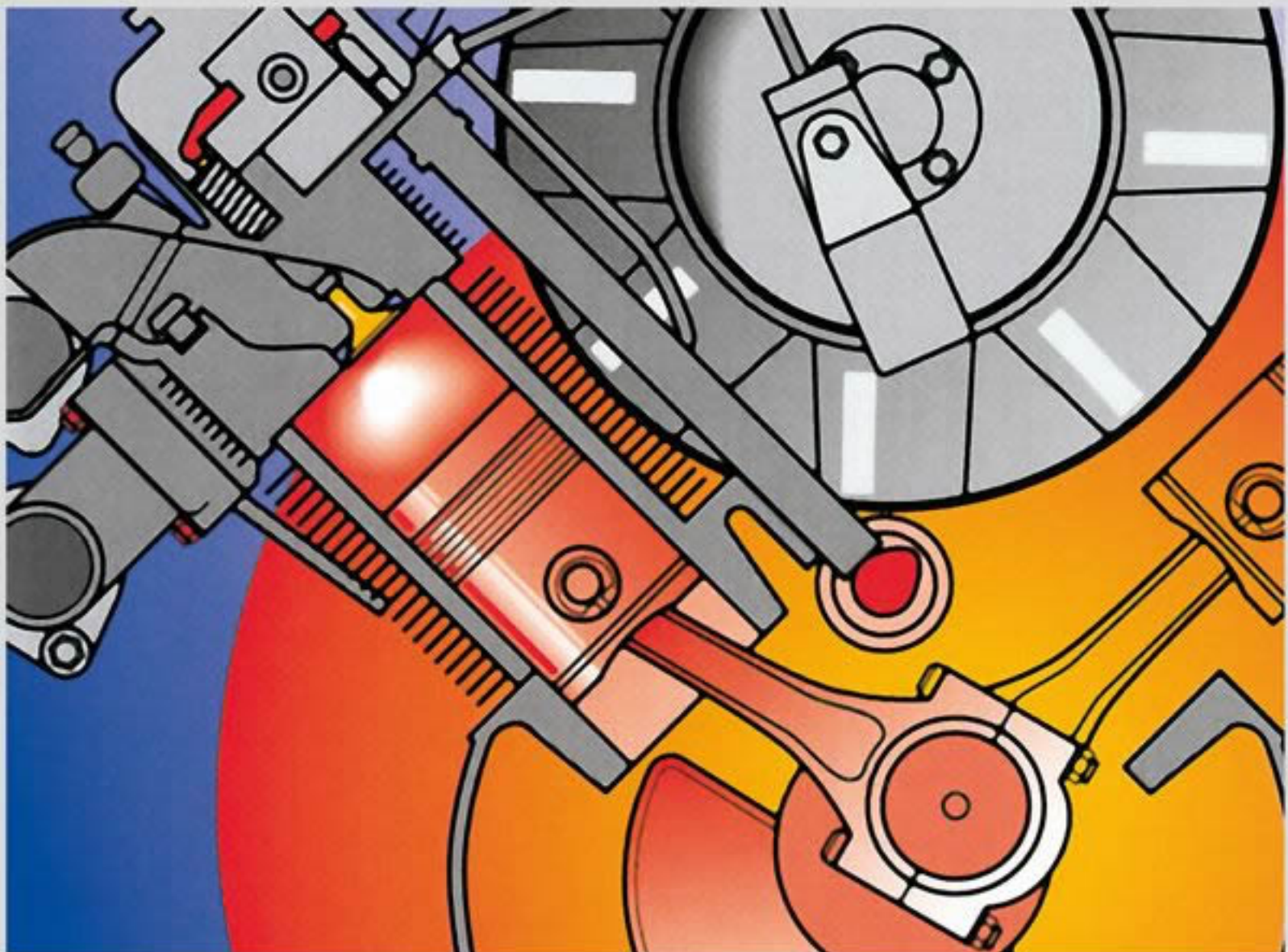


Vogel Fachbuch

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, Pleuellwellen, Einspritzausrüstung, Ventile und Ventildfedern, Pleuellköpfe 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. Pleuellwelle) oder ein kleines (z.B. Lager; Pleuellring usw.) den Ausfall verursacht, nebensächlich, weil die Folgen, nämlich Stillstand des Motors, dieselben sind. Schäden können sich «lawinenartig» entwickeln: Pleuellringfresser, Pleuellfresser, Pleuellwerkschaden, 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 Schademöglichkeiten 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

