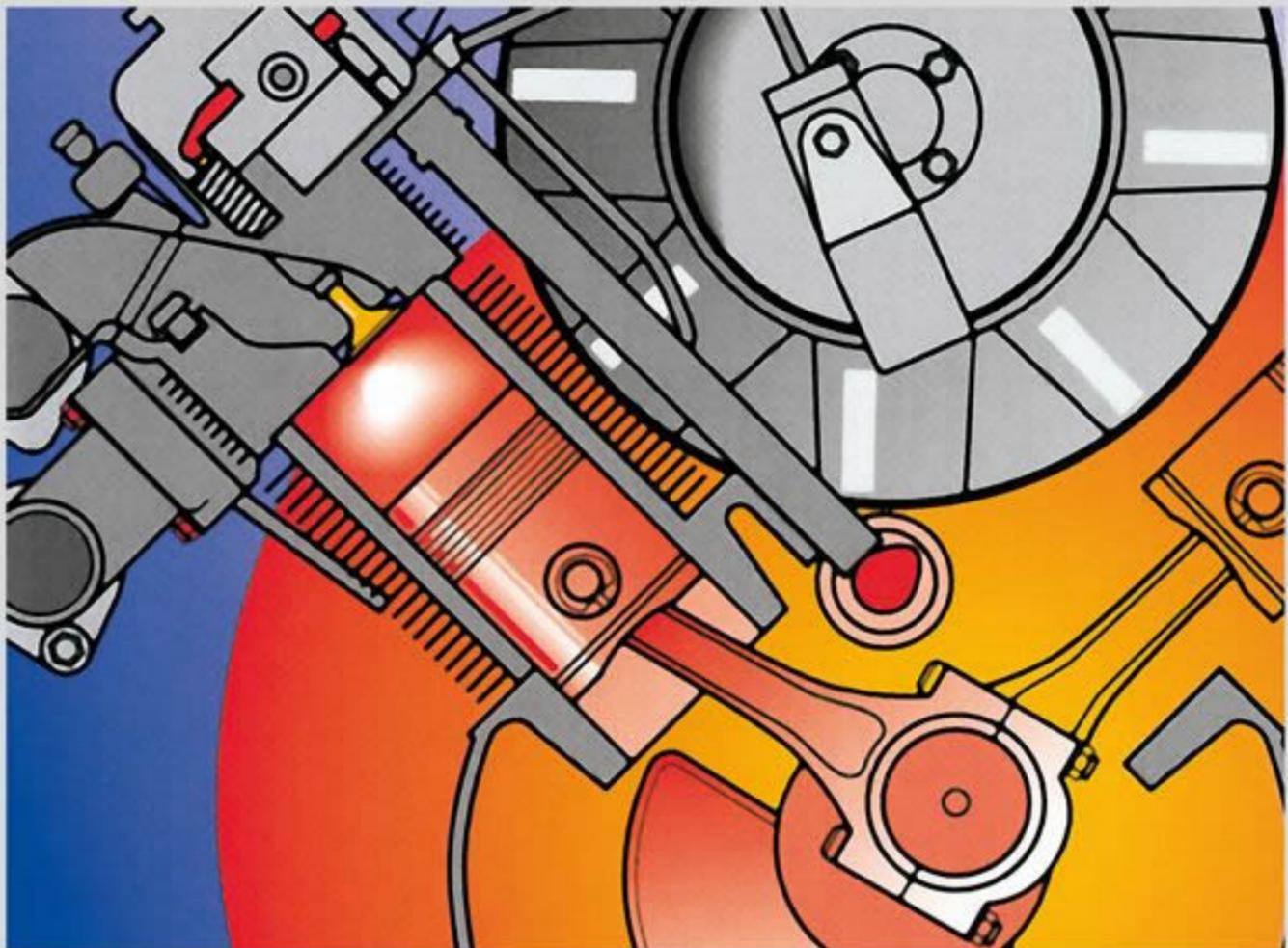


Vogel Fachbuch

Greuter / Zima / Hoffmann

Motorschäden

Schäden an Verbrennungsmotoren
und deren Ursachen



Ing. Ernst Greuter
Prof. Dr.-Ing. Stefan Zima
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hoffmann

Motorschäden

Schäden an Verbrennungsmotoren
und deren Ursachen

4., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

Prof. Dr.-Ing. habil. **WERNER HOFFMANN**

Jahrgang 1947, absolvierte ein Studium der Kraftfahrzeugtechnik an der TU-Dresden und kam als Konstrukteur zum Motorradwerk Zschopau. Anschließend mit Promotion A war er Assistent und wiss. Oberassistent im Wissenschaftsbereich Motoren der Ingenieurhochschule Zwickau. Es folgte ein Studienaufenthalt am MADI in Moskau. Tätigkeiten als Versuchsingenieur, Promotion B und Habilitation schlossen sich an. **WERNER HOFFMANN** war anschließend Konstrukteur und Gruppenleiter bei der IAV Motor GmbH in Chemnitz. Es folgte eine Auslandstätigkeit bei einem global operierenden Automobilhersteller in Spanien. Seit 1999 ist **WERNER HOFFMANN** Professor für Kraftfahrzeugtechnik / Verbrennungsmotoren an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Er ist zuständig für Lehre und Forschung auf dem Gebiet Verbrennungsmotoren.

Ing. **ERNST GREUTER**

Jahrgang 1922, gründete nach dem Ingenieurstudium u.a. Filialen des väterlichen Unternehmens, Motoren-Greuter Motoren-Instandsetzungswerk Saarbrücken, im In- und Ausland. Zuletzt war er hauptsächlich Sachverständiger für Verbrennungsmotoren (Benzin- und Dieselmotoren) im firmeneigenen Ingenieurbüro. **ERNST GREUTER** war 1993 Verfasser des Buches Motorschäden. Er verstarb 1995.

Prof. Dr.-Ing. **STEFAN ZIMA**

Jahrgang 1938, war nach seiner Ausbildung zum Ingenieur auf mehreren Schiffen der Handelsmarine und ab 1968 im Entwicklungsbereich der Maybach Mercedes-Benz Motorenbau GmbH (heute: MTU-Friedrichshafen GmbH) tätig. Er bekam 1977 den Ruf an die Fachhochschule Gießen-Friedberg, erhielt 1979 seine Ernennung zum Professor und promovierte 1985 zum Dr.-Ing. an der TU Berlin. Nach dem Tod von **ERNST GREUTER** übernahm er die Betreuung des Buches Motorschäden und überarbeitete es in der 2. Auflage völlig. **STEFAN ZIMA** verstarb 2004.

Weitere Informationen:

www.vogel-buchverlag.de

Kontaktaufnahme:

motorschaeden@vogel-buchverlag.de

ISBN 987-3-8343-3193-9

4. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt. Die Autoren haften nicht für evtl. fehlgegangene Motorinstandsetzungen oder sonstige Ereignisse, die, von welcher Seite auch immer, mit den im Buch enthaltenen Ausführungen in Verbindung gebracht werden. Hinweise und Vorschläge zur Verbesserung des Buches werden von Verlag und Autoren jederzeit gern entgegengenommen.

Printed in Germany

Copyright 1994 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG,
Würzburg

Umschlaggrafik: Michael M. Kappenstein, Frankfurt/M.

Vorwort zur 4. Auflage

Der große Anklang, den das Buch auch in der 3. Auflage gefunden hat, ist Beleg für die Aktualität der Problematik Motorschäden. Und das trotz aller Weiterentwicklung und zweifellos großer Erfolge bei der Betriebssicherheit und Wartungsarmut der modernen Verbrennungsmotoren.

Mit der Neuauflage soll schwerpunktgemäß eine gewisse Erweiterung des Umfangs um bislang noch nicht behandelte Bauteile und Schadenfälle erfolgen, wie z.B. Zündung beim Ottomotor, Schwingungsdämpfer, Schwungrad und Kupplung, um eine entsprechende Abrundung des dargebotenen Inhalts zu erreichen. Darüber hinaus werden Schadenfälle mehr als bisher unter den Gesichtspunkten von Arbeitsverfahren und Motormechnik betrachtet. Arbeitsverfahren und Motormechnik bedingen einander und müssen stets im Zusammenhang bei der Schadenanalyse gesehen werden. Deshalb erfolgt auch eine Neugliederung der Schwerpunkte im Kapitel 6 entsprechend den bestehenden strukturell funktionellen Zusammenhängen, die sich aus dem Stoff- und Energiefluss der Motoren ableiten. Die bestehenden Schadensschwerpunkte lassen sich gut am Umfang der jeweiligen Abschnitte ablesen.

Es sei an dieser Stelle den Firmen für die Unterstützung mit ergänzenden Unterlagen und Bildmaterial für die neue Auflage gedankt. Zu nennen sind
Robert Bosch AG,
ZF Services GmbH,
IWIS Motorsysteme GmbH,
ContiTech Antriebssysteme GmbH,
Federal-Mogul Sealing Systems GmbH und Payen.

Dem Verlag ist zu danken für die sorgfältige und gute Ausstattung des Werkes.

Über den Internet-Service des Verlages findet der Leser u. a. Zugang zu einem Technischen Fachwörterverzeichnis Deutsch – Englisch – Französisch für das Fachgebiet Verbrennungsmotoren und zu einer Geräusch-Demo *Klopfen* zum Herunterladen für den persönlichen Gebrauch.

Zwickau

Werner Hoffmann

Vorwort zur 3. Auflage

Nachdem auch die 2. Auflage der «Motorschäden» vergriffen ist – Indiz für die unveränderte Aktualität dieses Themas –, wurde eine weitere Auflage notwendig. Da die Autoren der 1. und 2. Auflage, Ing. ERNST GREUTER und Prof. Dr.-Ing. STEFAN ZIMA verstorben sind, hat mich der Vogel Buchverlag gebeten, die Neuauflage zu überarbeiten. Diesem Wunsch bin ich gern nachgekommen.

Motorschäden halten sich heutzutage in Grenzen, da Motoren mit der Zeit immer zuverlässiger und langlebiger geworden sind. Hier geht es um Schadenursachen und wie Abhilfe geschaffen werden kann. Alle, die mit Motorschäden zu tun haben, in Motorbetrieben, Werkstätten, Reparaturwerken, Werften, Ingenieurbüros, Versicherungen, Technischen Überwachungsvereinen, in Entwicklungsabteilungen der Hersteller von Motorteilen und Motoren, bekommen einen Überblick der möglichen Schäden, deren Hintergründe und deren Ursachen. Aber auch dem «reinen» Theoretiker ist die Beschäftigung mit Motorschäden von Nutzen.

Motorschäden sind das Ergebnis vielschichtiger, miteinander verbundener und voneinander abhängiger Umstände, Einflüsse und Bedingungen. Um sie richtig zu deuten und daraus auf Ursache und Abhilfe zu schließen, ist es notwendig zu wissen, wie ein Motorteil aufgebaut ist, wie es funktioniert und wie es in seiner Funktion von anderen Teilen abhängt bzw. wiederum andere Bauteile beeinflusst. Deshalb sind Aufbau und Funktion der wichtigsten Motorbauteile mit den für die Schadenentwicklung relevanten physikalischen und technischen Funktionsweisen erläutert. Nur wenn eine Vorstellung davon besteht, was sich im Motor abspielt und unter welchen Bedingungen Motoren arbeiten, sind mögliche Schwierigkeiten und Schäden zu verstehen.

Gedanklich lassen sich Schäden an Maschinenteilen in eine Matrix aus Ursachen und Erscheinungsformen einordnen. Dabei wird offenbar, dass sowohl an unterschiedlichen Motorteilen die gleichen Schadenarten als auch am selben Teil ganz unterschiedliche Schäden auftreten können. Ebenso kann derselbe Schadentyp eine Reihe von Ursachen haben, wie dieselbe Ursache mehrere Schäden hervorrufen kann. Um einen besseren Überblick zu gewinnen, wurden daher die wichtigsten Schadenmechanismen zusammengestellt. Dem schließen sich typische Schäden von Funktionsgruppen und Bauteilen an, wobei auch spezielle Beispiele vermittelt werden, die wegen des Schadenherganges oder wegen des Schadenbildes lehrreich sind.

Das Bildmaterial ist von unterschiedlicher Güte. Schadenteile sind oft kontrastarm, die Farbskala erstreckt sich meist zwischen Hellgrau bis Tiefschwarz, und häufig werden Schadenbilder vor Ort bei ungünstiger Beleuchtung von fotografischen Laien angefertigt. Andererseits ist die Qualität der in Untersuchungslabors aufgenommenen Fotos oft ausgezeichnet. Für eine Anzahl von Bildern ist keine Quelle angegeben, um die gebotene Anonymität zu wahren. Im Anhang existiert ein Verzeichnis für weiter-

führende Literatur, das das umfangreiche Gebiet der Motorschäden berücksichtigt. Aufgeführt sind Schäden an Kfz-Motoren und an Motoren für allgemeine Verwendungen (Antriebe von schweren Nutz- und Schienenfahrzeugen, Stromerzeugern, Arbeitsmaschinen sowie Schiffsmotoren).

Grundlage der Ausführungen sind Erfahrungen aus der Praxis. Deshalb haben sich meine beiden Vorgänger auf entsprechende Unterlagen und Veröffentlichungen gestützt. Nachfolgend genannte Firmen bzw. Institutionen und deren Mitarbeiter, denen auch ich meinen Dank aussprechen möchte, haben mit Informationen und mit Schadteilen sowie Unterlagen zu diesem Buch beigetragen.

ABB Turbosystems	Joh. Winklhofer & Söhne GmbH u. Co. KG
ADAC e.V.	Klaver Engines and Engineering (Holland)
3K Warner Turbosystems GmbH	Kolben Seeger
(vormals: Aktiengesellschaft Kühnle, Kopp & Kausch)	Kolbenschmidt AG
Allianz-Zentrum für Technik GmbH	Mahle GmbH
Behr Industrietechnik GmbH	MaK Maschinenbau GmbH
Beru Aktiengesellschaft	MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft, Werk Nürnberg
ContiTech Antriebssysteme GmbH	Maschinenfabrik Alfing Kessler GmbH
Cummins Diesel Deutschland GmbH	Miba AG
DaimlerChrysler AG	Motoren- und Turbinen-Union Friedrichs- hafen GmbH
Datec Scherdel	TRW Deutschland GmbH
Deutz AG	Zahnradfabrik Friedrichshafen AG
Filterwerk Mann & Hummel GmbH	Zeppelin Baumaschinen GmbH
Glyco-Metallwerke	Zollern BHW Gleitlager GmbH & Co.
Ingenieur-Büro Eckert Fischer Sahn & Partner	

Ebenso danke ich den Studenten der FH Gießen-Friedberg für ihr interessantes, akribisch gesammeltes Schadenmaterial.

Dem Vogel Buchverlag gebührt mein Dank für die sorgfältige und gute Ausstattung des Buches.

Zwickau

Werner Hoffmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	13
2 Der Motor	19
2.1 Wesentliche Eigenschaften und Besonderheiten	19
2.2 Betriebsbedingungen	21
2.2.1 Motorkonzeptionen	21
2.2.2 Motorleistung und Leistungsreduktion	26
2.3 Betriebseigenschaften von Motoren	31
3 Schaden: Definitionen, Begriffe	53
4 Ursachen von Schäden	59
4.1 Abnutzung	59
4.2 Technische Mängel (Produktfehler)	61
4.2.1 Auslegungsfehler (Planungsfehler)	61
4.2.2 Werkstofffehler	63
4.2.3 Herstellungsfehler	64
4.3 Betriebsfehler	64
4.3.1 Überlastung	64
4.3.2 Veränderungen der Betriebsbedingungen	65
4.3.3 Bedienungsfehler	66
4.4 Der Mensch als Schadenverursacher	70
5 Schadenerklärung	73
5.1 Schadenart	73
5.1.1 Schäden durch mechanische Beanspruchung	73
5.1.2 Gewaltbrüche	75
5.1.3 Schwingbrüche	77
5.1.4 Schäden durch thermische Beanspruchung	81
5.1.5 Schäden durch Korrosion in wässrigen Medien	85
5.1.6 Schäden durch tribologische Beanspruchung	87
5.2 Schadenanalyse	97
5.2.1 Besichtigung vor Ort	97
5.2.2 Sicherung der Schachteile	97
5.2.3 Ermittlung der schadenrelevanten Daten der Maschinenanlage	98
5.2.4 Schadenhergang	98
5.2.5 Genaue Beschreibung des Schadens	100

6	Motorschäden	103
6.1	Überblick	103
6.2	Grundsätzlicher Aufbau und Funktion von Verbrennungsmotoren	112
6.3	Schadenfälle an Komponenten und Bauteilen – Schadenanalyse	130
6.3.1	Kühlsystem und Motorkühlung	130
6.3.2	Schmiersystem und Ölkreislauf	158
6.3.3	Ladungswechsel und Ladungswechselanlage	190
6.3.4	Verbrennung, Entzündung und Kraftstoff	236
6.3.5	Zylinderkopf	325
6.3.6	Kurbelgehäuse mit An- und Einbauteilen	371
6.3.7	Kolben	398
6.3.8	Pleuelstangen	491
6.3.9	Kurbelwellen	505
6.3.10	Triebwerkslager	522
6.3.11	Steuer- und Nebentriebe	585
6.3.12	Schwungrad und Kupplung	608
	Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	629
	Literatur- und Quellenverzeichnis	637
	Quellenverzeichnis der Bilder	641
	Stichwortverzeichnis	643

1 Einleitung

Verbrennungsmotoren gibt es seit mehr als 100 Jahren. In dieser Zeit sind Hunderte von Millionen Motoren gebaut worden. Es sollte deshalb anzunehmen sein, dass die Technik soweit beherrscht wird, dass keine oder kaum noch Schäden auftreten. Doch die Wirklichkeit sieht anders aus. Die Motorenentwicklung ist weit mehr als die anderer Maschinen von Schadenfällen jeglicher Art geprägt. Und das, obwohl immer mehr Ingenieure, Techniker und Facharbeiter weltweit an der Entwicklung und Verbesserung von Verbrennungsmotoren arbeiten. Was also macht Verbrennungsmotoren so stör- und schadanfällig, dass eigens Bücher, Druckschriften – und sogar Normen – zu Schäden an Motoren und deren Bauteilen veröffentlicht werden?

Die Ursachen sind im Wesentlichen in der Komplexität der Motoren und ihrer Funktionen mit einer Vielzahl von oft kaum zu überschauenden Einflüssen und in den Betriebsbedingungen, bei denen sie arbeiten müssen, zu suchen.

Der Verbrennungsmotor ist ein autarkes thermisches Kraftwerk, das die im Kraftstoff gebundene chemische Energie in Wärme und davon einen Teil in mechanische Arbeit umwandelt. Den gleichen Effekt mit anderen Maschinenarten zu erzielen, bedarf es beispielsweise einer Feuerung, eines Kessels, eines Kondensators und einer Turbine, wobei diese Komponenten in ihrer Gesamtheit nicht größer sein dürften als ein Motor.

Da die Wärmefreisetzung – die Verbrennung – im Motor stattfindet («innere Verbrennung»), werden die Präzisionsteile des Triebwerks direkt mit den Verbrennungsgasen und deren korrosiven und abrasiven Verbrennungsprodukten beaufschlagt. Große Drücke bei gleichzeitig heißen Temperaturen des Arbeitsgases im Zylinder – Voraussetzung für Leistung und Wirkungsgrad der Motoren – müssen mittels beweglicher Dichtungen, den Kolbenringen, abgedichtet werden. Eine gute Dichtwirkung der Ringe setzt jedoch hydrodynamische Schmierung zwischen den Ringen und der Zylinderwand voraus. Und diese ist in den Totpunkten, weil dort die Kolbengeschwindigkeit null ist, oft nicht in ausreichendem Maß gegeben, so dass stattdessen Mischreibung auftritt. Insbesondere beim Arbeitstotpunkt besteht wegen des großen Druckes im Brennraum und in den Nuten hinter den Kolbenringen die Gefahr, dass der Schmierfilm an der Zylinderwand regelrecht durchgedrückt wird. Die Folge ist metallischer Kontakt und entsprechender Verschleiß an den Ringen und im Bereich des oberen Totpunktes an der Zylinderwand. Darüber hinaus haben die Kolbenringe einen Großteil der vom Arbeitsgas in den Kolben einfallenden Wärme an die Zylinderwand abzuführen. Die meisten Kolben sind aus Aluminiumlegierungen gefertigt,

deren Schmelztemperatur von knapp 600 °C viel kleiner ist als die Maximaltemperaturen im Brennraum von mehr als 2000 °C. Hinzu kommt, dass sich die Gleitpartner des Triebwerkes – Kolben und Zylinder – aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlich ausdehnen, was entsprechend kompensiert werden muss. Die Kraftübertragung in den Lagern erfolgt mit Schmierfilmen von nur wenigen Tausendstel Millimetern Dicke.

Die zentralen Motorteile sind großen thermischen und mechanischen – dynamischen zudem – sowie tribologischen Beanspruchungen ausgesetzt.

Motoren bestehen aus vielen Teilen, die – baulich und funktionell miteinander verbunden – störungsfrei zusammenarbeiten müssen. Diese Teile unterliegen ihrerseits einer Vielzahl von Wirkungen und Einflüssen, die in ihrer Gesamtheit oft kaum vorhersehbar sind und auf die Entwicklungsingenieure nur bedingt Einfluss haben. Der Motor ist Teil einer Wirkungskette, die nicht stärker als ihr schwächstes Glied sein kann. Fehlfunktionen des Motorzubehörs, der Kraftübertragung, konstruktive und betriebliche Mängel des Fahrzeugs bzw. Schiffs wirken auf den Motor zurück. Deshalb sind Motorschäden oft ein Indiz für Mängel, Schwächen und Fehlfunktionen der gesamten Antriebsanlage und der anzutreibenden Maschine.