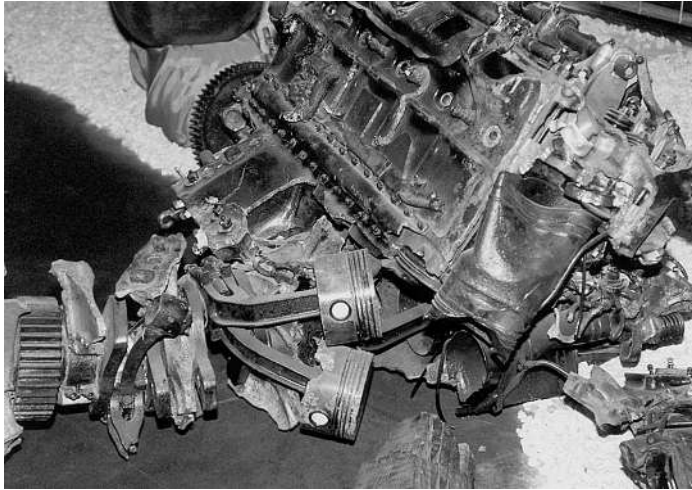


Bild 1.1 Totalschaden eines Flugzeugmotors nach Absturz aus über 1000 m Höhe (Auto & Technik Museum Sinsheim)



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.

2 Der Motor

2.1 Wesentliche Eigenschaften und Besonderheiten

Unter *Motoren* – Maschinen zur Erzeugung von «Antriebskraft» – werden umgangssprachlich Kolben-Wärme­kraft­maschinen mit innerer Verbrennung (DIN 1940) verstanden.

Charakteristische Merkmale für Motoren – Verbrennungskraftmaschinen in Hubkolbenbauweise – sind (s. Bild 2.1):

- ❑ veränderlicher Arbeitsraum,
- ❑ diskontinuierlicher (periodisch unterbrochener) Stoffstrom (Arbeitsgas),
- ❑ innere Verbrennung und das
- ❑ Auftreten großer Drücke und heißer Temperaturen im Arbeitsgas.

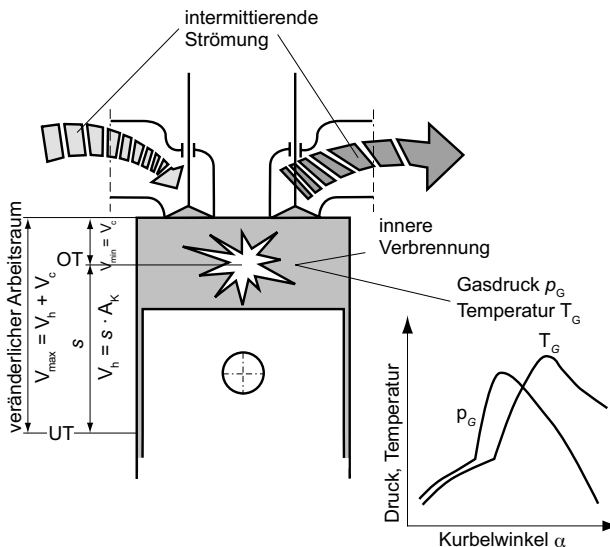


Bild 2.1 Charakterische Merkmale von Verbrennungsmotoren (Schema)

Das Volumenverhältnis $\varepsilon = V_{\max}/V_{\min} = (V_h + V_c)/V_c$ ist das Verdichtungsverhältnis (kurz Verdichtung).

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.

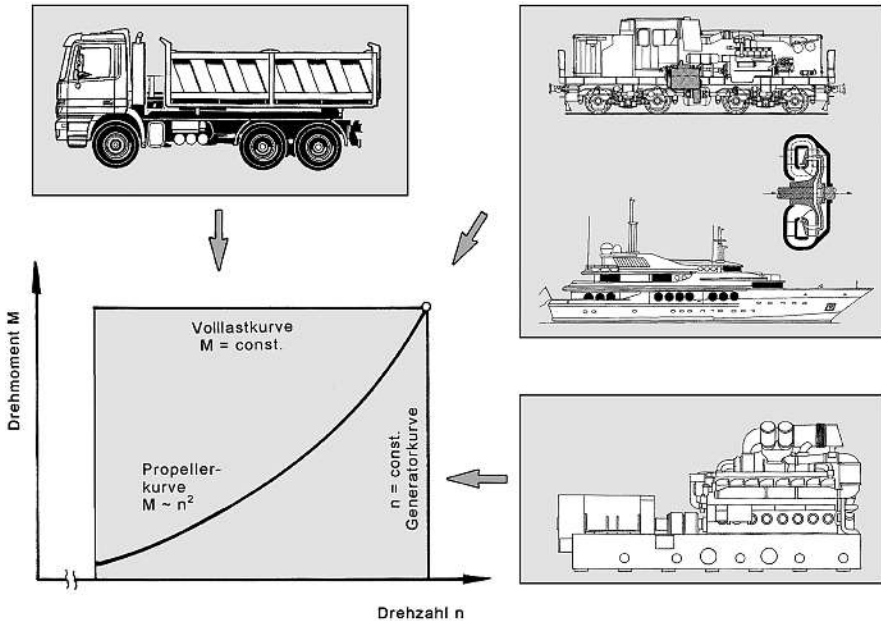


Bild 2.2 Propeller-, Volllast- und Generatorkurven

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 $m \approx 3,5 \dots 3,7$.