Die äußeren Betriebsbedingungen von Motoren sind nicht weniger ungünstig als die inneren. Fahrzeugmotoren haben kein festes Fundament. Der Fahrzeugrahmen bzw. die selbsttragende Karosserie verformen sich. Die Motoren sind dauernden Erschütterungen und starken Stößen ausgesetzt. Verformungen eines an sich recht nachgiebigen Schiffsfundaments infolge von Wellengang oder Ladezustand des Schiffes können zu Lagerschäden bis hin zu Kurbelwellenbrüchen führen. Motoren sind tageszeitlich und jahreszeitlich unterschiedlichen Außentemperaturen ausgesetzt. Sie arbeiten in allen Klimazonen mit den Extrema arktischer Kälte und glühender Wüstenhitze. Kaum eine andere Maschinenart kann mit ständig und oft abruptem Wechsel der Belastung wie bei Kaltstart, rascher Belastung auf Volllast, plötzlicher Entlastung, langen Leerlaufzeiten, Stop-and-go-Betrieb bei kalten Motortemperaturen, Überlastung und Abstellen der Maschine aus Volllast betrieben werden. Weitere Probleme resultieren aus Staub, Sand oder Feuchtigkeit und Salz in der Verbrennungsluft bei ungenügender Filtrierung der Ansaugluft bzw. undichten Rohrleitungen. Minderwertige Kraft- und Schmierstoffe, unzureichende Pflege des Kühlmittels sowie mangelnde Wartung sind weitere Einflüsse, die Ursache von Schadenfällen sein können. Und dazu kommt noch, dass, aus welchen Gründen auch immer, Motoren oft von technisch unqualifiziertem Personal betrieben werden.

Wesentliche Schwerpunkte der Motorenentwicklung sind:

- Verbesserung sowohl der absoluten als auch der spezifischen Motorleistung (Leistung/Masse; Leistung/Hubvolumen; Leistung/Bauraum),
- Verringerung von Kraft- und Schmierstoffverbrauch, d.h. Verbesserung des Wirkungsgrades,
- Verbilligung der Herstellung,
- Verlängerung der erreichbaren Betriebsdauer und der Wartungsintervalle,
- Vereinfachung von Wartung und Reparatur sowie
- Verringerung von Schadstoffemission und Geräuschentwicklung.

Diese Ziele erfordern Maßnahmen, die sich zum Teil gegenseitig ausschließen, so dass immer wieder Kompromisse geschlossen werden müssen, die – je nach Wichtung einzelner – zu Lasten anderer Forderungen gehen.

Motoren von heute bestehen aus weniger Bauteilen als früher. Die Integration von Funktionen, Verbilligung, das Ausschließen von Schadenquellen, die Vereinfachung von Wartung und Reparatur sowie die Umstellung ganzer Funktionsbereiche von Mechanik auf Elektronik wie bei Gemischnutzung, Zündung, Regelung usw. haben dazu geführt. Hand in Hand damit verläuft die Entwicklung zu größerer mechanischer, thermischer und tribologischer Belastung. Die Entwicklungszyklen werden laufend verkürzt, so dass mit Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit in Entwicklung, Fertigung und Betrieb oft Einschränkungen in Kauf genommen werden müssen. All das führt letztlich dazu, dass manche Fehlfunktion, Störung oder Schaden «gänzlich unerwartet» auftritt. Immer wenn eine Schadenart in ihren Ursachen erkannt und beseitigt ist, werden die Anforderungen an Leistung, Betriebseigenschaften, Betriebsdauer erneut forciert, bis wiederum Schäden vorkommen. Es ist wie beim ewigen «Wettlauf zwischen Hase und Igel»! Je nach Entwicklungsstand der Motoren treten die Schäden an anderen Schwachstellen auf. Lager, Kolben und Kolbenringe, Kurbelwellen, Einspritzausrüstung, Ventile und Ventildfedern, Zylinderköpfe und -dichtungen sind immer wieder zu kritischen Teilen geworden. Kaum eine Funktionsgruppe gibt es, die mit ihren Problemen die Weiterentwicklung der Motoren nicht behindert hätte. Es leuchtet ein, dass gerade die Weiterentwicklung der Motoren selbst zur Ursache von Störungen und Schäden wird. Das liegt daran, dass zwangsläufig immer wieder die Grenzen des nach dem Stand der Technik Machbaren überwunden werden müssen.

Motorschäden erklären sich aus einem breiten Spektrum physikalischer, chemischer und elektrochemischer Vorgänge, die in unterschiedlichsten Kombinationen in und an den einzelnen Baugruppen auftreten. Deshalb haben Motorschäden meist nicht nur eine, sondern mehrere Ursachen, mit deren Auftreten – jede für sich allein – kaum zu rechnen ist. Und die Kombination ist demzufolge noch unwahrscheinlicher. Und dennoch treten Motorschäden auf – gleichsam als Bestätigung von MURPHY'S Gesetz: «Wenn etwas schief gehen kann, dann geht es auch schief!». Schadenursachen sind oft indirekter Natur, so dass sich ein Schaden gleichsam «um 3 Ecken herum» entwickelt, was die Ursachenfindung ungemein erschwert.

Für die Beurteilung von Schäden ist die Frage, ob ein großes Teil (z.B. Kurbelwelle) oder ein kleines (z.B. Lager; Kolbenring usw.) den Ausfall verursacht, nebensächlich, weil die Folgen, nämlich Stillstand des Motors, dieselben sind. Schäden können sich «lawinenartig» entwickeln: Kolbenringfresser, Kolbenfresser, Triebwerkschaden, Ausfall des Motors. Die Folgen sind bisweilen dramatisch. Oft steht das Ausmaß eines Schadens in keinem Verhältnis zur Ursache.

Schäden an Maschinenteilen sind stets ein Korrektiv für die Entwicklung gewesen und sind es noch immer. Schäden sind nicht zu übersehende Hinweise auf Schwachstellen bzw. Fehler in Werkstoff, Konstruktion, Fertigung, Montage und Bedienung. Darüber hinaus können sie auch Hinweis für konstruktive oder betriebsmäßige Mängel der gesamten Maschinenanlage sein. Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden gehen primär dahin, die Ursachen für die Zukunft auszuschließen. Oft war eine sol-

che «aktive» Schadenverhütung nicht möglich, sei es, weil die Ursachen nicht eindeutig auszumachen waren, sei es, dass sie – aus welchen Gründen auch immer – nicht beeinflusst werden konnten. Dann musste es genügen, die Wirkung(en) eines Übelstandes weitgehend zu mildern und «erträglich» zu machen: «passive» Schadenverhütung!

Schäden haben bei der Entwicklung der Motoren entscheidende Bedeutung. Es ist daraus zu lernen – ganz im Einklang mit dem Sprichwort, demzufolge man aus Schaden klug wird. Schäden werden inzwischen bei der Entwicklung gezielt erzeugt, um die Erkenntnisse daraus zu nutzen und um Schäden beim späteren Motorbetrieb in «Kundenhand» auszuschließen. Aus verständlichen Gründen sollten alle Schadenmöglichkeiten in der Entwurfs-, Konstruktions- und Erprobungsphase eines Motors eliminiert werden. Das stößt auf die beschriebenen Schwierigkeiten, die letztlich erklären, warum es nach mehr als 100 Jahren Motorentwicklung und Motorenbau überhaupt noch zu Schäden kommt. Es liegt u.a. daran, dass

- ❑ einerseits unser Wissen von physikalisch-technischen Vorgängen begrenzt ist – auch heute noch!
- ❑ Andererseits führt die Zunahme von Wissen und Erfahrung zu forciertem Leichtbau, größerer Ausnutzung der Motoren und notwendiger Verbilligung der Fertigung – Ursache manchen Schadens!
- ❑ Es liegt im Wesen von Neu- und Weiterentwicklungen, dass die Grenzen des Bekannten überschritten und technisches Neuland erschlossen wird.
- ❑ Das zufällige Zusammentreffen mehrerer Umstände, von denen jeder einzelne harmlos ist, die aber gemeinsam einen Schaden auslösen, ist an sich nur wenig wahrscheinlich. Außerdem gibt es so viele Kombinationsmöglichkeiten der Einflussgrößen, dass der Versuch, alle im Vorgriff auszuschließen, praktisch nicht möglich ist.
- ❑ Menschliche Unzulänglichkeiten in Fertigung, Montage, Betrieb und Instandhaltung des Motors sind – allen Bemühungen zum Trotz – nicht gänzlich auszuschließen.
- ❑ Ein Motor muss mit vertretbarem, d.h. mit bezahlbarem Aufwand entwickelt und gefertigt werden. Aus Kostengründen kann eine Entwicklung nicht so weit getrieben werden, wie es technisch möglich wäre und wünschenswert ist. Der Kostendruck wirkt – nicht nur in der Motortechnik – in mehrfacher Hinsicht kontraproduktiv.
- ❑ Die Entwicklungszeiten sind erheblich verkürzt worden. Rechnerische Simulation muss zunehmend Versuch und «Felderprobung in Kundenhand» ersetzen, was in vielen Fällen möglich ist – aber eben nicht in allen!
- ❑ Mehr Arbeit soll mit weniger Personal getan werden. Das zwingt zu extremer Konzentration auf das «Tagesgeschäft». Für mittelbar wichtige Arbeiten, wie z.B. eine ausführliche Dokumentation von Schäden, ihren Ursachen und Abhilfemaßnahmen, fehlt es oft an Personal und Zeit, ebenso für den besonders in der Entwicklung wichtigen «Blick über den Gartenzaun». Damit gehen Erfahrungen verloren, und der technische Blickwinkel wird verengt. Nicht die beste, sondern die nächstliegende, schnell zu realisierende und – scheinbar – kostengünstigste Lösung wird gewählt.

- Infolge vorzeitiger Entlassung älterer erfahrener Mitarbeiter in allen Bereichen von Entwicklung, Fertigung und Motorbetrieb wird der Erfahrungsfluss unterbrochen. Es treten wieder Schäden längst bekannter Ursachen auf, deren Abhilfemaßnahmen aus Gründen der Vereinfachung und Rationalisierung rückgängig gemacht worden sind, weil die Gründe dafür einer jüngeren Generation von Ingenieuren und Technikern nicht mehr geläufig sind.

Dennoch, die Erfahrungen aus Jahrzehnten und ein immer besser greifendes Instrumentarium an Entwicklungsmethoden haben dazu geführt, dass Schäden, die die

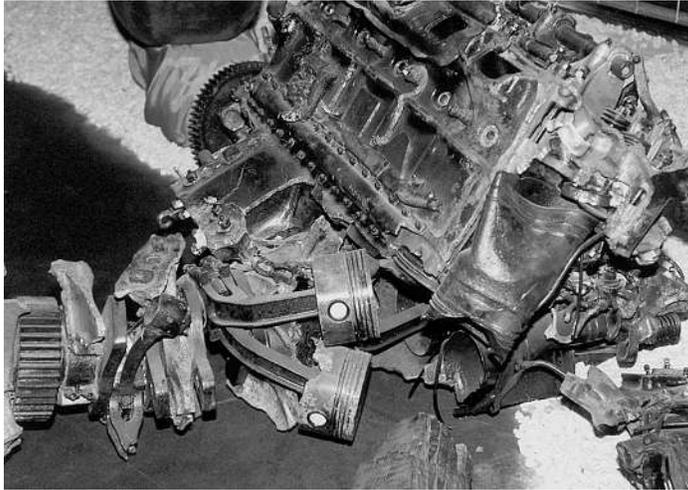


Bild 1.1 Totalschaden eines Flugzeugmotors nach Absturz aus über 1000 m Höhe (Auto & Technik Museum Sinsheim)



Bild 1.2 Totalschaden eines Motors als Folge eines Kolbenfressers

Grenze der Belastbarkeit der Motoren anzeigen, insgesamt immer seltener beim Motorbetreiber auftreten. Sie wurden sozusagen in die Versuchsabteilungen «verlagert» und in jüngster Zeit mit der experimentellen und theoretischen Vorentwicklung weitgehend vorweggenommen. Im Lichte dieser Betrachtungen relativieren sich die Motorschäden, zumal, wenn berücksichtigt wird, wie lange und wie zuverlässig die meisten Motoren arbeiten.

Die Bandbreite der Motorschäden ist groß. Sie reicht vom nicht mehr reparierbaren Totalschaden, wie er wegen äußerer Einwirkungen auftritt (Bild 1.1) oder aber infolge innerer Fehlfunktionen verursacht wird (Bild 1.2) sowie über alle Zwischenstufen bis hin zu kaum sichtbaren Trag- und Verschleißspuren.

Gegenstand des vorliegenden Buchs sind ausschließlich technische Schäden, also nicht Schäden, die infolge Gewalteinfluss von außen verursacht wurden, unabsichtlich wegen Unfalls oder absichtlich infolge von Kriegshandlungen.

Verbrennungsmotoren haben im Laufe der Entwicklung breite Anwendung zur Gewinnung mechanischer Energie und als Antriebsmaschine für unterschiedlichste Fahrzeuge bis hin zu Flugzeugen und Schiffen gefunden. Das ist im Wesentlichen aus folgenden Gründen so:

- ❑ Mit Verbrennungsmotoren werden gute Wirkungsgrade erreicht. Diese beruhen auf großen Drücken und heißen Temperaturen, die im Verlaufe des thermodynamischen Prozesses im Motor realisiert werden. Der effektive Wirkungsgrad von Ottomotoren beträgt etwa 30...35%, von Dieselmotoren zwischen 40...53% (Letztere bei großen 2-Takt-Dieselmotoren). Die aus den Drücken und Temperaturen resultierenden Belastungen sind aber auch Ursache und Auslöser vieler Motorschäden.
- ❑ Verbrennungsmotoren werden für einen großen Anwendungsbereich gebaut, sowohl was die Leistungsspanne als auch die Drehzahl-Drehmoment-Abstufung anbelangt. Die kleinsten Motoren (Motoren für Flugzeug- und Fahrzeugmodelle) haben Leistungen ab 0,07 kW, Großmotoren für Schiffe und stationäre Anwendungen bis zu 66 000 kW. Bei kleinen Motoren wird die Leistung vorwiegend bei großen Drehzahlen erzeugt, bei großen Motoren mit viel Drehmoment bei kleinen Drehzahlen.
- ❑ Verbrennungsmotoren können, bezogen auf die abgebbare Leistung, sehr leicht ausgeführt sein. Ein Kilowatt mechanische Leistung ist mit Motoren, die bei sehr großer Drehzahl arbeiten, mit weniger als einem Kilogramm Masse darstellbar.
- ❑ Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und flüssigen Kraftstoffen als Energieträger können über lange Strecken ohne die Notwendigkeit von Zwischen-Tankstopps betrieben werden. Flüssige Kraftstoffe machen die Unabhängigkeit von ortsgebundener Energieversorgung überhaupt erst möglich.

Verbrennungsmotoren sind anspruchsvolle technische Einrichtungen zur Gewinnung mechanischer Arbeit aus bei der Verbrennung im Arbeitsraum freigesetzter Wärme. Sie werden von einer Reihe unterschiedlicher Funktionsgruppen gebildet, die bis weit in den Teileumfang eines Fahrzeugs reichen können. Im Einzelnen sind zu nennen:

- ❑ Kühlung,
- ❑ Schmierung,
- ❑ Ladungswechsellanlage,
- ❑ Kraftstoffanlage,
- ❑ Steuerung,
- ❑ Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse,
- ❑ Triebwerk,
- ❑ Motor-Elektronik.

Ob der Komplexität des Gesamtsystems Motor sowie der thermodynamischen, strömungstechnischen, maschinendynamischen, tribologischen und regelungstechnischen Prozesse ist es letztlich nicht verwunderlich, wenn trotz aller Entwicklungsanstrengungen eben doch hin und wieder Fehler und daraus resultierende Schäden entstehen können.

Bei den weiteren Ausführungen wird in diesem Buch generell auf Motoren mit stehender Zylinderanordnung und zentrischem Kurbelgetriebe («Kurbeltrieb») Bezug genommen (s. Bild 2.10). So ist unter der Bezeichnung «oberer Totpunkt» OT die kurbelwellenferne und unter der Bezeichnung «unterer Totpunkt» UT die kurbelwellennahe Position des Kolbens zu verstehen. Der Abstand zwischen OT- und UT-Position des Kolbens ist der Kolbenhub s . Die Bewegung eines Kolbens von OT nach UT und umgekehrt wird als Takt bezeichnet. Der von der Kurbelwellendrehbewegung bestimmte Kolbenweg $s_K(\alpha)$ ist von OT-Kolben ausgehend zu messen. Der die Kurbelwellendrehung bezeichnende Winkel α wird von OT Kurbelwelle aus gezählt. Der Pleuel wird bei der Drehbewegung Kurbelwelle um den Pleuelwinkel β gegenüber der Zylinderachse ausgelenkt. Die Gegendruckseite GDS ist die Seite des Kolbenschafts, mit der der Kolben bei der Kompression an der Zylinderwand anliegt. Die Druckseite DS ist die Seite des Kolbenschafts, mit der der Kolben bei der Expansion an der Zylinderwand anliegt. Die Bezeichnungen GDS und DS sind analog auch als Bezeichnungen bei den Zylindern anzuwenden.

Unter dem Begriff Belastung sind von außen auf die Bauteile und Motoren einwirkende Kräfte und Momente zu verstehen. Beanspruchungen sind von den Belastungen in den Bauteilen verursachte Anstrengungen – insbesondere Spannungen. Belastungen und Beanspruchungen sind nicht dasselbe!

Im Text verwendete Symbole und Abkürzungen sind am Ende des Buches erläutert.

2.2 Betriebsbedingungen

2.2.1 Motorkonzeptionen

«Den» oder «einen» Motor gibt es nicht, sondern eine Vielfalt unterschiedlicher Bauarten, die sich in Größe, Einsatz, Funktionsweise und Betriebseigenschaften zum Teil sehr unterscheiden und deshalb auch – im Sinne der Thematik dieses Buches – in Art und Häufigkeit der Schäden. Bestimmend für die Konzeption von Motoren ist der Verwendungszweck. Danach richten sich Größe (Hub, Bohrung, Zylinderzahl), Arbeitsverfahren (4-Takt/2-Takt), Arbeitsprozess (Otto/Diesel), Gemischbildung und Verbrennungsverfahren (direkt/indirekt), Kühlung (Wasser/Luft), Triebwerksausführung (Tauchkolben/Kreuzkopf) und die konstruktive Ausführung.

Wegen der Verwendung von Jedermann sind Fahrzeugmotoren, hierunter wiederum besonders die Ottomotoren, eine dominierende Motorgattung, so dass umgangssprachlich unter Motoren meistens Fahrzeugmotoren verstanden werden. Wenn auch die Mehrzahl der Motoren Fahrzeuge antreiben, so ist die Bandbreite der Motoren für allgemeine Verwendung – Antriebe für Nutzfahrzeuge aller Art, Eisenbahn, Schiffe, Stromerzeuger und Arbeitsmaschinen – ungleich größer, was Abmessungen, Leistungsspektrum, konstruktive Vielfalt und auch die Schadenarten anbelangt.

Aufgrund übergeordneter Gesetzmäßigkeiten der Ähnlichkeitsmechanik sind die Motorabmessungen (Hub, Bohrung, Zylinderzahl) nicht unabhängig voneinander.

Tabelle 2.1 Drehzahlbereiche einiger Dieselmotorarten

Drehzahlbereich	Arbeitsverfahren	Bohrung	Hub	Zylinderzahl	Zylinderleistung
min ⁻¹	–	mm	mm	–	kW
Langsamläufer 250 ... 75	2-Takt-	260 ... 980	980 ... 2660	4 ... 12	400 ... 5800
Mittelschnellläufer 1000 ... 400	4-Takt-	200 ... 640	300 ... 900	5 ... 20	100 ... 1940
Schnellläufer 2500 ... 1000	4-Takt-	130 ... 250	140 ... 300	4 ... 20	35 ... 370
Schnellläufer Pkw 4000 ... 5000	4-Takt-	70 ... 90	80 ... 100	4 ... 8	bis 25

Große Motoren arbeiten mit kleiner Drehzahl, kleine Motoren hingegen können mit sehr großer Drehzahl arbeiten. Deshalb ist der Drehzahlbereich ein Index für Größe und Art des jeweiligen Dieselmotors (Ottomotoren werden ausschließlich als Schnellläufer gebaut). Zu unterscheiden ist zwischen Langsamläufern, Mittelschnellläufern und Schnellläufern (Tab. 2.1).

Aber nicht nur Leistung, Größe und Drehzahl sind miteinander verknüpft, sondern auch Arbeitsverfahren, -prozess und Kühlungsart. Große absolute Leistungen lassen sich nur mit großen Zylinderabmessungen (Hub, Bohrung) darstellen, große spezifische Leistungen (Leistung/Arbeitsraum; Leistung/Motormasse) hingegen über Arbeitsspielfrequenz (Drehzahl, Taktzahl) und spezifische Arbeit mit kleinen Abmessungen.