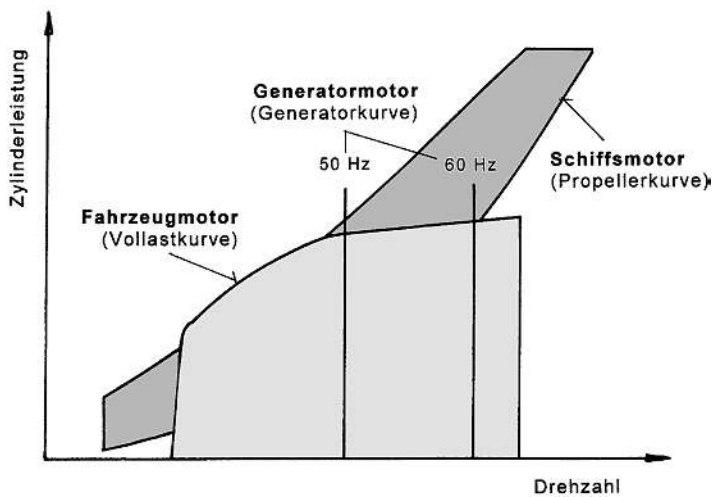


Bild 2.3 Motorbetriebsbereiche bei unterschiedlichen Betriebsarten

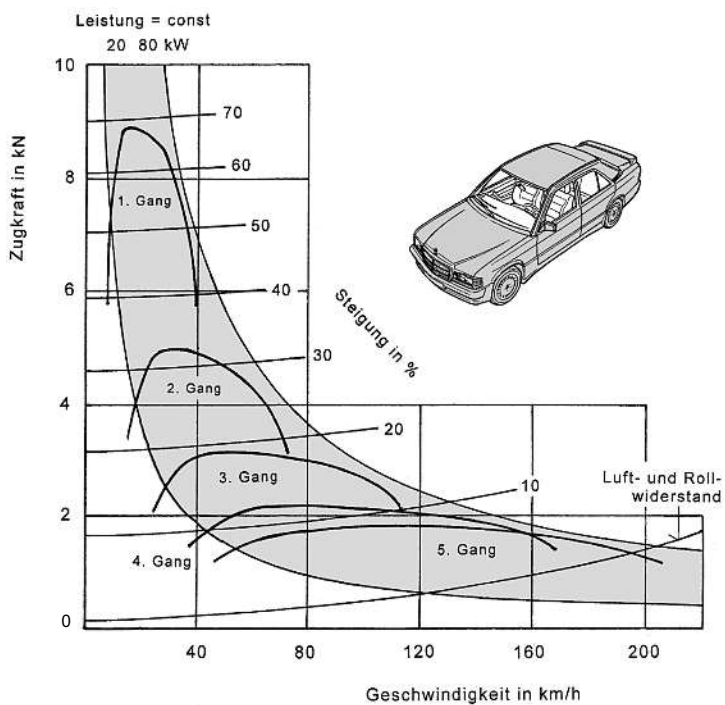


Bild 2.4 Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines Pkw

In der Praxis sehen diese Kurven etwas anders aus, weil dem Motor von der Abgas-turboaufladung 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.

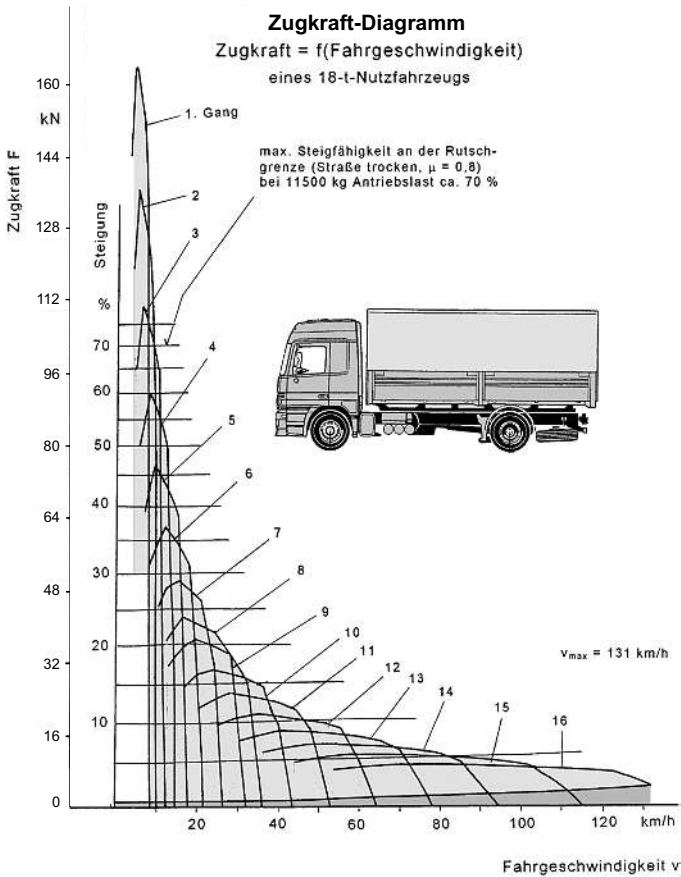


Bild 2.5 Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines schweren Nutzfahrzeugs

2.2.2 Motorleistung und Leistungsreduktion

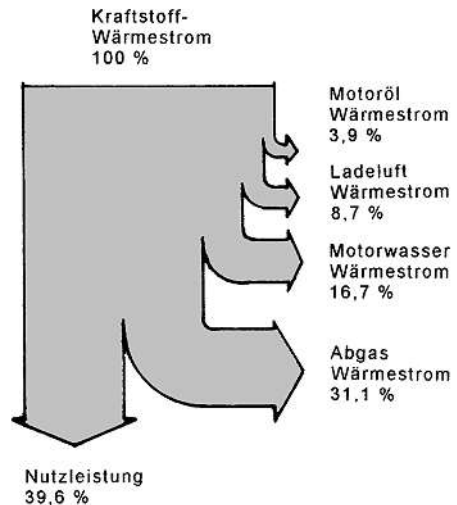
Die von einem Motor abgebbare Leistung ist grundsätzlich von der in den Arbeitsraum angesaugten Luftmenge und der Drehzahl, mit der ein Motor arbeitet, begrenzt. Luft ist die entscheidende Voraussetzung für die Freisetzung von Wärme bei der Verbrennung. Erst unter der Bedingung, dass mehr Luft im Arbeitsraum 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).