Die Motorkonzeption ist letztlich von Betriebsweise, Auslastung und Betriebseigenschaften sowie der geforderten Betriebsdauer («Lebensdauer») der einzelnen Motorbauteile bestimmt. Motoren für allgemeine Verwendung sind durchweg Dieselmotoren. Sie werden auch als Gas- oder Dualmotoren gebaut. Größere und große Motoren, namentlich solche für Schiffsantriebe werden mit Schweröl betrieben. Große 2-Takt-Motoren werden mit Kreuzkopfführung des Triebwerks und konstruktiver Trennung von Zylinder- und Kurbelraum ausgeführt.

Motoren sind stets Teil einer Antriebsanlage. Ihre Funktion wird deshalb auch von der Konzeption, der Ausführung und den einzelnen Komponenten der Maschinenanlage beeinflusst. Unter Maschinenanlage sind dabei zu verstehen: Motoraufhängung bzw. Motorlagerung, Motorausrichtung, Leistungsabnahme am Motor, Kraftübertragung, Nebenantriebe, Kühlungsart und Kühlsystem, Motorvorwärmung und Motorwarmhaltebetrieb, Einlasssystem und Luftfiltrierung, Maschinenraumbelüftung, Kraftstoffanlage, Schmierölanlage, Abgasanlage und Geräuschkämpfung. Diese praktisch für jeden Einsatzfall unterschiedliche «Peripherie» ist Ursache mancher Störungen und Schäden am Motor selbst.

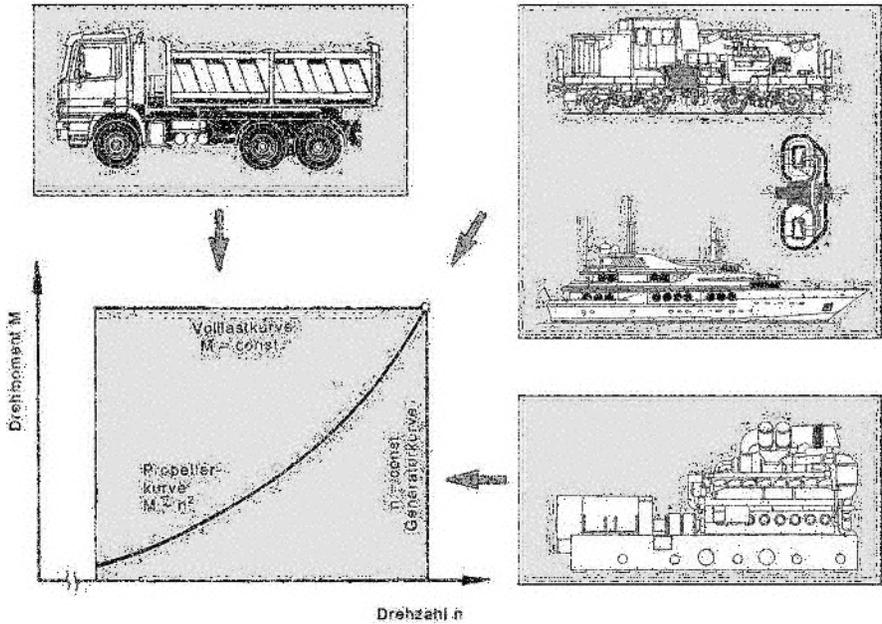


Bild 2.2 Propeller-, Volllast- und Generatorkurven

Die anzutreibende Maschine «schreibt» dem Motor das Leistungs- und Belastungsprofil unter Zuordnung von Drehmoment zu Drehzahl gewissermaßen «vor». Je nachdem, ob ein Fahrzeug, ein Schiff oder ein Stromerzeuger angetrieben wird, ergeben sich sehr unterschiedliche Betriebskennlinien (Bild 2.2). Prinzipiell ist zu unterscheiden: Motorbetrieb an der

□ **Volllastkurve**

Der Motor wird mit maximal realisierbarem Drehmoment (*Volllast*) bei wechselnden Drehzahlen betrieben. Die Leistung hängt bei nahezu konstantem Drehmoment etwa linear von der Drehzahl ab. Der Betrieb an der Volllastkurve ist für schwere Fahrzeuge, namentlich Baustellenfahrzeuge charakteristisch.

□ **Generatorkurve**

Der Motor wird mit konstanter Drehzahl betrieben, weil Generatoren eine konstante Spannung bzw. Frequenz erzeugen sollen, diese aber von der Drehzahl abhängen. Die Leistung wird mit dem abgeforderten Drehmoment geregelt.

□ **Propellerkurve**

Das Drehmoment nimmt im Quadrat mit der Drehzahl zu; die Leistung mit der 3. Potenz. Ein solcher Zusammenhang ist für Strömungsmaschinen typisch. Bei Schiffen stellt sich die Leistung als m^{te} Potenz der Drehzahl dar ($P \approx n^m$). Der Exponent m hängt vom Schiffstyp und von der Schiffsgröße, letztlich also von der Geschwindigkeit ab. Für große langsame Schiffe gilt $m \approx 3$; für schnelle Schiffe $m \approx 3,5 \dots 3,7$.

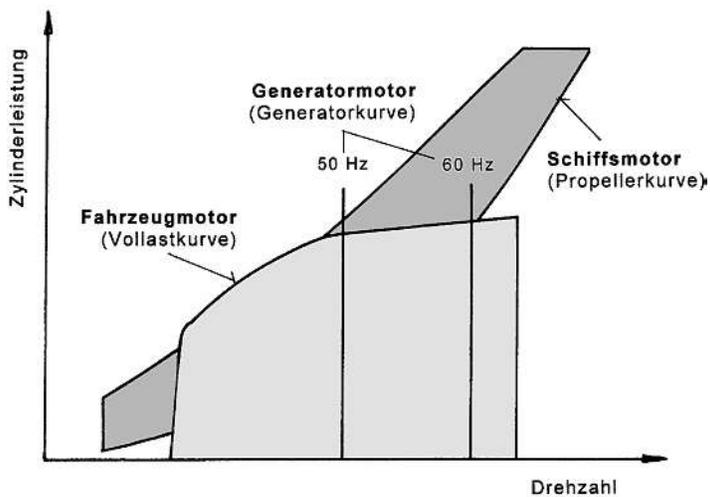


Bild 2.3 Motorbetriebsbereiche bei unterschiedlichen Betriebsarten

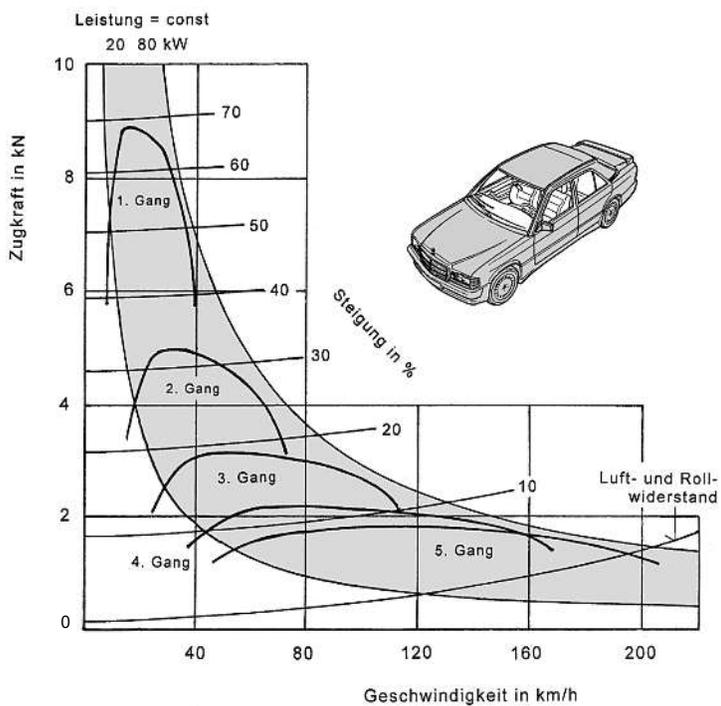


Bild 2.4 Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines Pkw

In der Praxis sehen diese Kurven etwas anders aus, weil dem Motor von der Abgas-turboladaufladung zunehmend die Strömungsmaschinen-Charakteristik des Turboladers «aufgezwungen» wird (s. Bild 2.3).

□ Kfz-Fahrbetrieb

Die Fahrwiderstände von Kfz setzen sich aus dem Rollwiderstand und dem Luftwiderstand zusammen. Bei Steigungen bzw. Gefällen ist noch die Hangabtriebskraft maßgebend. Der Rollwiderstand ist ungefähr konstant, der Luftwiderstand nimmt etwa quadratisch und die Leistung mit der 2,6^{ten}...2,8^{ten} Potenz der Geschwindigkeit zu. Die Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik des Motors wird den Erfordernissen des Kfz-Betriebes entsprechend mit Kennungswandlern – mechanische, hydraulische oder elektrische Getriebe – angepasst. Bei Pkw-Motoren gelingt das mit 3...6 (mechanischen) Getriebestufen (*Gänge*); bei schweren Nkw werden dafür deutlich mehr Stufen (s. Bilder 2.4 und 2.5) benötigt.

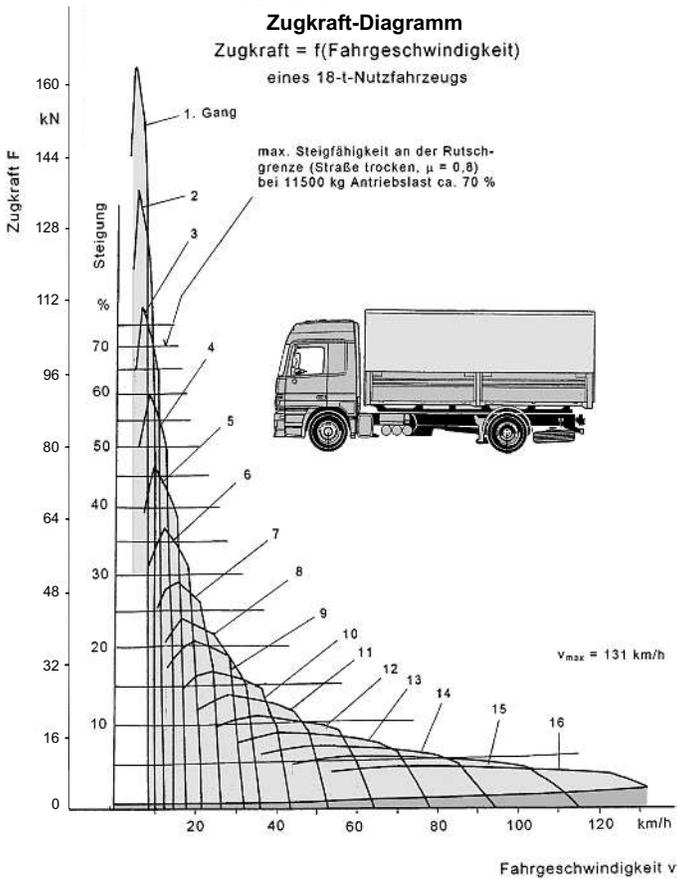


Bild 2.5 Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines schweren Nutzfahrzeugs

2.2.2 Motorleistung und Leistungsreduktion

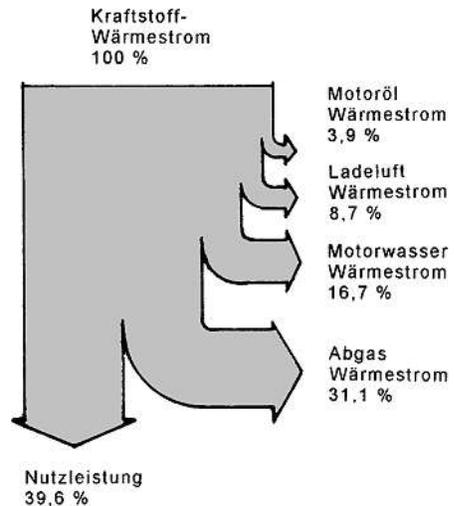
Die von einem Motor abgebbare Leistung ist grundsätzlich von der in den Arbeitsraum angesaugten Luftmenge und der Drehzahl, mit der ein Motor arbeitet, begrenzt. Luft ist die entscheidende Voraussetzung für die Freisetzung von Wärme bei der Verbrennung. Erst unter der Bedingung, dass mehr Luft im Arbeitsraum vorhanden als erforderlich ist, können mit dem Zumessen von Kraftstoff Arbeits- und Leistungsfähigkeit eines Motors bestimmt werden. Dieser Zusammenhang ist maßgeblich bei den Dieselmotoren gegeben. Er besteht aber genauso auch bei den Ottomotoren, bei denen Arbeits- und Leistungsfähigkeit mit der Drosselklappe und somit über die Füllung des Arbeitsraumes mit frischem Luft-Kraftstoff-Gemisch reguliert werden. Bei der sogenannten Füllungsregulierung der Ottomotoren ist das Mischungsverhältnis von Luft und Kraftstoff wichtig. Die Luftmasse, bis zu der zumindest theoretisch eine vollständige Verbrennung des zugemessenen Kraftstoffes möglich ist, beträgt etwa das 14- bis 15-fache der im Gemisch enthaltenen Kraftstoffmasse. Dieses Verhältnis wird als *Mindestluftbedarf* bzw. *stöchiometrisches Mischungsverhältnis* von Luft und Kraftstoff bezeichnet. Wird der angesaugten Luftmenge mehr Kraftstoff zugesetzt als dem stöchiometrischen Verhältnis entspricht, dann ergibt das nicht etwa mehr freigesetzte Wärme, sondern stattdessen nur unvollständigere Verbrennung und davon bedingte Verluste.

Anmerkung: Das stöchiometrische Mischungsverhältnis von Luft und Kraftstoff macht auf der Erde einen der entscheidenden Vorteile aller Verbrennungsmotoren gegenüber alternativen Antriebssystemen für Fahrzeuge – wie Elektroantrieb mit Batterie – aus. Schließlich muss im Kraftfahrzeug von der für die Energiegewinnung mittels Verbrennung erforderlichen Luft und dem Kraftstoff nur der Kraftstoff im Tank mitgeführt werden. Und das macht nur etwa 6,5% der für die Energiegewinnung mittels Verbrennung insgesamt erforderlichen Stoffmasse aus. Stünde theoretisch betrachtet wie auf dem Mond die erforderliche Luftmenge nicht aus der Atmosphäre frei zur Verfügung, wäre bei den üblichen Füllmengen der Kraftstofftanks von Pkw eine so große Luftmasse im Fahrzeug mitzuführen, dass die Nutzmasse negativ (<0) wäre! Da bei Batterien die zu speichernde Energiemenge in ihrer Gesamtheit an die Masse des Energiespeichers gebunden ist und dieser komplett mit dem Fahrzeug mitgenommen werden muss, ist es nicht verwunderlich, wenn sowohl Reichweite als auch Nutzmasse bei Elektroantrieb sehr unbefriedigend sind. Letztlich bedeutet das, auch in der Zukunft werden Verbrennungsmotoren ihre Bedeutung als Antriebsmaschine für Kraftfahrzeuge weitgehend behalten. Es lohnt also auch weiterhin, sich mit Motorschäden und Möglichkeiten der Instandsetzung zu befassen.

Weil nach den Gesetzen der Thermodynamik (Wärmelehre) eine vollständige Energieumwandlung nicht möglich ist, muss ein Teil (und zwar i. d. R. der größere) der bei der Verbrennung frei werdenden Energie als Wärme an die Umgebung abgeführt werden – mit dem Abgas, mit dem Kühlmittel und ein kleiner Teil mittels Strahlung und Konvektion (Konvektion = Mitführung der Wärme von den kleinsten Teilchen einer Strömung).

Bild 2.6
Sankey-Diagramm

Sankey-Diagramm (Wärmebilanz)
eines schnellaufenden Dieselmotors



Wird die mit dem Kraftstoff zugeführte Wärmeenergie gleich 100 % gesetzt, so ergeben sich die entsprechenden prozentualen Anteile der einzelnen Wärmen einschließlich der Nutzwärme (mechanische Energie am Kurbelwellenflansch, bzw. Schwungrad des Motors). Eine solche Wärmebilanz gilt jeweils für einen bestimmten Betriebspunkt. Das Verhältnis der einzelnen Wärmen ändert sich abhängig von Drehzahl und Drehmoment. Mit dem *Sankey*-Diagramm lassen sich diese Zusammenhänge anschaulich aufzeigen (s. Bild 2.6).

Zwar ist *Leistung* eine physikalisch eindeutig definierte Größe, doch in der Motortechnik muss der Leistungsbegriff, wegen veränderlicher Einflüsse auf die Motorleistung, präzisiert, d. h. eingengt werden. Solche Einflüsse sind:

- ❑ die Dauer, während der die Leistung abgegeben werden kann. Es leuchtet ein, dass von einem Hochleistungsmotor (z. B. einem Rennmotor) nur eine kürzere Betriebsdauer als von Motoren für Nutzfahrzeuge oder gar Schiffe erwartet werden kann.
- ❑ die Zeitintervalle und Modalitäten der vom Hersteller vorgeschriebenen Wartungsarbeiten.
- ❑ die atmosphärischen Bedingungen – Luftdruck, -temperatur und -feuchte –, bei denen die Leistung erbracht werden muss, und
- ❑ der Leistungsbedarf der Hilfseinrichtungen, die je nach Verwendungszweck des Motors zu dessen Betrieb unerlässlich sind. Bei Kraftfahrzeugmotoren sind das:
 - Lüfter bzw. Wasserpumpe und Kühlluftgebläse,
 - Ölpumpe,
 - Aufladeeinrichtungen,

- Kraftstoffförderpumpe,
- Einspritzpumpe bei Dieselmotoren,
- unbelastete Lichtmaschine.

Zu jeder Leistung muss auch die entsprechende Motordrehzahl angegeben werden. Die Leistungsbegriffe nach DIN ISO 3046 T1 sind:

□ Nennleistung

Der vom Motorhersteller angegebene Zahlenwert der Leistung, die ein Motor unter bestimmten Bedingungen abgibt. Weiterhin wird unterschieden nach

- Ort (am Motor) der Leistungsabgabe
- indizierte Leistung (Innenleistung): *Gesamtleistung, die in den Arbeitszylindern von den Gasen, an der Verbrennungsseite der Arbeitskolben freigesetzt wird.*
- Bremsleistung: *Leistung oder Summe der Leistungen, die an der Abtriebswelle bzw. den Abtriebswellen gemessen wird.*

□ Dauer der Leistungsabgabe

- Dauerleistung: *Leistung, die ein Motor bei zugehöriger Motordrehzahl und festgelegten Umgebungsbedingungen unter Durchführung der vom Motorenhersteller vorgeschriebenen Wartungsarbeiten in der von ihm angegebenen Zeit zwischen den erforderlichen Überholungen dauernd abgeben kann.*
- Überleistung: *Leistung, die ein Motor bei festgelegten Umgebungsbedingungen unmittelbar im Anschluss an den Betrieb mit Dauerleistung abgeben kann. Dauer und Wiederholungsabstand für den Betrieb mit der zulässigen Überleistung sind von der Anwendung abhängig.*
- Blockierte Leistung: *Leistung, die ein Motor während einer dem Verwendungszweck entsprechend angegebenen Dauer bei zugehöriger Drehzahl und festgelegten Umgebungsbedingungen abgeben kann, wobei die Kraftstoffmenge so begrenzt ist, dass diese Leistung nicht überschritten werden kann.*

□ Art der Leistungsabgabe

- ISO-Leistung: *Leistung, die unter Betriebsbedingungen des Hersteller-Prüfstandes ermittelt und auf Normbezugsbedingungen nach Abschnitt 6 der Norm und nach Angabe des Motorherstellers angepasst und korrigiert wurde.*
- ISO-Standard-Leistung: *Dauer-Bremsleistung, für die der Motorhersteller angibt, dass sie der Motor, wenn lediglich die wichtigen abhängigen Hilfseinrichtungen vom Motor angetrieben werden, in der von ihm angegebenen Zeit zwischen den erforderlichen Überholungen und unter folgenden Bedingungen abgeben kann:*
 - a) *bei zugehöriger Drehzahl und den Betriebsbedingungen des Hersteller-Prüfstandes;*
 - b) *als Nennleistung, die auf die Normbezugsbedingungen gemäß Tabelle 2.2 nach Festlegung des Motorherstellers angepasst und korrigiert worden ist;*
 - c) *unter Durchführung der vom Motorhersteller vorgeschriebenen Wartungsarbeiten.*
- Betriebsleistung: *Leistung, die der Motor unter Berücksichtigung der Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Motorverwendung abgeben kann.*

Tabelle 2.2 Bezugsbedingungen für die Motorleistung

Motorart	Norm	Bezugsbedingungen	
Kfz-Motoren	DIN 70020 Teil 6	Lufttemperatur Luftdruck	$T_r = 298 \text{ K } (25 \text{ °C})$ $p_r = 100 \text{ kPa}$
Motoren für allgemeine Verwendung	ISO 3046-1	Luftdruck (Gesamtdruck) Lufttemperatur relative Luftfeuchte Ladeluftkühlmitteltemperatur	$p_r = 100 \text{ kPa}$ $T_r = 298 \text{ K } (t_r = 25 \text{ °C})$ $\Phi_r = 30 \%$ $T_{cr} = 298 \text{ K } (t_{cr} = 27 \text{ °C})$
Haupt- und Hilfsmotoren für Schiffe	IACS	Luftdruck (Gesamtdruck) Lufttemperatur relative Luftfeuchte See- oder Rohwassertemperatur (am Ladeluftkühlereintritt)	$p_x = 100 \text{ kPa}$ $T_x = 318 \text{ K } (t_x = 45 \text{ °C})$ $\Phi_x = 60 \%$ $T_{cx} = 305 \text{ K } (t_x = 32 \text{ °C})$

- Betriebs-Standard-Leistung: *Dauer-Bremsleistung, für die der Motorhersteller angibt, dass sie der Motor, wenn lediglich die wichtigen abhängigen Hilfseinrichtungen vom Motor angetrieben werden, in der von ihm angegebenen Zeit zwischen den erforderlichen Überholungen und unter folgenden Bedingungen abgeben kann:*
 - a) *bei zugehöriger Drehzahl und den Betriebsbedingungen der Motorverwendung;*
 - b) *als Nennleistung, die nach der Festlegung des Motorherstellers an die angegebenen Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Motorverwendung angepasst oder entsprechend korrigiert worden ist;*
 - c) *unter Durchführung der vom Motorhersteller vorgeschriebenen Wartungsarbeiten.*

Es verdient Beachtung, dass in den Leistungsangaben der Norm ISO 3046 T1 ausdrücklich Bezug auf die Wartung genommen wird – ein unübersehbarer Hinweis auf die Bedeutung der Wartung nicht nur für Zuverlässigkeit und erreichbare Betriebsdauer, sondern auch für die Leistungsentwicklung selbst. Die Motorhersteller machen deshalb genaue Vorschriften über den Umfang und die Abstände zwischen den Wartungsarbeiten abhängig von den jeweiligen Einsatzbedingungen. So heißt es in [2.1]:

«... Im europäischen Bereich wird heute eine W5 (Wartung) nach jeweils 10000 und eine W6 nach jeweils 30000 h empfohlen. Die für das außereuropäische Ausland festgelegten Wartungsintervalle berücksichtigen die in jeder Hinsicht erschwerten Betriebsbedingungen ... (s. Bild 2.7)»

Aus der Leistungsgleichung, folgt, dass die Leistung über die Luftdichte von den atmosphärischen Bedingungen abhängt, und zwar von

Wartungsstufe						
Hauptmerkmale der Wartungsstufen für MTU-Motoren	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Betriebskontrolle - täglich -						
Periodische Wartung - nach Zeitplan – Kühlwasser- und Öluntersuchung, Luftzuführung						
Ölwechsel, Ölfilter						
Ventilspiel, Luftfilter, Kraftstoff-Filter, Anlaßluft-Filter, Motorbetätigung, Motor- lagerung, Kupplung, Schmierstellen						
Ventilsteuerung, Überwachung, Ladeluft- druck, Kühlsystem, Einspritzdüsen(-geräte), Anlasser, Lichtmaschine						
Zwischenuntersuchung, Baugruppeninstandsetzung - nach Zeitplan – Ladeluftkühler, Motoröl-Wärmetauscher, Rückküh- ler, Abgasturbolader, Zylinderköpfe, Ventil- steuerung, Einspritzpumpe, Rädertrieb, Triebwerk, Kühlwasserpumpen						
Hauptuntersuchung – nach Zeitplan – Demontage des Motors zur Überprüfung und Instand- setzung						

Bild 2.7 Das Wartungsprogramm der MTU-Friedrichshafen GmbH umfasst die Wartungsstufen «W1 bis W6».

- Luftdruck, wie er von der barometrischen Höhe und aktuellen Wetterlage (Hoch/ Tief) bestimmt ist und von der
- Lufttemperatur – beeinflusst von geografischer Breite, barometrischer Höhe und Jahreszeit sowie
- Luftfeuchtigkeit.

Deshalb muss immer dann, wenn ein Motor unter anderen als den Normbezugsbedingungen arbeitet, die Leistungsangabe entsprechend den gültigen Bezugsbedingungen (vgl. Tabelle 2.2) umgerechnet werden (Leistungskorrektur).

2.3 Betriebseigenschaft von Motoren

Für die Realisierung des Kreisprozesses zur Gewinnung nutzbarer mechanischer Energie ist bei den Verbrennungsmotoren der mit den Takten des Arbeitsprozesses in der Größe veränderliche Arbeitsraum erforderlich (vgl. Bild 2.1). Die dafür notwendige oszillierende (hin und her gehende) Bewegung des Kolbens wird mit dem Kurbelgetriebe aus der Drehbewegung der Kurbelwelle und des Schwungrades erzeugt. Die gewünschte mechanische Energie wird beim Arbeitsprozess im Verlauf der Kolbenbewegung aus dem Arbeitsgas entnommen. Sie stammt ausschließlich von der im Arbeitsraum bei der Verbrennung freigesetzten Wärme.

Der während des Arbeitsprozesses gemäß den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik veränderliche Gasdruck p_G ergibt an der Kolbenquerschnittsfläche $A_K = \pi \cdot d^2/4$ die veränderliche Gaskraft F_G . Daneben tritt wegen der ungleichförmigen Bewegung der Bauteile zusätzlich noch die sogenannte oszillierende Massenkraft F_{mo} auf. Die Massenkraft nimmt mit dem Quadrat der Drehzahl zu. Die Gaskraft und die Massenkraft überlagern einander (Bilder 2.8 und 2.9). Beim Arbeitstotpunkt (AOT) sind Gaskraft und Massenkraft einander entgegengerichtet. Das bedeutet, die resultierende Gesamtkolbenkraft F_K , die letztlich als Belastung für die Bauteile wirkt, nimmt umso mehr ab, je größer die Drehzahl ist. Dieser Zusammenhang bildet den Hintergrund für die mehr oder weniger bekannte Regel, wonach Motoren bei mittleren Drehzahlen und kleiner Last in mittleren Gängen und mit wenig «Gas» warm gefahren werden sollten. Betrieb bei kleiner Drehzahl und großer Last «quält den Motor».

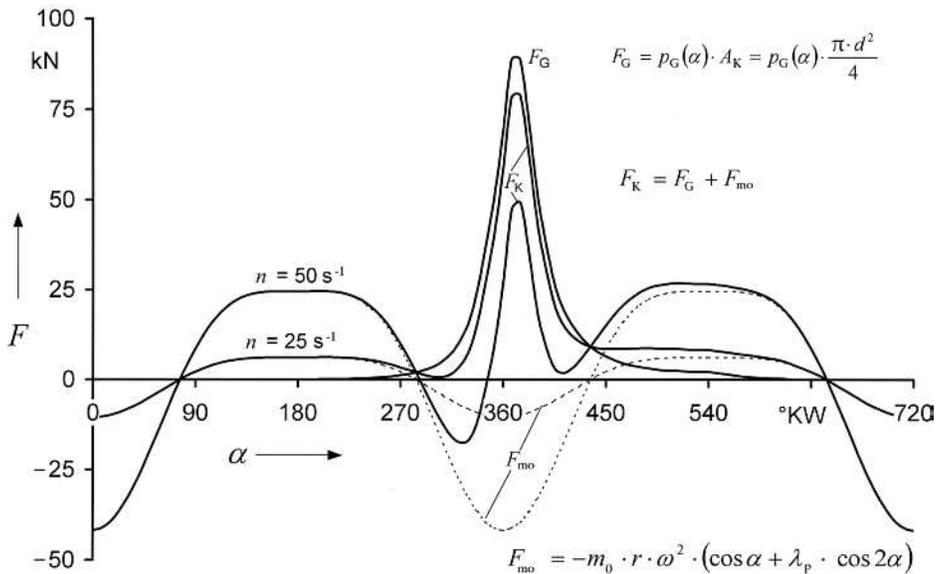


Bild 2.8 Gas- und Massenkraftverlauf über ein (4-Takt-)Arbeitspiel

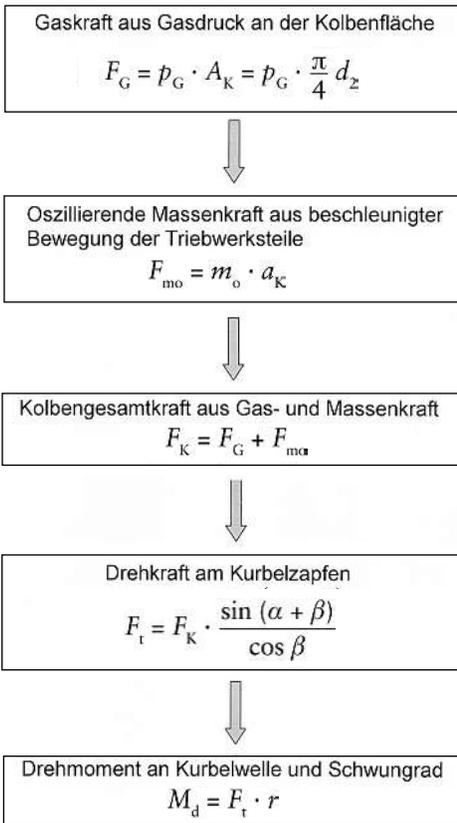


Bild 2.9 Kräfte im Motor:
Kraftfluss-Schaubild schematisch

Die Kräfte werden vom Pleuel über den Pleuel an den Pleuelzapfen weitergeleitet (Bild 2.10) und an der Pleuelwelle in das am Pleuelrad abnehmbare Nutzdrehmoment umgewandelt. Dabei muss leider auch ein entsprechender Verlust infolge Reibung in Kauf genommen werden. Weiterführende Ausführungen sind in [2.9] zu finden.

Die bisherigen Betrachtungen gelten für jeweils einen Lastzustand, z.B. für die Nennleistung bei Nenndrehzahl mit dem dazugehörigen Drehmoment. Nun werden Motoren je nach Leistungsanforderung mit unterschiedlicher Drehzahl und Belastung (\triangleq Drehmoment M bzw. mittlerer effektiver Pleuelndruck p_{me} oder spezifische Arbeit w_e) betrieben. Die Zuordnung der möglichen Arbeitspunkte eines Motors in Abhängigkeit von Last und Drehzahl ist der Motorbetriebsbereich. Die Darstellung des Motorbetriebsbereiches wird als *Motorkennfeld* bezeichnet. In einem Motorkennfeld sind alle Last- und Drehzahlpunkte, bei denen ein Motor betrieben werden kann, und weitere darzustellende Kenngrößen enthalten. Die Begrenzungen für den Arbeitsbereich eines Motors ergeben sich gemäß Bild 2.11 aus der «unteren» Leerlaufdrehzahl n_{LL} , dem maximalen Drehmoment M_{dmax} und der Abregelkurve (Maximaldrehzahlbe-

Bild 2.10 Kräfte am Triebwerk

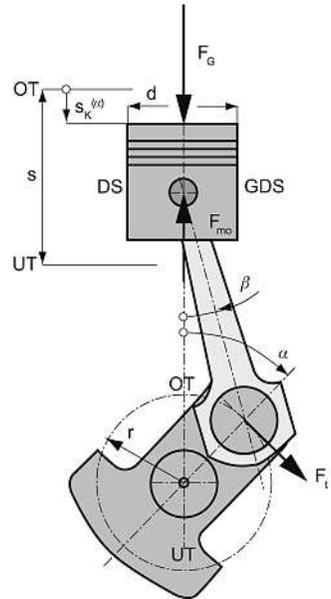
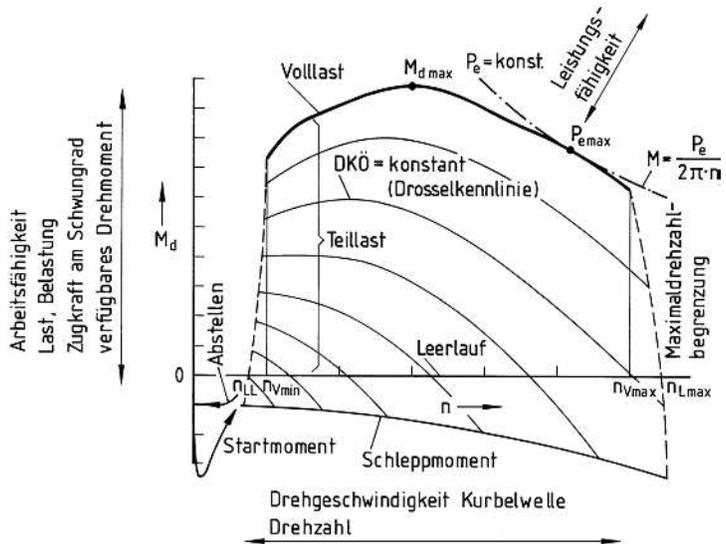


Bild 2.11 Darstellung Betriebsbereich Motor («Kennfeld») und Begriffe



grenzung) (s. Bild 2.11). Wird der Motor vom Fahrzeug angetrieben, z.B. bei Gefällefahrt oder bei einem Umsteuermanöver eines Schiffes, dann erweitert sich der mit dem Kennfeld beschriebene Betriebsbereich um einen negativen Bereich bis zu dem sogenannten Schleppmoment.

Motorkennfelder

Motoreigenschaften als Funktion von Drehzahl und Drehmoment
Viertakt-Dieselmotor Bohrung ca. 125 mm

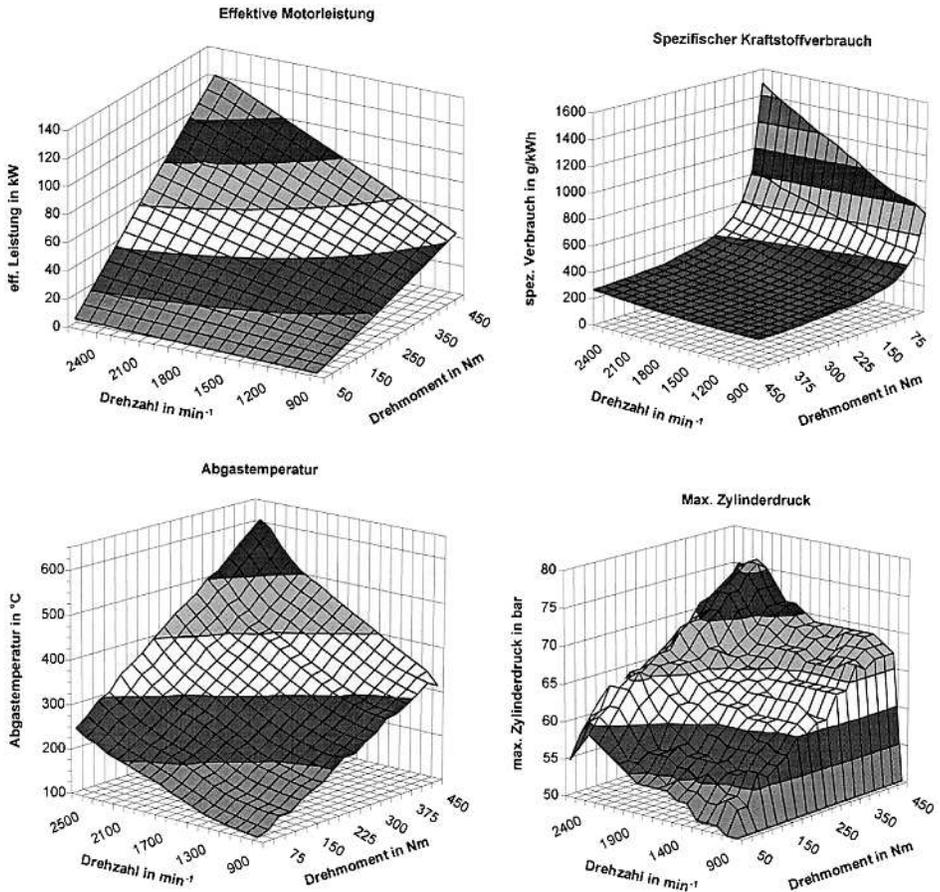


Bild 2.12 Dreidimensional dargestellte Kennfelder eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors

Das Kennfeld gibt den Zusammenhang zwischen physikalisch-technisch voneinander abhängigen Größen wie z. B. Drehmoment, Drehzahl und Leistung sowie weiteren wichtigen Kenngrößen an. Dieser Zusammenhang kann

- direkter Art sein, wie z. B. die Abhängigkeit der Leistung von Drehmoment und Drehzahl ($P = M \cdot 2 \pi \cdot n$) oder
- indirekter Art, wenn sich nämlich so viele Einflüsse auf eine Größe auswirken, dass ihr Verlauf nicht mehr eindeutig auf 1 oder 2 Ausgangsgrößen zurückgeführt werden kann. Beispiele: Abhängigkeit des Maximaldrucks im Zylinder oder des Wirkungsgrades bzw. des Kraftstoffverbrauchs von Drehmoment und Drehzahl.

Zur Darstellung des Motorbetriebsbereiches ist an der Abszisse (waagerechte Diagrammchse) die Motordrehzahl und an der Ordinate (senkrechte Diagrammchse) das Drehmoment anzutragen. So ist jeder Arbeitspunkt innerhalb des Motorbetriebsbereiches eindeutig als Schnittpunkt einer Drehzahl- und einer Drehmomentgeraden bestimmt. Die Kurven konstanter Motorleistung P_e ergeben sich in dieser Darstellung gemäß der Beziehung $M = P_e / (2 \cdot \pi \cdot n)$ als Hyperbeln (s. Bild 2.13). Für die einzelnen Schnittpunkte des Drehmoments und der Drehzahl werden alle interessierenden Motorkenngrößen gemessen bzw. berechnet und deren Werte aufgetragen: an der x -Achse die Drehzahl, an der y -Achse das Drehmoment und an der z -Achse die jeweilige Kenngröße, z.B. der absolute Kraftstoffverbrauch. Auf diese Weise ergeben sich 3-dimensionale Kennflächen (s. Bild 2.12).

Da mit 3-dimensionalen Darstellungen schlecht zu arbeiten ist, wird die jeweilige Größe auf die Drehzahl-Drehmomentebene projiziert. Hierzu sind an den Schnittpunkten der Drehzahl- und Drehmomentgeraden die Zahlenwerte der gemessenen Größe einzutragen. Und alle Punkte gleichen Zahlenwertes werden miteinander verbunden (das macht heute natürlich das Rechenprogramm). So ergeben sich Linien bzw. Kurven gleicher Motorkennwerte – analog den Höhenlinien einer Landkarte! Das bekannteste Beispiel dafür sind die Linien gleicher spezifischer Kraftstoffverbräuche b_e , die wegen ihrer Ähnlichkeit mit der Riffelung bestimmter Muschelarten auch als *Muschelkurven* bezeichnet werden (Bild 2.13).

Bild 2.13

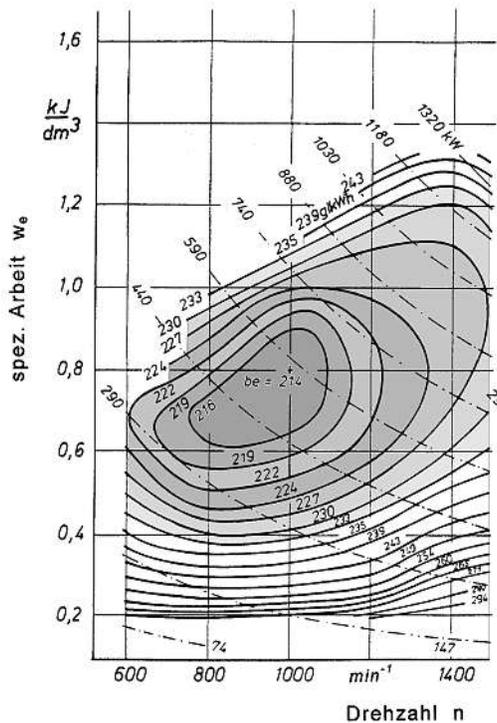
Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs («Muschelkurven»)

Das Drehmoment M ist für einen gegebenen Motor mit

$$M = w_c \cdot \frac{V_h \cdot z}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{T_U}{T_A}$$

aus der spezifischen Arbeit w_c (Energiedichte) zu berechnen. Der spezifische effektive Kraftstoffverbrauch b_e ist zu berechnen als das Verhältnis von verbrauchtem Kraftstoffmassenstrom \dot{m} zu der am Schwungrad abnehmbaren effektiven Leistung P_e . Es ist

$$b_e = \frac{\dot{m}_k}{P_e} = \frac{m_k}{W_e}$$



Analog wird mit allen anderen Messgrößen verfahren. Im Zuge einer Motorentwicklung, aber auch bei allen anderen Entwicklungsschritten werden die relevanten Motoreigenschaften gemessen und in Kennfeldform ausgewertet. Als Beispiel für den Umfang solcher Untersuchungen seien Messungen und deren Auswertung für einen schnellaufenden Dieselmotor angeführt:

absoluter Kraftstoffverbrauch;	Gesamtluftmassenstrom;
spezifischer Kraftstoffverbrauch;	Ladungsaufwand, Luftaufwand;
Schwärzungsziffer;	Spritzbeginn;
Abgastemperaturen vor und nach Turbine;	Druckzunahmegeschwindigkeit;
Turbinendrehzahl;	Zündbeginn und Zündverzug;
Ladeluftdruck;	Spritzdauer;
Maximaldruck im Zylinder;	Kurbelgehäuse-Entlüftungsstrom;
Luftdurchsatz;	durch Ölwärmetauscher abgeführter Wärmestrom;
spezifischer Luftdurchsatz;	
Einspritzmenge;	durch Motorkühlsystem abgeführter Wärmestrom;
Füllungswinkel;	durch Ladeluftkühler abgeführter Wärmestrom.
Abgasvolumenstrom;	

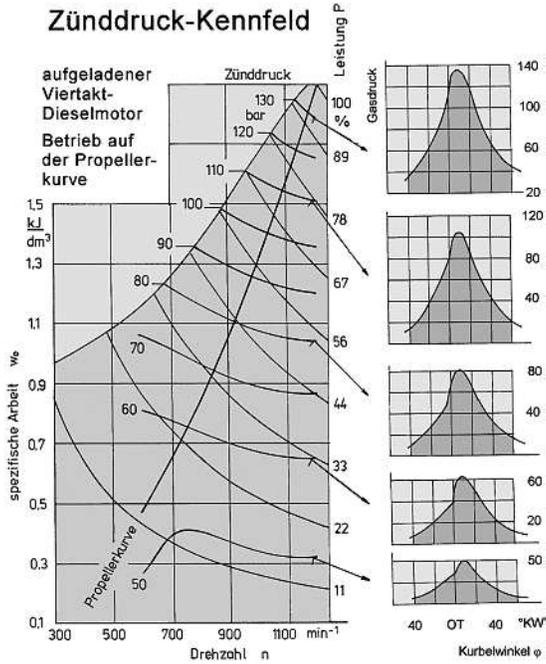
Im Zusammenhang mit der Bauteilentwicklung werden gezielt spezielle Größen gemessen wie z.B. Lager-, Kolben- oder Ventilttemperaturen, Drehschwingungsaus-schläge und Schwingungsaus-schläge an Bauteilen, Schadstoff- und Geräuschemission usw. Solche Kennfelder können eine wertvolle Hilfe beim Ergründen tieferliegender Ursachen für Schäden an Motorbauteilen sein (s. Bilder 2.14 und 2.15).

Bei Wechsel des Arbeitpunktes innerhalb des Betriebsbereiches ändert sich mit der Zuordnung von Drehzahl und Drehmoment auch das Verhältnis von Gas- und Mas-senkräften zueinander (s. Bild 2.8). Der Gasdruckverlauf, insbesondere der Maximal-druck, hängt – in etwa – direkt von der spezifischen Arbeit w_e (bzw. Drehmoment M) ab, die Massenkräfte nehmen im Quadrat mit der Drehzahl zu. Somit ist der Motor mit seinen Bauteilen einer 2-fachen Belastungsänderung unterworfen:

- ❑ einer hochfrequenten (engl.: *high-cycle frequency*, *HCF*) im Verlaufe der Arbeits-spiele und
- ❑ einer niederfrequenten (engl.: *low-cycle frequency*, *LCF*) infolge des Wechsels von einem Betriebspunkt (gegeben mit Drehmoment bzw. Energiedichte und Drehzahl) zum anderen.

Die hochfrequent ablaufenden Lastwechsel sind Ursache vieler Schäden an Motorbauteilen, weil Werkstoffe auf schnelle dynamische Belastungsänderungen sehr viel empfindlicher reagieren als auf niederfrequente bzw. quasistatische. Die Bedeutung der niederfre-quenten Belastungsänderungen ist lange Zeit nicht richtig erkannt worden. Doch zeigen die Erfahrungen mit Motoren bei Betrieb unter wechselnder Drehzahl und Last, wie ungünstig diese selbst bei kleiner Belastung sein können. Die Zusammenhänge lassen sich recht gut anhand der Wechselbelastungen erklären, denen beispielsweise ein Pleuel während des Motorbetriebs unterworfen ist. Die sehr schnell ablaufenden zyklischen

Zünddruck-Kennfeld



Lagertemperaturen-Kennfeld Viertakt- Nfz-Dieselmotor Meßstelle 1 mm unter Lauffläche

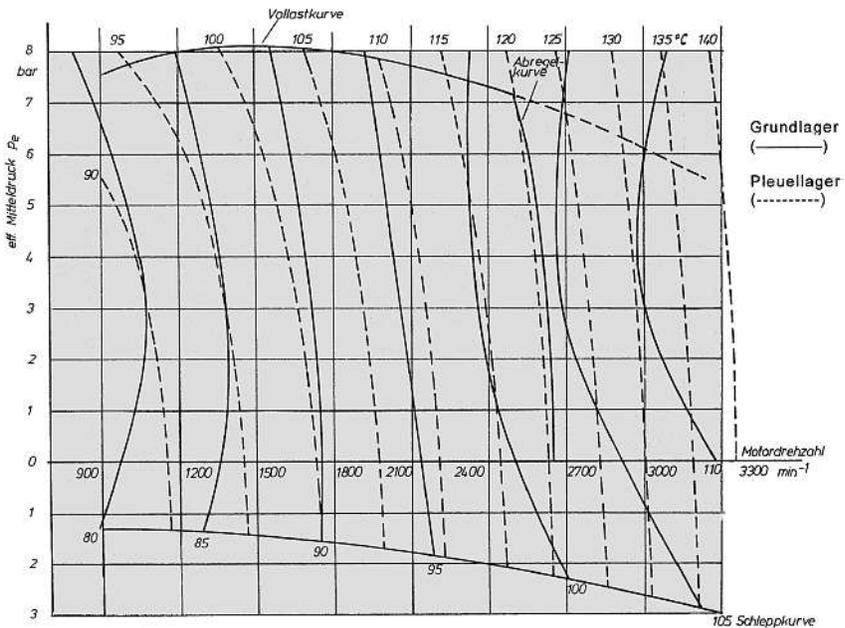


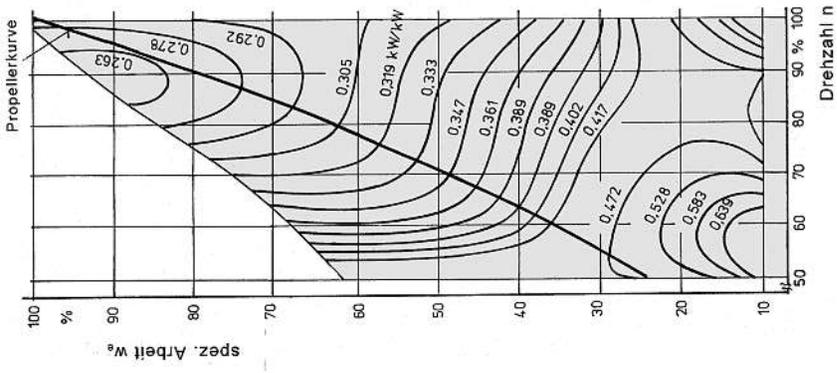
Bild 2.14 Mit Kennfeldern werden wesentliche Kenngrößen und Eigenschaften eines Motors, seiner Bauteile und Funktionsgruppen dargestellt.

Oben: «Zünddruck» und Druckverläufe im Zylinder

Unten: Temperaturen in Grund- und Pleuellager

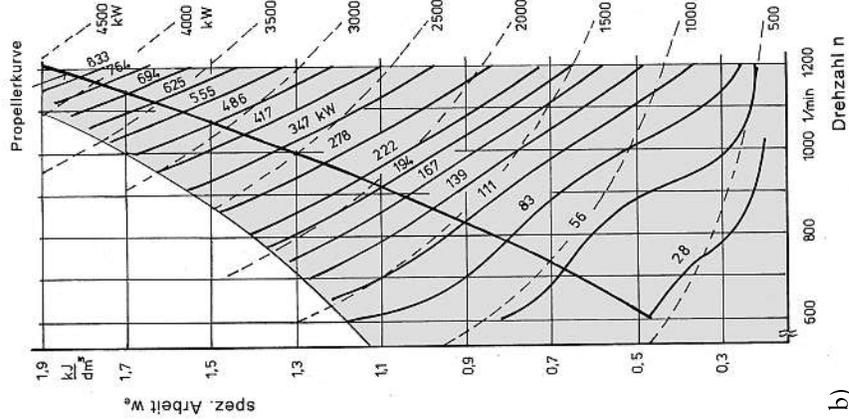
(Anm.: Der Begriff Zünddruck meint den Maximaldruck bei der Verbrennung im Zylinder und nicht den Druck, bei dem die Entzündung erfolgt ist. Insofern ist dieser überkommene Begriff missverständlich).

im Motorwasserkühler abgeführter Wärmestrom bezogen auf die Motorleistung
Viertakt-Dieselmotor



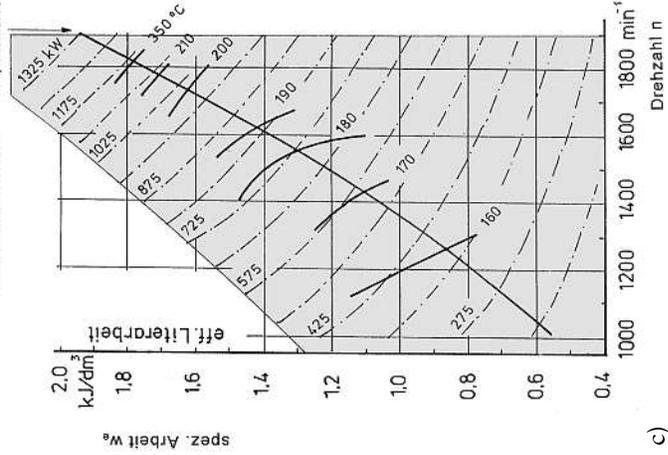
a)

im Ladeluftkühler abgeführter Wärmestrom
Viertakt-Dieselmotor



b)

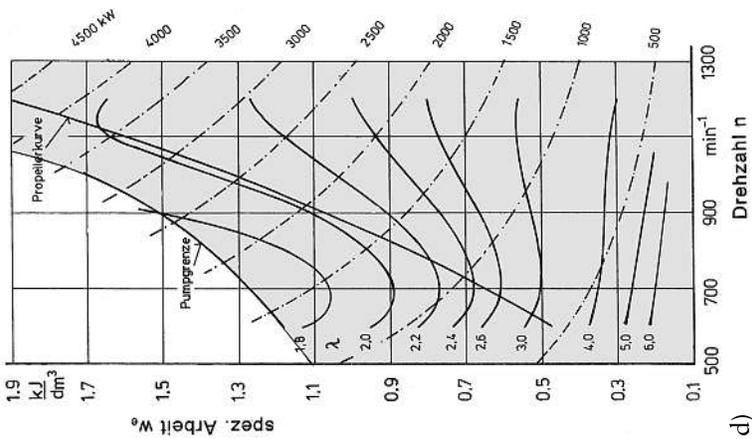
Kennfeld der Zylinderkopftemperatur am Auslassventilsitz
Viertakt-Dieselmotor



c)

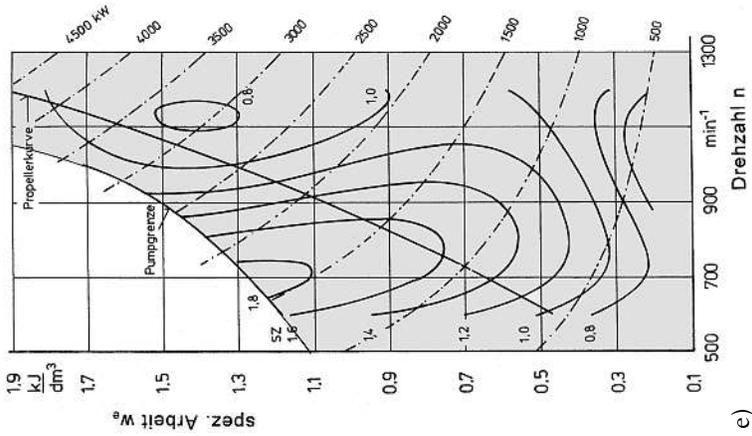
Bild 2.15 a-c Beispiele für Kennfelder von wichtigen Motorkenngrößen

Kennfeld Gesamtluftverhältnis λ



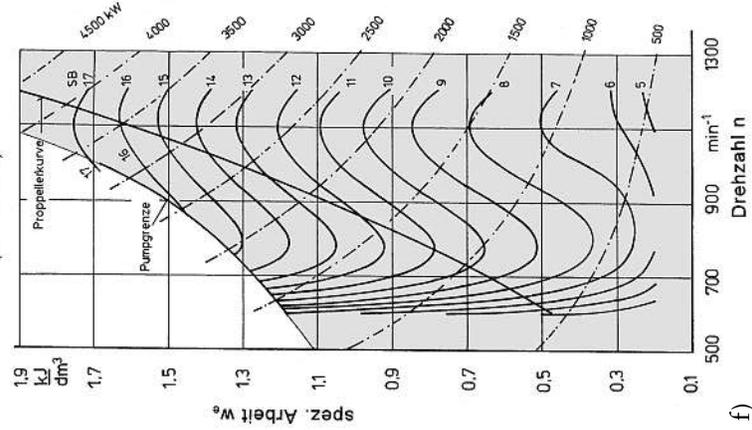
d)

Kennfeld Schwärzungsziffer SZ



e)

Kennfeld Spritzbeginn SB
(in °KW vOT)



f)

Bild 2.15d-f (Fortsetzung)

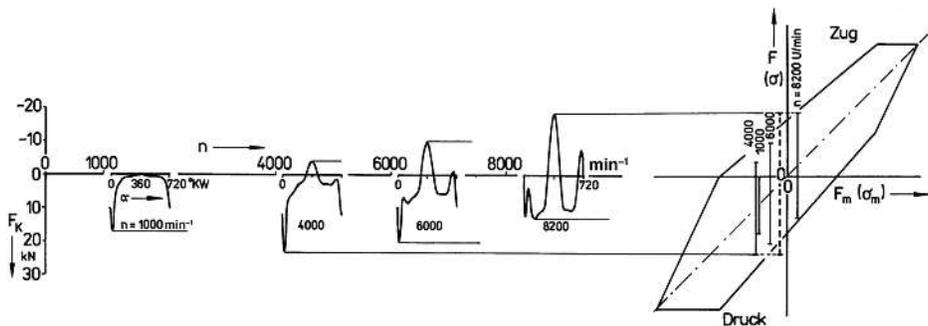


Bild 2.16 Hoch- und niederfrequente Zug-/Druck-Belastungen beim Pleuel eines schnelllaufenden Ottomotors (Volllast)

Links: zeitliche Kraftverläufe bei unterschiedlichen Drehzahlen

Rechts: Beanspruchung des Pleuelschaftquerschnitts im Smith-Diagramm

Die bei gegebener Drehzahl im Verlaufe der Arbeitsspiele vergleichsweise schnell ablaufende zeitliche Änderung der Belastung bzw. Beanspruchung des Pleuels ist ein hochfrequenter Vorgang (*high-cycle frequency*).

Die mit der Drehzahländerung vergleichsweise langsam ablaufende Belastungsänderung ist ein niederfrequenter Vorgang (*low-cycle frequency*).

Belastungsänderungen bei den jeweiligen Drehzahlen im Verlaufe der Arbeitsspiele sind als hochfrequent (*high-cycle frequency*) und die außerdem noch zusätzlich mit der Drehzahl- und Laständerung wesentlich langsamer auftretenden Veränderungen der Kraftverläufe sind als niederfrequent (*low-cycle frequency*) anzusehen (Bild 2.16). Die Darstellung der zeitlichen Verläufe im Smith-Diagramm zeigt, dass jeder einzelne Belastungsverlauf für sich genommen der Dauerfestigkeit des Werkstoffes entspricht. Wird jedoch die Belastungsänderung bei den Kraftverläufen über den gesamten Betriebsdrehzahlbereich berücksichtigt (im Smith-Diagramm gestrichelt dargestellt), dann ist ersichtlich, dass die Dauerfestigkeit des Werkstoffes im Beispiel den Anforderungen doch nicht genügt. Eine ordnungsgemäße Bauteilauslegung erfordert also stets die Berücksichtigung auch der niederfrequent ablaufenden Drehzahl- und Laständerungen. Schließlich sind Motorbauteile auf Dauerfestigkeit auszulegen.

Unterschiedliche Lastkollektive mit entsprechenden Auswirkungen auf die Bauteilbelastung ergeben sich auch, je nachdem welche Maschinenart der Motor anzutreiben hat, da sich mit Drehzahl und Drehmoment die Größe der Gas- und der Massenkräfte ändert (vgl. Bild 2.8). Die Zahl der Lastwechsel hängt von der Drehzahl und von der Auslastung der Motoren ab. Darunter ist zweierlei zu verstehen:

- die *zeitliche Auslastung*, nämlich wie viele Stunden ein Motor im Jahr in Betrieb ist. Das hängt von der Motorart und dem jeweiligen Einsatzfall ab:

Der Motor eines Pkw mit einer jährlichen Fahrstrecke von 20 000 km kommt – eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h angenommen – auf ganze 400 Betriebsstunden (ca. 16,7 Tage). Bei Nutzfahrzeugen hängt die Auslastung sehr von den Einsatzbedingungen ab: Fernverkehr, Nahverkehr, Verteilerverkehr oder Bau-

stellenbetrieb. Je nachdem wird mit Fahrstrecken von 200 000, 90 000, 50 000 oder 10 000 km gerechnet. Schiffsmotoren sind bis zu 6000...7000 h im Jahr eingesetzt;

- *der Anteil von Volllast, Teillast und Leerlauf an der Betriebszeit des Motors.* In [2.2] wird für Pkw-Motoren das Maximum des Betriebszeitanteils bei weniger als etwa 20% der Last (Drehmoment) und unterhalb 50% der Drehzahl angegeben (vgl. Bild 2.17).

Nutzfahrzeugmotoren und Motoren für allgemeine Verwendung haben unterschiedliche Lastprofile, die von den Motorherstellern, nach Motorbaureihen getrennt, angegeben werden [2.3; 2.4].

- Motoren zum Antrieb von Arbeitsmaschinen wie Pumpen. Kompressoren oder Baumaschinen haben einen vergleichsweise großen Volllastanteil an der Gesamtbetriebszeit (s. Bild 2.18).
- Bahnmotoren (Rangier- und Streckenlokomotiven, Triebwagen) werden in Europa – anders als in den USA – relativ wenig ausgelastet, so arbeiten z.B. Industrielokomotiven (Rangier- und Zubringerdienst) 75 % ihrer Betriebszeit im Niedriglastbereich [2.5]. Auch bei Streckenlokomotiven ist der Volllastanteil gering (s. Bild 2.19).
- Bei Schiffen ist die Auslastung groß [2.6]: Konventionelle Fährschiffe fahren rund 40 % ihrer Betriebszeit mit maximaler Leistung, Tragflügelboote und schnelle Fähren (Water-Jet-Antrieb) sogar bis zu 80 %! (s. Bild 2.20).

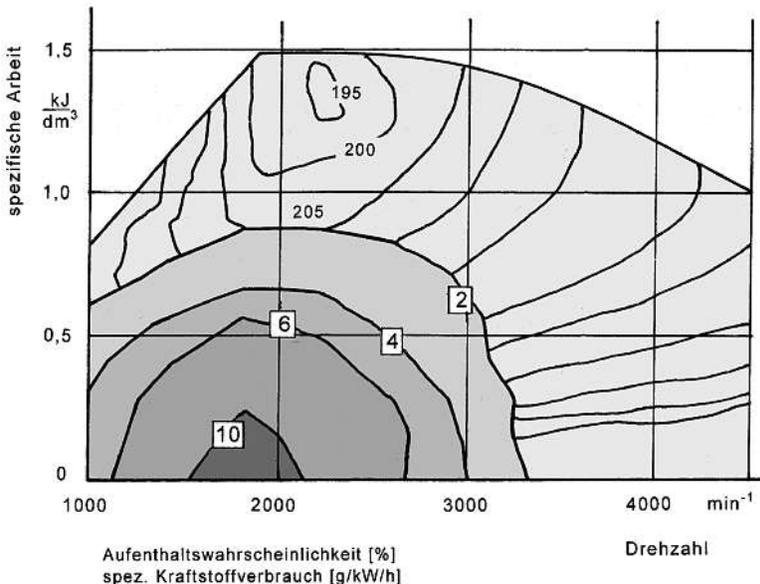
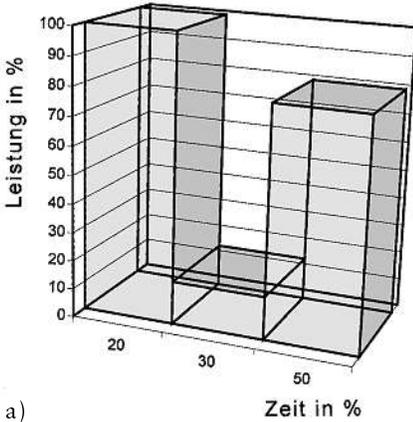


Bild 2.17 «Aufenthaltswahrscheinlichkeit» im Verbrauchskennfeld eines größeren Pkw-Motors beim Befahren einer Überlandstrecke

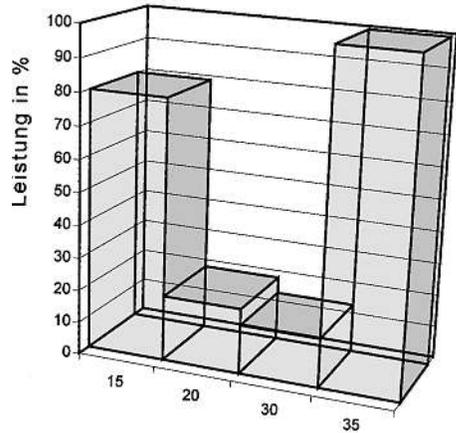
Nun ist *Leistung* ein universeller Begriff. Leistung ist das Produkt aus Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit, so dass sich je nach Einsatzprofil andere Zuordnungen dieser Größen ergeben. Für ein mittelschweres Nutzfahrzeug im Verteilerverkehr sind die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen nachfolgend dargestellt: Die relative Häufigkeit von Fahrgeschwindigkeit, Motormoment und Motordrehzahl (s. Bild 2.21) und – weiter in die Tiefe gehend – die Motorkühlerwasser- und Schmieröltemperaturen (s. Bild 2.22).

Pumpen und Kompressoren



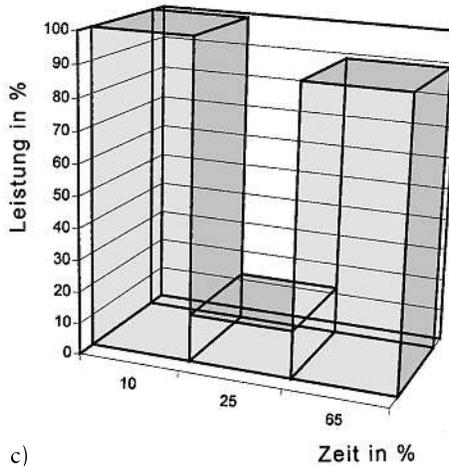
a)

schwere Baumaschinen



b)

Dauerstromaggregate



c)

Bild 2.18 Auslastung von Motoren beim Antrieb von Arbeitsmaschinen

Der Drehzahl/Drehmoment-Anteil an der Leistung und die Dauer der jeweiligen Leistungsabgabe bestimmen die Belastungskollektive der Bauteile und wirken sich somit auch auf die Schadanfälligkeit und Schadhäufigkeit aus (s. Bild 2.23). Das schlägt sich auch in den Vorschriften der Motorhersteller bezüglich der Wartungsfristen nieder, wie sie aufgrund von langjährigen Betriebserfahrungen entstanden sind [2.6].

Die Betriebsbedingungen der Motoren sind unterschiedlich. Selbst bei gleicher Anwendung und Motorart können sie sehr differieren. Das betrifft die objektiven Bedingungen genauso wie den Umgang des Fahrzeugführers bzw. des Maschinenpersonals mit den Motoren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Betriebsbedingun-

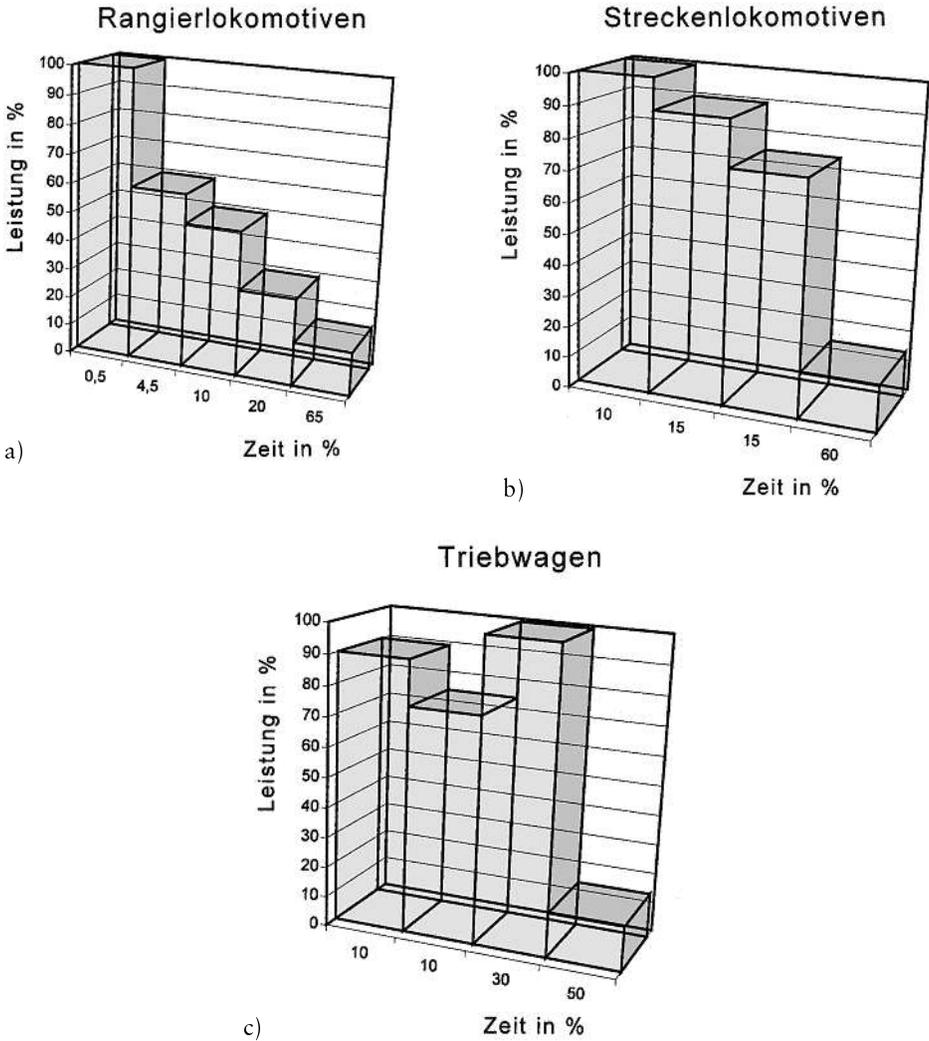
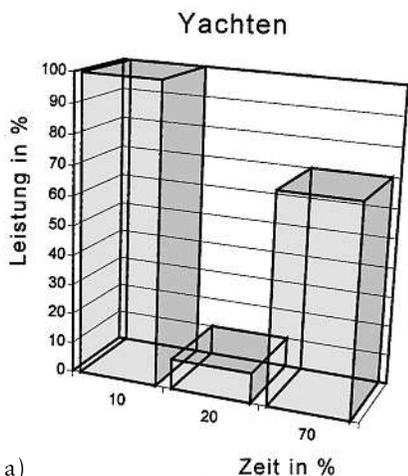
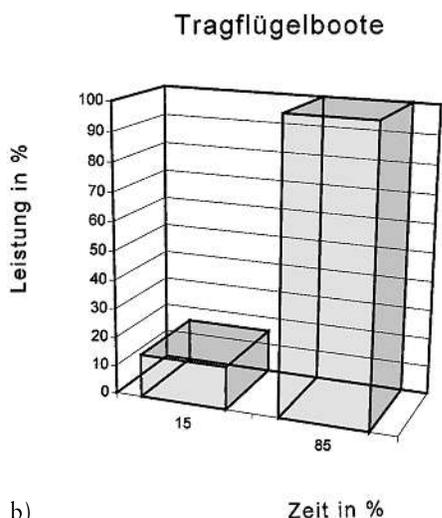


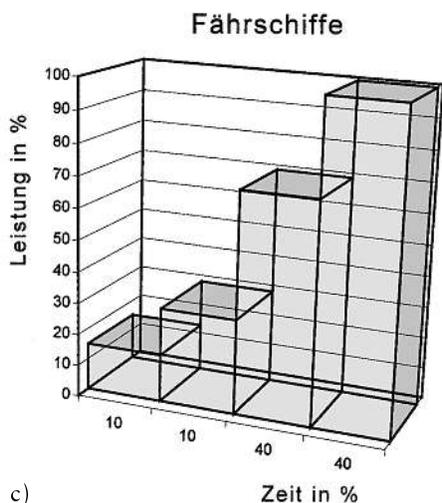
Bild 2.19 Auslastung von Bahnmotoren



a)



b)



c)

Bild 2.20 Auslastung von Schiffsmotoren

gen, die für eine Motorart als «normal» gelten, für andere unakzeptabel sind. Fahrzeugmotoren werden bei jeder Außentemperatur gestartet und betrieben. Größere und große Motoren würden eine solche Behandlung nicht vertragen. Kühlwasser und Schmierölvorwärmung sind hier unverzichtbar.

Die objektiven, d.h. von der Sache her gegebenen Bedingungen definieren sich nicht nur über die Belastungskollektive von Drehmoment und Drehzahl, sondern zusätzlich anhand anderer Faktoren. Bei Fahrzeugen sind es Starthäufigkeit, Betriebszeit im Niedriglastbereich oder plötzliche Belastungsänderungen sowie Einflüsse von Klima und Topografie [2.7; 2.8]:

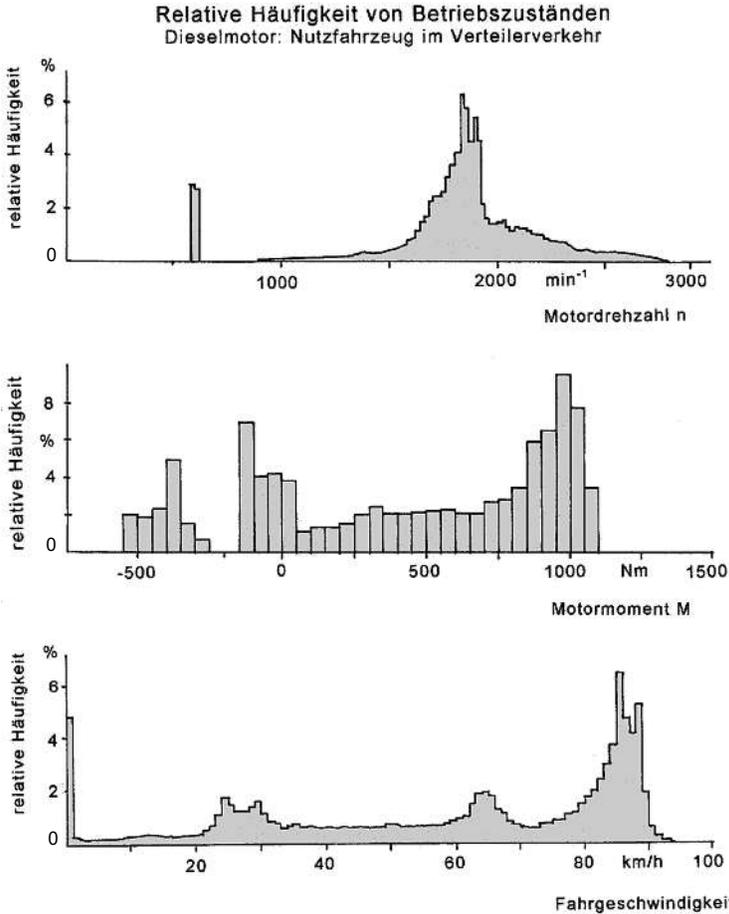


Bild 2.21 Relative Häufigkeit von Drehzahl, Moment und Fahrgeschwindigkeit für ein Nutzfahrzeug im Verteilerverkehr

- ❑ **Schnelle Autobahnfahrt:**
Fernverkehr mit langen Fahrstrecken, gleichmäßige Geschwindigkeit mit großen Drehzahlen bis zur Abregeldrehzahl, zuweilen schnelle und große Drehzahländerungen, nur wenige Leerlaufphasen.
- ❑ **Autobahnstau bzw. Autobahnausfahrt:**
Leerlauf und kleine Drehzahlen mit zuvor heißgefahrem Motor und Schmierstoff.
- ❑ **Landstraßen:**
mittlere Drehzahlen, wenig und langsam veränderliche Drehzahlen.
- ❑ **Gemischter Verkehr in Stadt- und Wohngebieten:**
noch fließender Verkehr, häufige Schaltvorgänge.

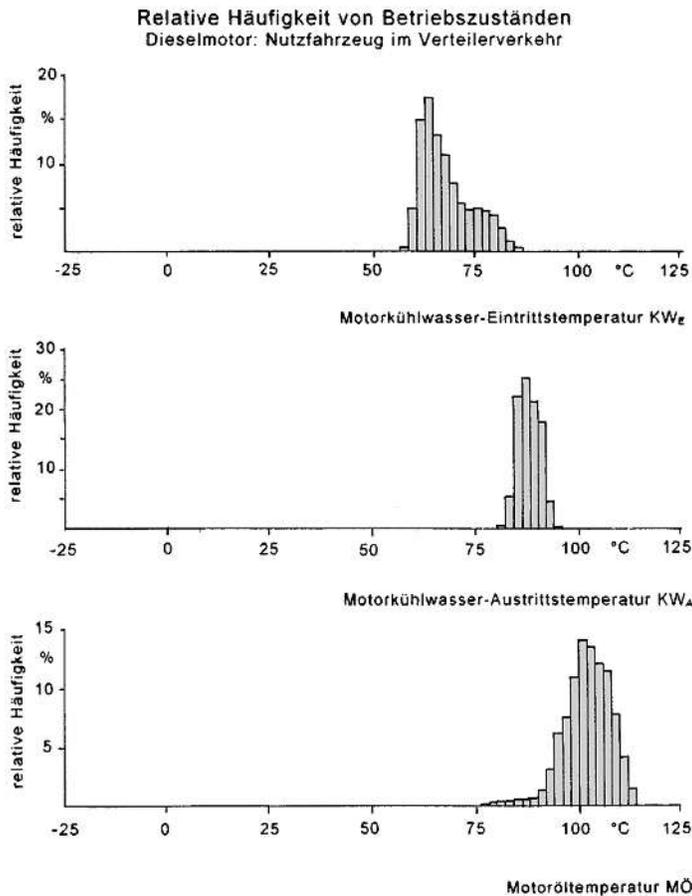
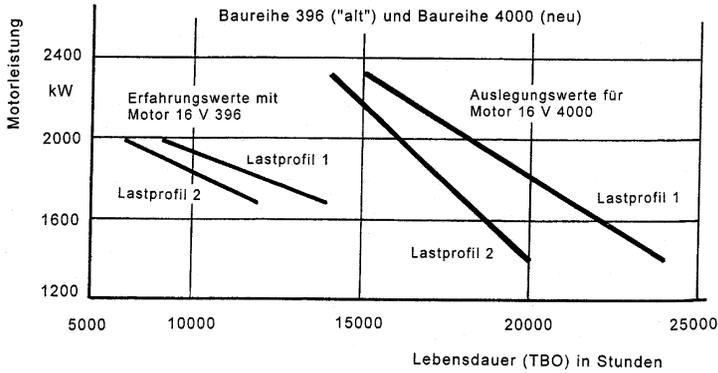


Bild 2.22 Relative Häufigkeit der Motor-Kühlwasser- und Schmieröltemperaturen eines Nutzfahrzeugs im Verteilerverkehr

□ Extremes Kurzstreckenbetriebs:

kalter Motor, Stillstandsphasen mit häufigen Starts und langem Leerlaufanteil, meist kleine Drehzahlen.

Im europaweiten Langstreckenverkehr kann eine Temperaturspanne zwischen mehr als 30 °C bis weniger als -10 °C durchfahren werden. In den USA sind diese Temperaturen noch unterschiedlicher. Die Steigungsstrecken der Hochgebirgspässe bedeuten insbesondere für Nutzfahrzeugmotoren eine erhebliche Verschärfung des Betriebs. Das sind die Betriebsbedingungen, die gleichermaßen den Motor mit seinen Bauteilen belasten und den Verschleiß forcieren, wie z.B. beim Ventiltrieb (Bilder 2.24 und 2.25), den Kraftstoffverbrauch zunehmen lassen und die Ölalterung beschleunigen.



		Zeitanteil in %	
Leistung in %	Lastprofil 1	Lastprofil 2	
100	75	85	
< 15	25	15	

Bild 2.23 «Lebensdauer»erwartung in Abhängigkeit von Lastprofil und Leistung

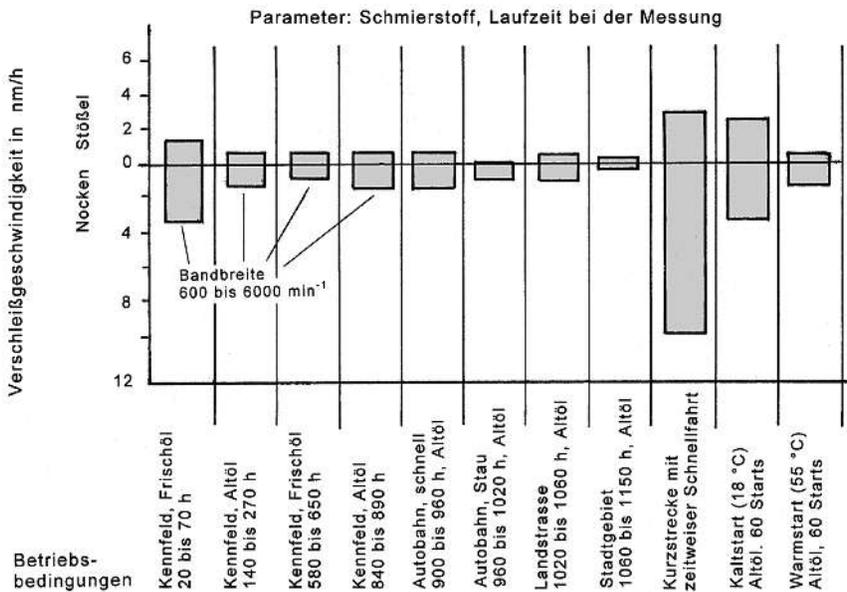


Bild 2.24 Verschleiß im Ventiltrieb abhängig von den Betriebsbedingungen

In Ländern des vorderen und mittleren Orients, in Mittel- und Südamerika sowie in Afrika und in asiatischen Ländern sind die Motoren weiteren Erschwernissen ausgesetzt, z. B. infolge

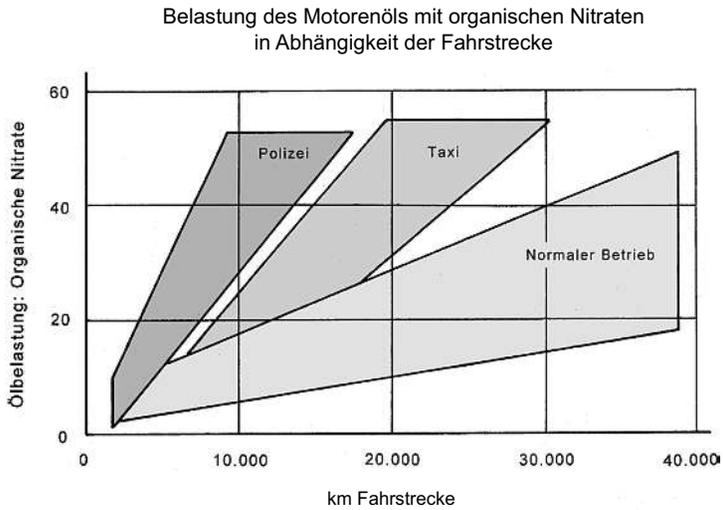


Bild 2.25 Ölbelastung infolge ungünstiger Betriebsbedingungen



Bild 2.26 Verkehr auf einer Überlandstrecke in Bolivien. Das Raster auf dem Bild ist das Drahtgitter vor der Windschutzscheibe, mit dem diese vor Steinschlag von entgegenkommenden Fahrzeugen geschützt werden soll.

- beständiger Überlastung, so werden in Ländern mit entsprechender Topografie (z.B. Argentinien) teils Lastzüge mit bis zu 50 t Gesamtmasse von mangelhaft motorisierten Zugmaschinen bei nur 125 kW Motorleistung angetrieben,

- ❑ schlechter Straßenverhältnisse mit entsprechendem Staubgehalt in der Luft (Bild 2.26),
- ❑ Überalterung von Motoren und Fahrzeugen,
- ❑ Staub, Wasser, Salz in der Ansaugluft,
- ❑ minderwertige Kraftstoffe (insbesondere im Schiffsbetrieb),
- ❑ unsachgemäße Lagerung von Motoren vor der Inbetriebnahme (Bild 2.27),
- ❑ mangelhafte, oft notgedrungenerweise improvisierte Instandhaltung.

Diese Faktoren: Art und Dauer der Belastung, die Randbedingungen, wie sie im Zusammenhang mit der gesamten Maschinenanlage gegeben sind, und die Betriebsverhältnisse bestimmen die mechanische, thermische, elektrochemische und tribologische Belastung der einzelnen Motorbauteile. Diese führt zu entsprechenden Beanspruchungen, die ihrerseits Verschleiß, Verformungen, Risse und Brüche hervorrufen können. Es kommt zu Funktionsstörungen und Schäden bis hin zum Ausfall des Motors, mit möglicherweise erheblichen Folgen!

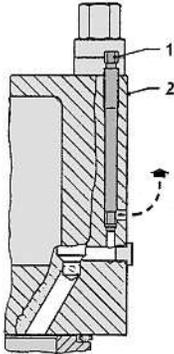
Um voraussehbare Schäden zu vermeiden, sind die Motoren mit einer Reihe von Schutzvorrichtungen versehen. Diese bewahren die Motoren vor Überdrehzahl (die zur Selbstzerstörung führt), vor Überlastung oder sonstigen unzulässigen oder gefährlichen Betriebszuständen. Solche Sicherheitsvorrichtungen sind Regler, Schnellschlussklappen, Explosionsschutzklappen, Dekompressionsventile u. a. mehr.



Bild 2.27

Der Ersatzmotor für ein Kraftwerk in Calafate ist vor dem Einbau eine geraume Zeit den patagonischen Sandstürmen ausgesetzt.

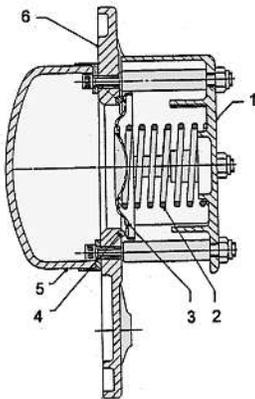
Dekompressionsventil



Eine Ventilbohrung mit Ventil Sitz im Zylinderkopf mit einer Ventilschraube bilden das Dekompressionsventil. Bei geöffnetem Dekompressionsventil ist die Ventilschraube losgeschraubt und der Ventilkegel vom Ventil Sitz abgehoben, so daß die Luft aus dem Zylinderraum über die Dekompressionsventilbohrung entweichen kann.

- | | |
|---|----------------------|
| 1 | Dekompressionsventil |
| 2 | Zylinderkopf |

Sicherheitsventil



Das Sicherheitsventil, bestehend aus Gehäuse, Schaulochdeckel, Ventilteller und Flammenschutz ist am Schauloch des Kurbelgehäuses angebaut. Auf der Innenseite des Schaulochdeckels ist ein Flammenschutz zur Verhinderung des Flammendurchtritts angeschraubt. Entsteht im Kurbelgehäuse Überdruck, so wird der Ventilteller bei Erreichen des Öffnungsdrucks gegen die Feder gedrückt und öffnet das Ventil. Bei Druckabfall wird das Ventil von der Feder wieder geschlossen.

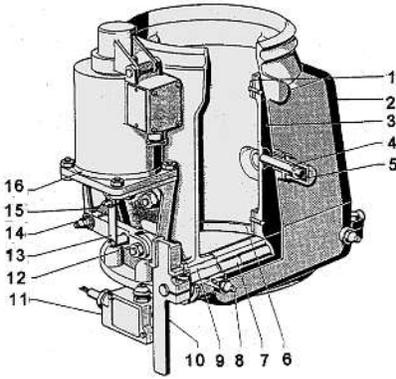
- | | | | |
|---|--------------|---|-----------------|
| 1 | Gehäuse | 4 | Dichtring |
| 2 | Feder | 5 | Flammenschutz |
| 3 | Ventilteller | 6 | Schaulochdeckel |

Bild 2.28 Sicherheitsvorrichtungen am Motor

Regler (Bild 2.29 unten) nehmen Schutzfunktionen primär wahr, indem sie ein «Durchgehen» des Motors bei plötzlicher Entlastung verhindern, sekundär indem sie die Füllung des Motors begrenzen, wenn Ladeluftdruck und -temperatur zulässige Werte übersteigen. Auch Grenzwerte für Öltemperatur und Öldruck oder Kühlmitteltemperatur lösen eine Füllungsbegrenzung bzw. Füllungsrücknahme aus.

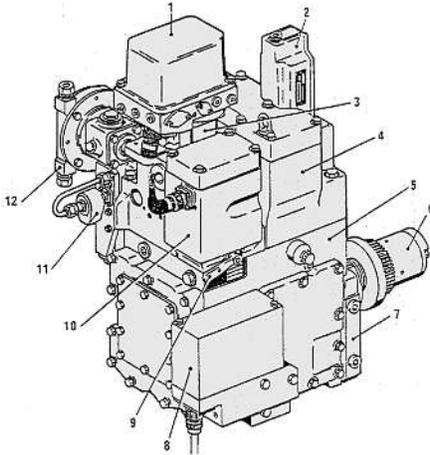
- ❑ Dekompressionsventile in Zylinderköpfen (Bild 2.28 oben) dienen zum Abbau von Überdrücken, wie sie z.B. bei großen 2-Takt-Motoren beim Crash-stop-Manöver auftreten können, wenn der Motor – noch vorwärtsdrehend – umgesteuert wird. Beim Start wird der Zylinderkopf mit dem Öffnen dieser Ventile durch eine Bohrung entlüftet. Sollte sich Wasser im Zylinder angesammelt haben, so wird das am Ausblasen erkennbar. Außerdem wird bei Wartungs- und Reparaturarbeiten mit offenen Dekompressionsventilen das Durchdrehen des Motors erleichtert.
- ❑ Schnellschlussklappen dienen zum Notstopp des Motors. Die Schnellschlussklappe (Bild 2.29 oben) sitzt im Ansaugrohr und unterbricht im Notfall die Luftzufuhr.

Schnellschlussklappe



Die Schnellschlussklappe ist eine Notabstelleinrichtung. In das Luftzuführungsrohr eingebaut, unterbricht sie die Luftzufuhr zu den Zylindern. Der Motor kommt dann sofort wegen Luftmangel zum Stillstand. Auf diese Weise wird der Motor schneller abgestellt, als es durch Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr möglich ist. Bei Überdrehzahl betätigt die Motorüberwachung einen Hubmagneten. Dieser gibt die Schnellschlussklappe frei, so daß sie – vom Luftstrom mitgerissen – zufällt, einen Endschalter betätigt und somit Meldung an die Überwachungseinrichtung gibt.

1	Dichtring	7	Welle	13	Lasche
2	Gehäuse	8	Kegelschmiernippel	14	Bolzen
3	Klappe	9	Lager	15	Drehfeder
4	Druckbolzen	10	Hebel	16	Hubmagnet
5	Feder	11	Kleinschalter		
6	Klappensitz	12	Hebel		



Motorregler

1	Steuergerät, elektrisch-hydraulisch für Sollwert
2	Füllungsaufnehmer
3	Sollwerteneinstellgerät
4	Reglerabtrieb
5	Grundregler
6	Drehelastischer Reglerantrieb
7	Ölpumpe
8	Elektronisch gesteuerte Füllungsbegrenzung
9	Abstellhebel
10	Abstellgerät (elektrisch)
11	Leerlauf-Drehzahlerhöhung
12	Notbetätigung über Teleflex

Bild 2.29 Sicherheitsvorrichtungen am Motor

Damit lässt sich der Motor meist schneller abstellen als mit dem Unterbrechen der Kraftstoffzufuhr.

- Explosionsschutzklappen im Kurbelgehäuse dienen als Sicherheitsventil gegen Überdruck im Kurbelgehäuse (Bild 2.28 unten, vgl. auch Pos. 7 in Bild 6.292). Bei einer Öldunstexplosion kann sich der Druck rasch abbauen – das Kurbelgehäuse wird vor Schaden geschützt.

3 Schaden: Definitionen, Begriffe

Ein *Schaden* ist – laut *Duden: Großes Wörterbuch* – eine «durch negative Einwirkungen, ungünstige Umstände, Ereignisse entstehende funktionelle und materielle Beeinträchtigung einer Sache und die Minderung, Herabsetzung ihres Wertes». Kürzer ist die Definition in [3.1]: «... Schaden: Verlust an Funktionsfähigkeit und notwendiger bzw. erwünschter Eigenschaften. Schaden ist das Ergebnis eines Prozesses – der Schädigung ...» Damit wird das Ergebnis – der Schaden – mit dem ihn hervorrufenden Vorgang – der Schädigung – in Verbindung gebracht. Nun ist *Schaden* ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Unterbegriffen, die in einer Richtlinie VDI 3822 (Blatt 1) wie in Tabelle 3.1 aufgelistet sind.

Ein Schaden ist das Ergebnis eines Vorgangs – der Schädigung –, der durch eine oder mehrere Ursachen ausgelöst wird. Diese Ursachen können im vom Schaden betroffenen Bauteil – dem Schadteil – selbst liegen – als Primärschaden, oder aber in anderen Bauteilen, deren Fehlfunktion, Störung oder Schaden sich auf das eigentliche Schadteil schädigend auswirken. Dabei steht die Ursache oft in keinem Verhältnis zu den Folgen.

Unabhängig von Schadenursachen, Schadenablauf, Schadenbild und der Art des betroffenen Bauteils, Funktionsgruppe, Maschine erklären sich Schäden aus einer Vielzahl von physikalischen, chemischen und elektrochemischen Vorgängen, wie sie in der VDI-Richtlinie 3822 zusammengestellt sind. Letztlich lassen sich alle Schäden an Maschinenteilen hierauf zurückführen.

□ Schäden durch mechanische Beanspruchungen

- Gewaltbruch
- Zäher Gewaltbruch
- Spröder Gewaltbruch
- Schwingbruch
- Schwingbruch mit zähem Restgewaltbruch
- Schwingbruch mit sprödem Restgewaltbruch

□ Schäden durch Korrosion in wässrigen Medien

Korrosionsarten ohne mechanische Belastung

- Gleichmäßige Flächenkorrosion
- Muldenkorrosion
- Lochkorrosion
- Spaltkorrosion

Tabelle 3.1 Begriffe und Definitionen

Begriff	Definition
<i>Schaden</i>	Veränderungen an einem Bauteil, durch die seine vorgesehene Funktion beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird oder die eine Beeinträchtigung erwarten lassen
Vorschaden	Früher am Bauteil oder an einer Anlage aufgetretener Schaden
Primärschaden	Zeitlich zuerst aufgetretener Schaden, der Ursache für weitere Schäden ist
Folgeschaden	Schaden, der durch einen vorangegangenen Schaden am gleichen oder an einem anderen Bauteil ausgelöst wird
Wiederholungsschaden	Wiederholtes Auftreten eines gleichartigen Schadens
<i>Schadenteil</i>	Vom Schaden betroffenes Bauteil oder Bruchstück eines Bauteils
<i>Schadenstelle</i>	Ort des Schadens am Bauteil
<i>Schadenbild</i>	Äußerer Zustand des beschädigten Bauteils
<i>Schadenmerkmale</i>	Charakteristische Kennzeichen eines Schadens
<i>Schadenablauf</i>	Zeitliche Entwicklung des Schadens
<i>Schadenart</i>	Zuordnung des Schadens zu einem bestimmten Schadenablauf
<i>Schadenanalyse</i>	Systematische Untersuchungen und Prüfungen zur Ermittlung von Schadenablauf und Schadenursache
<i>Schadenursache</i>	Summe der schadenauslösenden Einflüsse
<i>Schadenabhilfe</i>	Maßnahmen gegen die Wiederholung eines bestimmten Schadens
<i>Schadenverhütung</i>	Vorbeugende Maßnahmen gegen das Auftreten von Schäden

- Korrosion durch unterschiedliche Belüftung
- Kontaktkorrosion
- Korrosion durch Ablagerungen (Berührungskorrosion)
- Selektive Korrosion
- Säurekorrosion (Taupunktkorrosion)

Korrosionsarten bei zusätzlicher mechanischer Belastung

- Spannungsrisskorrosion
- Schwingungskorrosion

Wasserstoffinduzierte Korrosion

- Blasenbildung

- Rissbildung, Innenrisse
- Spannungsrisskorrosion
- Korrosion durch Druckwasserstoff unter 200 °C

Korrosion durch mikrobiologische Vorgänge

- Mikrobiologische Korrosion unter aeroben Bedingungen
- Mikrobiologische Korrosion unter anaeroben Bedingungen

□ **Schäden durch thermische Beanspruchungen**

Warmbruch

- Warmgewaltbruch
- Warmschwingbruch unter wechselnder mechanischer Beanspruchung bei erhöhter Temperatur
- Temperaturwechselbruch (Thermoermüdungsbruch)

Warmriss

- Schweißspannungsriss
- Zeitstandriss
- Temperaturwechselriss
- Schleifriss
- Härteriss
- Heißriss
- Lötriss
- Warmverformung

Thermische Oberflächenschädigungen

- Anlaufen
- Verzunderung
- Heißdampfoxidation
- Heißwasseroxidation
- Korrosion durch Schmelzen
- Hochtemperaturkorrosion
- Verbrennung
- Aufschmelzung (Anschmelzung)

Funktionsstörungen durch Ablagerungen

- Kesselstein, Wasserstein
- Versalzung
- Kieselsäurebeläge

Schädigung durch Diffusionsvorgänge

- Eindiffundieren von Stoffen aus der Umgebung
- Ausdiffundieren von Elementen aus Stahl

□ **Schäden durch tribologische Beanspruchungen**

Gleitverschleiß

- Gleitverschleiß bei Hydrodynamik
- Gleitverschleiß bei Elastohydrodynamik

- Gleitverschleiß bei Mischreibung
- Gleitverschleiß bei Festkörperreibung, technisch trocken

Wälzverschleiß

- Wälzverschleiß bei Hydrodynamik
- Wälzverschleiß bei Elasto hydrodynamik
- Wälzverschleiß bei Mischreibung
- Wälzverschleiß, technisch trocken

Schwingungsverschleiß

- Schwingungsverschleiß bei Mischreibung
- Schwingungsverschleiß, technisch trocken

Abrasivverschleiß

- Furchungsverschleiß
- Korngleitverschleiß

Strömungsverschleiß (Erosion)

- Hydroabrasivverschleiß
- Strahlverschleiß
- Gaserosion
- Tropfenschlagerosion
- Kavitationserosion

Der Vorgang der Schädigung kann unterschiedlich schnell verlaufen:

- explosionsartig, z. B. als Öldunstexplosion im Kurbelgehäuse,
- schlagartig z. B. als Flüssigkeitsschlag oder Beschädigung des Kurbelgehäuses durch ein freischlagendes Pleuel,
- exponentiell z. B. als Lager- oder Ring- und Kolbenfresser,
- langfristig als Schwingbruch (Dauerbruch) aufgrund einer Vorschädigung.

Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Schaden entwickelt ist u. a. entscheidend, ob der Schaden rechtzeitig bemerkt wird, so dass eingegriffen werden kann.

Bei der Bewertung von Motorschäden muss man unterscheiden zwischen dem «Schicksal» oder «Lebenslauf»

- eines einzelnen Motors und dem
- des Motortyps,

wobei solche Betrachtungen stets vor dem Hintergrund eines sog. «normalen» Motorverhaltens, d. h. dem jeweiligen Stand der Technik gemacht werden müssen.

Bei einem bezüglich Verhalten durchaus zufriedenstellenden Motortyp kann es einzelne Exemplare geben, die durch ihre Stör- bzw. Schadhäufigkeit auffallen. (Im Fahrzeugbau war einst in diesem Zusammenhang der Begriff «Montagsauto» gebräuchlich¹.) Die Schadensursache ist im zufälligen Zusammentreffen mehrerer

¹ Dieser Bezeichnung lag die Vorstellung zugrunde, dass die Arbeiter vom Wochenende her unausgeschlafen und deshalb nachlässiger ihre Arbeit verrichteten.

Badewannenkurve

Idealisierter Verlauf der Ausfallrate in Abhängigkeit von der Betriebsdauer

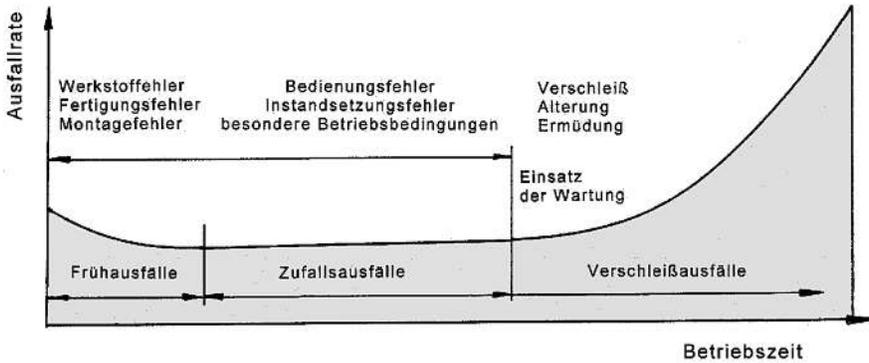


Bild 3.1 «Badewannenkurve»

Schadenursachen zu sehen. Dieses «Restrisiko» wird in der Berechnung von z. B. Wälzlager durch eine Überlebenswahrscheinlichkeit (90 %; 99 %) berücksichtigt. Für Nutzfahrzeugmotoren wird in [3.2] eine «B10-Lebensdauer» definiert, die darin besteht, dass bei Erreichen der vorgesehenen Fahrstrecke von 1 Mio. km erst für 10 % der Motoren eine Grundüberholung oder Ersatz durch einen neuen Motor erforderlich werden. Im Gegensatz dazu sind systembedingte Mängel zu sehen, z. B. infolge von Konstruktionsfehlern oder Fehlern durch unzureichende Erprobung.

Das «normale» Schadenverhalten eines Motors wird durch die sog. *Badewannenkurve* dargestellt, deren Bezeichnung sich aus ihrer Form erklärt: Der erste Teil der Kurve – flach abfallend, charakterisiert die *Einlaufphase* mit Zufallsausfällen, wie sie z. B. durch Fehler in Werkstoffen, Fertigung oder Montage auftreten können. Der sich daran anschließende Bereich der *Nutzungsphase* mit konstanter Ausfallrate durch z. B. Bedienungsfehler, Schmutz, Schwingungen, Lockerungen, Wasserschlag oder Wartungsfehler geht in einen dritten Bereich progressiv ansteigenden Verlaufs der Schadhäufigkeit über. Dieser Anstieg der Ausfallrate ist durch Verschleiß, Alterung oder Schwingbruch (Dauerbruch) gekennzeichnet. Durch entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen kann dieser Ast der Kurve nach rechts verschoben, können also Eintritt und Zunahme von Schadensfällen verzögert werden.

Ein Schaden ist das Ergebnis eines Vorganges, der ausgehend von einer oder mehreren Ursachen einen bestimmten, durch die jeweiligen Umstände beeinflussten Verlauf nimmt, sich zunächst als Funktionsstörung bemerkbar machen kann und – falls nicht rechtzeitig eingegriffen wird, zum Ausfall des Motors führt und weitere Schäden nach sich ziehen kann.

4 Ursachen von Schäden

4.1 Abnutzung

Aufgabe von Maschinen ist die Umwandlung von Energieformen sowie die Übertragung und Veränderung von Kräften, Momenten und Bewegungen. Dadurch werden die Bauteile der Maschine belastet, was in diesen, abhängig von Form, Dimensionierung, Gestalt, Werkstoff und Bearbeitung unterschiedliche Beanspruchungen – mechanische, thermische, tribologische und elektrochemische – hervorruft. Diese Beanspruchungen führen zur Abnutzung der Bauteile. Darunter versteht man eine unerwünschte Gebrauchswertminderung infolge physikalischer und/oder chemischer Einwirkungen. Das Ausmaß solcher Einwirkungen wird durch die Art des Maschinenbetriebs, z.B. durch die Auslastung (Maschinenlaufzeit pro Jahr) sowie die gefahrene Leistung bezogen auf die Nennleistung (Leerlauf, Teillast, Vollast) und durch äußere Bedingungen oder Randbedingungen, z.B. Wartungszustand, Staub, Feuchtigkeit und Salzgehalt der Luft beeinflusst.

Abnutzung kann sich in Verschleiß, Alterung, Korrosion, biologischer Materialschädigung aber auch als Bruch äußern. Abnutzung ist eine unvermeidbare Begleiterscheinung des Maschinenbetriebs. Lapidar heißt es in der DIN 31 051 [4.1]:

«... Abnutzung ist der Preis, der für die Nutzung der Anlagen entrichtet werden muss. Ohne Abnutzung können Anlagen nicht betrieben werden ...».

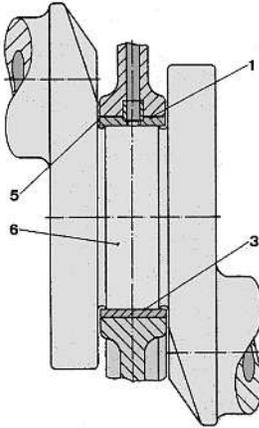
Entscheidend für Betriebssicherheit, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit von Maschinen ist die Abnutzungsrate (Abnutzung/Zeit). Deshalb wird für die Abnutzung konstruktiv mit einem Abnutzungsvorrat vorgehalten – durch Materialzugaben, deren Abtrag durch Abnutzung Funktion und Betriebssicherheit das Bauteil nicht beeinträchtigen. Beträgt z. B. das Spiel eines Lagers aufgrund der Fertigungstoleranzen 0,200 ... 0,250 mm, so ist durch Angabe eines Betriebsgrenzmaßes von 0,300 mm ein Abnutzungsvorrat von 0,100 ... 0,050 mm gegeben. Außerdem wird die Nutzungsdauer von Motorteilen durch die Möglichkeit zur Nacharbeit, oft sogar in mehreren Stufen, verlängert (Bild 4.1).

Die Verschleißraten sind natürlich bei den einzelnen Motorarten (Pkw, Nkw, allgemeine Verwendung) unterschiedlich. In einer Veröffentlichung [4.2] werden auf der Grundlage von Betriebsergebnissen für große 4-Takt-Schwerölmotoren folgende Verschleißraten genannt:

- 96 % aller Ventile erfordern ein geringes Nachschleifen nach 5000 ... 6000 Bh,
- 70 % aller Ringnuten haben einen Verschleiß unter 0,01 mm/1000 Bh,
- 80 % aller Zylinderbuchsen haben einen Verschleiß von 0,03 mm/1000 Bh.

Toleranzen und Grenzmaße

Kurbelwellenlagerung:
Grundlager



Nr	Benennung	Neuzustand	Nacharbeit		Abmaß		Spiel		Übermaß		Betriebsgrenzmaß
			Stufe	Nennmaß	unteres	oberes	Kleinste	Größtes	Kleinste	Größtes	
1	Kurbelgehäuse, Bohrung-Ø	180 ^{H6}	1	180,50 ^{H6}	0	+0,029			0,204	0,252	0,200
3	Kurbelwellenlager Innen-Ø	168,142	1	167,942							
			2	167,742							
			3	167,542							
			4	167,342							
			5	167,142							
			6	166,942							
3	Kurbelwellen-Ø	168 _{h8}	1	167,8 _{h8}	0,025	0	0,142	0,203			Spiel 0,230
			2	167,6 _{h8}							
			3	167,4 _{h8}							
			4	167,2 _{h8}							
			5	167,0 _{h8}							
			6	166,8 _{h8}							

Bild 4.1 Betriebsgrenzmaße von Motorteilen

Die Folgen unzulässiger Abnutzung sind Funktionsstörungen oder Schäden an Bauteilen oder Funktionsgruppen. Wegen der Funktionszusammenhänge und Funktionsabhängigkeiten («Reihenschaltung») in einer Maschine bzw. Maschinenanlage wirken sich solche Störungen kumulativ (anhäufend) aus. Vielfach werden die Belastung und – daraus resultierend – die Beanspruchung von Bauteilen durch verschiedene Fehler und äußere Einflüsse zusätzlich erhöht. Diese können sein: technische Mängel, Betriebsfehler und äußere Einflüsse, wobei sich die Grenzen zwischen diesen Einflüssen nicht immer scharf ziehen lassen.

4.2 Technische Mängel (Produktfehler)

4.2.1 Auslegungsfehler (Planungsfehler)

Auslegungsfehler im Sinne einer fehlerhaften oder unzulänglichen Motorkonzeption können bei dem heutigen Stand der Technik weitgehend ausgeschlossen werden. Der Grundaufbau von Motoren steht fest und hat sich bewährt. Heute werden nur noch einfachwirkende Motoren mit Kurbeltrieb und Ventilsteuerung – im 4-Takt, und sehr kleine und sehr große Motoren auch im 2-Takt arbeitend – gebaut. Motoren werden ausschließlich von Fahrzeug- oder von «reinen» Motorherstellern gebaut, die meisten Motorbauteile wiederum von hierauf spezialisierten Herstellern, die als Schaltstellen des Gewusst-wie fungieren, Erfahrungen aus allen Bereichen der Motortechnik sammeln und nutzen. Motoren verlangen eine umfangreiche und in die Tiefe gehende Entwicklung. Das Instrumentarium hierzu aus Berechnung, Simulation und Versuchs- und Messtechnik hat dank EDV und Elektronik große Fortschritte gemacht. Das und die Erfahrungen, die mittlerweile mit Hunderten Millionen von Motoren gesammelt worden sind, bilden die Grundlage einer «richtigen» Konzeption und Konstruktion von Motoren.

Dennoch kann es bei der Auslegung einzelner Bauteile zu Fehlern kommen: In der Lastannahme, in nicht-beanspruchungsgerechter Ausführung, unzureichender Dimensionierung, ungeeigneter Gestaltung, Passungen und Spielen, Werkstoffen und Wärmebehandlung oder Fertigungsverfahren. Solche Fehler betreffen meist nicht die zentralen Funktionsgruppen des Motors wie Triebwerk, Steuerung usw., sondern eher die Motorperipherie. Auch machen sich die Folgen solcher Planungsfehler meist erst nach langen bis sehr langen Laufzeiten bemerkbar, weil die Ursachen von Kurzzeitschäden schon in der Entwicklungsphase eruiert (zutage gefördert) werden können.

Als Beispiel für Störungen und Schäden bei Einführung einer neuen Baureihe von Schiffsmotoren werde aus einer Firmenveröffentlichung zitiert [4.3]:

«...Während der ersten 2750 Bh (Diese Laufzeit entspricht bei einem Fahrzeugmotor – 50 km/h als mittlere Geschwindigkeit angenommen – einer Fahrstrecke von 137500 km!) traten 2 Hauptprobleme auf, die eine längere Stillstandszeit verursachten:

- ❑ Turbolader-Ausfälle aufgrund einer mangelhaften Auslegung des Dämpfungsdrahtes an den Turbinenschaufeln,
- ❑ Auslassventilschaden aufgrund von Materialermüdung, verursacht durch Korrosion.

Bis heute wurde eine Reihe kleiner Änderungen durchgeführt, alle basierend auf den an Bord gewonnenen Erfahrungen. Erwähnenswert sind:

- ❑ Änderung der Laubbuchse von 2-teiliger auf 1-teilige Konstruktion. Wir hatten 4 Fälle von gerissenen Flammringen, die in der neuen Konstruktion nicht mehr aufgetreten sind.
- ❑ Änderung der Stiftschrauben für das kombinierte Indikator- und Sicherheitsventil; die Festigkeit dieser Schrauben erwies sich als ungenügend.

- ❑ Änderung der Stopp-Zylinder an den Kraftstoffpumpen, da Luftleckagen auftraten. Änderung des Turboladers in mehreren Schritten.
- ❑ Änderung der Schleppebel des Einspritzpumpenantriebs aufgrund nicht ausreichender Schmierung.
- ❑ Änderung der Kraftstoffpumpen-Druckventilfedern aufgrund eines Materialdefektes.
- ❑ Änderung der Einspritzpumpen aufgrund eines konstruktiven Problems mit den Arretierschrauben ...».

Motoren müssen bezüglich Leistungsbereich und Getriebeauslegung den jeweiligen Anforderungen entsprechen, ebenso die Betriebsart der Leistungsdefinition: Der richtige Motor für den richtigen Zweck! Zu schwache Motoren werden überlastet, zu starke laufen im unwirtschaftlichen Teillastbetrieb. Falscher Einsatz der Motoren, mangelnde Anpassung an die Betriebsbedingungen, z.B. durch die Charakteristik von Kraftübertragung und anzutreibender Maschine, können Störungen und Schäden auslösen. Intervalle und Umfang der Wartungsarbeiten müssen auf die Betriebsart und auf die Auslastung ausgerichtet sein.

Viele Störungen und Schäden resultieren aus Fehlern in der Planung der Maschinenanlage, denn hierzu gibt es unzählige Möglichkeiten. Das betrifft weniger die Motoren serienmäßiger Pkw und Nkw, als vielmehr Motoren für allgemeine Verwendung, d.h. Stationärbetrieb, Schiff, Bahn und Sonderfahrzeuge. Deshalb geben die Motorhersteller umfangreiche Planungsunterlagen (Einbaurichtlinien, Ship Owner's Guide, Projektierung von Motorenanlagen usw.) heraus, die praktisch alle Aspekte der Motorenanlage betreffen: Kühlungsart, Kühlanlagenauslegung, Motorvorwärmung, Motorwarmhaltebetrieb, Verbrennungsluftanlage, Abgasanlage, Kraftstoffanlage, Schmierstoffanlage, Elektrische Anlage, Motorbedienung und Motorüberwachung, Motorlagerung, Gestaltung des Maschinenraums, Belüftung des Maschinenraums, Geräuschkämpfung, Rohrleitungen, Kraftübertragung, Motoranlassung und Ausrichtung des Maschinensatzes. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt besteht in der Planung der Instandhaltung. Wenn sich Wartungsarbeiten aufgrund konstruktiver oder einbautechnischer Gegebenheiten umständlich gestalten, führt das dazu, dass sie nicht mit der gebotenen Regelmäßigkeit und Sorgfalt durchgeführt werden, was wiederum die Wahrscheinlichkeit einer Störung erhöht. Bei einem leichten Lkw für den Verteilerverkehr musste zur Überprüfung des Ölstandes des Motors der Fahrersitz angehoben werden, um an den Ölpeilstab heranzukommen. Das wurde von den – bei dieser Fahrzeugart – meist jüngeren Fahrern als so lästig und umständlich empfunden, zumal die Möglichkeit bestand, den Sitz dabei zu verschmutzen, dass die Ölkontrolle nicht regelmäßig vorgenommen wurde – mit der Folge, dass dieser Fahrzeugtyp in der Schadenstatistik auffällig wurde.

Unwägbarkeiten der Motorinstallation werden zunehmend dadurch umgangen, dass dem Kunden nicht mehr der «nackte» Motor, sondern einbaufertige Module geliefert werden, z.B. für Omnibusse oder Triebwagen. Dieses Konzept wurde schon vor Jahrzehnten mit der Antriebsanlage des Kampfpanzers Leopard verwirklicht. So werden nicht nur Installationsfehler vermieden, sondern auch verhindert, dass Fahr-

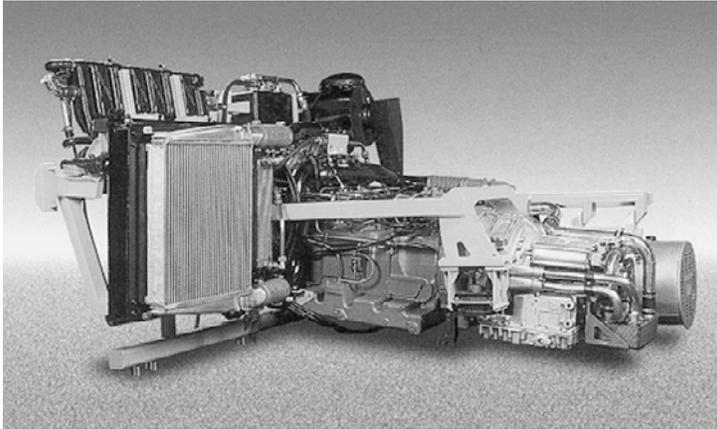


Bild 4.2 Antriebsmodul für Busse [Quelle: MAN]

zeug- oder Triebwagenhersteller ungeeignete Komponenten, z.B. Wärmetauscher, Filter usw., für die Antriebsanlage verwenden. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist, dass mit Antriebsmodulen externe Probeläufe durchgeführt werden können. Ein solches Antriebsmodul für Omnibusse besteht aus einem Rahmenaufbau, auf dem Motor, Getriebe, Luftfilter, Ölbehälter für den hydrostatischen Lüfterantrieb, Lenkölbehälter, Ölbehälter mit Nachfüllautomatik, Kühlwasserausgleichsbehälter, Kühler mit hydrostatisch angetriebenem Lüfter, Klimakompressor und eine 2. Lichtmaschine kompakt und funktionell angeordnet sind (Bild 4.2).

Auf diese Art ist sichergestellt, dass nur erprobte, aufeinander abgestimmte Komponenten verwendet werden: Die Einzelmontage im Fertigungsablauf des Fahrzeugs wird vereinfacht. Das verringert Fehlermöglichkeiten und gestattet schnellen Modultausch für Wartung und Reparatur. Die Arbeiten gestalten sich am ausgebauten Modul ungleich einfacher. Insgesamt werden so eine optimale Einbettung des Motors in das Fahrzeugkonzept und eine Zubehörintegration erreicht.

Wenn auch das Konzept der Planung «stimmt», so steckt der Teufel oft im Detail: Rohrleitungsführung im Kühlmittelkreislauf, Krümmer, Abzweigungen, Blenden, Ventile oder Schieber – unzweckmäßig angeordnet, nicht richtig ausgelegt – können Anlass zu Störungen und Schäden geben.

Bei größeren und großen Motoren spielt die Kraftstoffart eine wichtige Rolle für das Betriebsverhalten und die Schadanfälligkeit: Gasöl, Dieselöl, MDF, Schweröl. Je schlechter der Kraftstoff – gleichbedeutend mit billiger –, desto mehr muss mit Betriebsstörungen gerechnet werden.

4.2.2 Werkstofffehler

Werkstofffehler durch Verwendung ungeeigneter Werkstoffe, Paarung nicht miteinander verträglicher Werkstoffe oder Verwechslung von Werkstoffen kommen nur selten vor.

Dass Werkstofffehler heute noch auftreten, liegt in der Schwierigkeit, Werkstoffe absolut einwandfrei herzustellen und die Beschaffenheit der zu Motorbauteilen verarbeiteten Werkstoffe 3-dimensional, d. h. über das gesamte Bauteilvolumen, zu prüfen. Solche Werkstofffehler können in allen Phasen des Herstellungsprozesses entstehen: Verunreinigungen des Ausgangsmaterials, Lunker, Einschlüsse, Gasblasen und Seigerungen beim Gießen, Doppelungen beim Walzen, Risse und Falten beim Schmieden, Gefügefehler, Fehler bei der Wärmebehandlung, oder Bindungsfehler bei beschichteten Bauteilen (Lager, Kolbenringe) oder beim Aufplattieren. Die Preisvorteile von Ersatzteilen des Grauen Marktes beruhen zu einem nicht geringen Teil auf der Verwendung von minderwertigen, zumindest aber ungeeigneten Werkstoffen.

4.2.3 Herstellungsfehler

Fertigungsfehler bestehen im Nichteinhalten von Maßen, Maß- und Formtoleranzen, Passungen und Spielen, in der geforderten Oberflächenbeschaffenheit, in mechanischer Oberflächenbeschädigung beim Drehen, Fräsen und Bohren: Riefen, Kratzer, Rattermarken, Kerben, Teilungsfehler bei Zahnrädern, Fehlern in der Wärmebehandlung oder in Ziehrisen beim Kaltverformen. Besonders heikel ist die Oberflächenstruktur von tribologisch beanspruchten Bauteilen, wie z. B. die Blechmantelbildung beim Honen. Bearbeitungsfehler in hochbeanspruchten Partien wie Hohlkehlen, Abrundungen von Ölbohrungen usw. können Schwingbrüche (Dauerbrüche) auslösen.

Bei der Montage sind es Flucht und Rundlauf und vor allem die falsche Vorspannung von Schraubenverbindungen, die als Schadenursachen ausgemacht werden, ebenso Fehler beim Ausrichten und Auswuchten der Maschinenanlage. Herstellungsfehler sind ebenfalls Gründe für die hohe Ausfallrate von Ersatzteilen des Grauen Marktes.

4.3 Betriebsfehler

4.3.1 Überlastung

Die Überlastung, eine Beanspruchung über die gegebenen Möglichkeiten hinaus und daraus resultierende Beeinträchtigung in der Funktionsfähigkeit [4.4], stellt eine «klassische» Schadenursache dar. Dem physikalischen Vorgang nach unterscheidet man mechanische, thermische, chemische, korrosive und tribologische Überlastungen. Überlastet werden Motoren, wenn sie mehr Leistung abgeben müssen, als die für sie ausgelegt sind, oder wenn die Leistung bei Auftreten von betriebsverschärfenden Bedingungen wie niedriger Luftdruck, hohe Ansauglufttemperatur, hohe Kühl- und Schmiermitteltemperaturen gefordert wird. Jedermann geläufig ist der überladene Lastzug an Steigungsstrecken, der seinen Lastzustand durch niedrige Kriechgeschwindigkeit und dunkle Abgasschwaden gleichermaßen kund tut. Zu viel Ladung, zu schwere Anhängelasten stellen eine Überlastung dar, wie sie insbesondere im

außereuropäischen Fahrzeugbetrieb häufig zu beobachten ist. Im Schiffsbetrieb führt eine nicht richtige Abstimmung von Motor, Propeller und Schiff zu Überlastung der Motoren.

Überlastung bedeutet für den Motor, dass ihm ein (zu) hohes Drehmoment abverlangt wird. Da seine Leistung begrenzt ist, muss er in der Drehzahl abfallen: «Drehzahlrückung». Das ist aber nur in begrenztem Maße zulässig, weil sonst als Folge abnehmenden Luftüberschusses die Abgastemperatur und damit die Temperaturen neuralgischer Bauteile wie Kolben, Zylinderköpfe, Auslassventile zunehmen. Höhere Temperaturen mindern die Werkstofffestigkeit, verringern Spiele und verändern – erhöhen oder verringern – je nach den Verhältnissen die Überdeckung von Pressverbänden. Außerdem führt der gedrückte Betrieb zu hohen Zünddrücken und Druckgradienten, daraus entstehend, zu großen Triebwerkskräften. Die Verformung der Motorbauteile dadurch lässt die Beanspruchungen ansteigen, ebenso wie sie das Zusammenarbeiten mit anderen Bauteilen beeinträchtigt. Mechanische Überlastung führt zu mechanischer Schädigung der Bauteile in Gestalt von (unzulässiger) elastischer («reversibler»), unelastischer, d. h. plastischer («irreversibler») Verformung, von Rissen und Brüchen. Höhere Triebwerkskräfte rufen auch höhere Lagerkräfte hervor; somit müssen sich im Schmierfilm in den Lagern größere Drücke aufbauen, um diese Lagerkräfte aufzufangen – auch die tribologische Belastung nimmt zu!

Überlastung wird dem Motor aber nicht nur von außen, «vom Gaspedal» aufgezwungen, sondern auch «von innen» – durch innermotorische Unregelmäßigkeiten wie Kaltstart mit hohem Zündverzug, zu früher Einspritzbeginn, bei Ottomotoren Frühzündung oder klopfende Verbrennung, verstopfte Filter und verschmutzte Wärmeübertrager. Beim Motor ist die mechanische mit thermischer und tribologischer Überlastung verbunden, denn höhere Drehmomente bedeuten höhere Gasdrücke, diese wiederum ergeben sich aus einem gesteigerten Wärmeumsatz im Brennraum. Mehr Leistung heißt also mehr Wärme, höhere Bauteil- und Abgastemperaturen. Bekanntes Beispiel dafür ist die klopfende Verbrennung, die als Folge der hohen Flammausbreitungsgeschwindigkeit und turbulenter Gasbewegung den Wärmeübergang vom Verbrennungsgas zu den brennraumbegrenzenden Bauteilen so intensiviert, dass die Bauteile thermisch überlastet werden. Bei Dieselmotoren sind es häufig schlecht abspritzende Einspritzdüsen, die thermische Schäden verursachen. Thermische Überlastung führt zu Wärmerissen, Ab- und Ausbrennungen und auch direkt zu Bauteilbrüchen, wegen der mit der Temperatur abnehmenden Festigkeitswerte.

4.3.2 Veränderungen der Betriebsbedingungen

Schiffsmotoren werden auf der Propellerkurve gefahren, diese hängt vom Typ, Größe und Form des Schiffs ab. Motor und ggf. Getriebe müssen so abgestimmt sein, dass der Motor den Leistungsbedarf des Schiffes bezüglich Drehmoment und Drehzahl abdecken kann. Durch Bewuchs des Rumpfes erhöht sich dessen Rauheit, wodurch sich die Propellerkurve nach links – in Richtung höherer Drehmomente verlagert. Verschmutzen von Wärmeübertragern (Wärmetauschern, Ladeluftkühlern) lässt die Kühlleistung abfallen und die Kühlmitteltemperatur ansteigen. Luftfilter, die sich

zusetzen, treiben den Ansaugwiderstand in die Höhe. Außentemperaturen und mit der Höhe abnehmende Luftdichte bedeuten für Fahrzeugmotoren eine zusätzliche Erschwernis der Betriebsbedingungen. Eine unheilvolle Rolle spielt oft der Kraftstoff, wenn dessen Qualität nicht den Anforderungen der Motorhersteller entspricht, wie es in osteuropäischen und außereuropäischen Ländern nicht selten zu beobachten ist.

Motorenanlagen werden heute schon im Entwurfsstadium auf ihr Drehschwingungsverhalten überprüft, so dass mit Drehschwingungsdämpfern und Abstimmung der Kupplung kritische Drehschwingungszustände ausgeschlossen werden können. Dennoch kann es zu Übereinstimmung der Eigenfrequenz eines Bauteils mit einer von der Maschine oder der Maschinenanlage herrührenden Schwingungserregung kommen, mit allen entsprechenden Folgen. Außerdem können sich Eigenfrequenzen durch Abnutzung oder Spielvergrößerung verlagern. Wenn sich das Dämpferöl zersetzt, verliert der Drehschwingungsdämpfer an Wirkung.

Motor und Anbauteile sind mannigfaltigen Erschütterungen und Vibrationen ausgesetzt. Dadurch kommt es zu Setzungs- und Glättungserscheinungen in Schraubenverbindungen, wodurch sich Schrauben lockern.

Eine für Verdrängermaschinen, wie es Verbrennungsmotoren sind, besonders gefährliche betriebliche Unregelmäßigkeit ist der «Flüssigkeitsschlag»: Wenn infolge von Undichtigkeiten Wasser, Kraftstoff oder Motorenöl in größeren Mengen in den Zylinder gelangen, dann arbeitet der Kolben gegen eine praktisch inkompressible Flüssigkeit an: Es kommt zum Flüssigkeitsschlag! Dabei wird das Pleuel von der sich weiter drehenden Kurbelwelle so verformt, dass es – meist im großen Pleuelauge – abreißt und oft genug in solchen Fällen das Kurbelgehäuse durchschlägt.

4.3.3 Bedienungsfehler

Einlauf

Die Bauteile eines neuen Motors weisen fertigungsbedingt Rauheiten auf: Die Form der Gleitpartner weicht innerhalb der zugelassenen Toleranzen von der geometrischen Idealform ab. Beim Einlauf des Motors müssen sich die Gleitpartner bezüglich ihrer Form und ihres Verformungsverhaltens aneinander anpassen, die Rauheitsspitzen müssen sich abarbeiten. Das gilt besonders für Kolbenringe und Zylinderlaufbahn, aber auch für Lagerungen aller Art. Der Motoreinlauf gilt als abgeschlossen, wenn der erste Kolbenring einwandfrei gegen den Verbrennungsraum abdichtet. Wird der Motor voll belastet, bevor dieser Zustand erreicht worden ist, dann blasen die heißen Verbrennungsgase zwischen Ring und Zylinderlaufbahn durch, verbrennen den Schmierfilm, wodurch sich das Dichtverhalten des Ringes weiter verschlechtert: Der Ring wird brandig, Verschleiß und Ölverbrauch nehmen zu. Im ungünstigsten Fall kommt es zum Ring- und Kolbenfresser. Das Einlaufprogramm von Fahrzeugmotoren wurde laufend reduziert. Bei einigen Neukonstruktionen von Fahrzeugottomotoren besteht der ganze Einlauf aus einem nur wenige Minuten währenden Lauf mit Fremdantrieb, bei dem die Kühl- und Schmiermittelkreisläufe auf Funktion und Dichtheit überprüft werden. Größere und große Motoren hingegen machen im Werk einen