

Die Grundform der Zylinderbuchsen ist ein Kreiszylinder. Trockene Buchsen werden teils mit, teils ohne Bund gefertigt und in die Zylinderbohrung des Zylinderkurbelgehäuses eingesetzt. Nasse, also an ihrer Außenseite direkt vom Kühlmittel umströmte Zylinderbuchsen haben am oberen Ende einen Bund («Kragen»), mit dem sie direkt auf der Deckplatte oder in einer Eindrehung des Zylinderkurbelgehäuses, dem Balkonsitz, axial abgestützt werden. Nach unten zum Kurbelraum hin kann sich die Zylinderbuchse frei ausdehnen. Radial werden die Buchsen am oberen und unteren Buchsenbund im Buchseneinpass des Zylinderkurbelgehäuses gehalten (s. Bild 6.298).

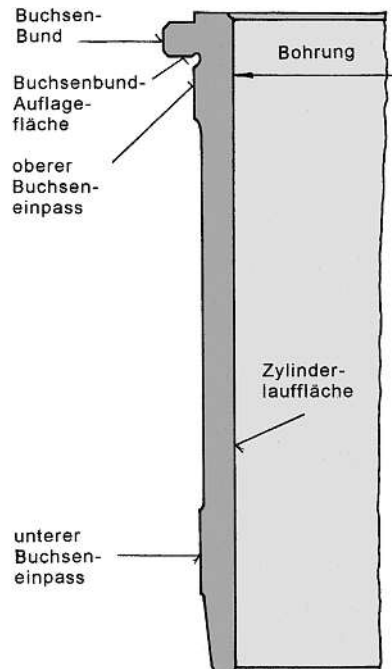
Zur Verhinderung von Korrosion ist der Außenmantel der Zylinderbuchse bei manchen Motoren mit einer Korrosionsschutzschicht versehen. Motorart und -größe sowie die Betriebsbedingungen bestimmen Bauart, Werkstoff, Wanddicke, Gestaltung der Bundpartie und Kühlung der Zylinderbuchsen.

Luftgekühlte Motoren haben Einzelzylinder (s. Bild 6.307), ausgeführt als

- Graugusszylinder mit Kühlrippen (ältere Motoren),
- Schrumpfverbindung von Aluminiumzylinder und Graugusslaufbuchse,
- Verbundguss
 - Aluminiumrippenzylinder mit eingegossener Graugussbuchse, verbunden mit einer
 - intermetallischen Verbindungsschicht zwischen Graugussbuchse und Aluminiumrippenzylinder (Al-Fin-Verfahren), oder als
 - Umguss einer Graugusszylinderbuchse.

Bild 6.298

Bezeichnungen an «nassen» Zylinderbuchsen



Im Hinblick auf die Funktion müssen Zylinderbuchsen innen und außen abdichten.

- ❑ Der Gasdruck im Zylinder wird aufrechterhalten mit der Dichtung zwischen Zylinderbuchse und Zylinderkopf (Zylinderkopfdichtung) sowie dem Kolbenringpaket (Kolben und Kolbenringe).
- ❑ Der Kühlwasserraum um die Zylinderbuchsen wird nach oben zum Kopf hin an der Bundauflege auf dem Balkonsitz, nach unten gegen den Kurbelraum mit 1, 2 oder 3 in die Zylinderbuchse eingesetzten Runddichtringen (O-Ringe) abgedichtet, deren Wirkung auf Verformung beruht. Werden die Ringe zu wenig verformt, dichten sie schlecht, bei zu großer Verformung können sie ebenfalls nicht korrekt abdichten. Problematisch ist, dass der Zustand der O-Ring-Dichtungen nach dem Einbau direkt nicht mehr kontrollierbar ist. Deshalb wird meist zwischen oberem und unterem Dichtring eine Entlastungsnut in die Zylinderbuchse eingedreht. Im Zylinderkurbelgehäuse befindet sich in gleicher Höhe eine Entlastungsbohrung. Wird ein Dichtring über der Entlastungsnut undicht, dann sammelt sich das Leckwasser und kann durch die Entlastungsbohrung austreten, so dass die Undichtheit erkannt werden kann.

Zylinderbuchsen werden mechanisch, thermisch, tribologisch und chemisch beansprucht.

- ❑ Mit dem Anziehen der Zylinderkopfschrauben werden große Kräfte auf den Buchsenbund aufgebracht. Der Zylindereinpass wird dabei unter den Schraubenkräften radial ungleichmäßig verformt (s. Bild 6.300) – insbesondere wenn die Zylinderkopfschrauben nicht in der richtigen Reihenfolge und mit dem vorgeschriebenen Moment angezogen werden. Das führt darüber hinaus zum Einschnüren der Zylinderlaufbuchse in Längsrichtung. Die Form direkt in das Zylinderkurbelgehäuse eingearbeiteter Zylinderlaufbahnen wird auch von Montage- und Betriebskräften befestigter Anbauteile beeinflusst.
- ❑ Unter dem Gasdruck wird die Zylinderbuchse im Verlauf der Arbeitsspiele regelrecht «aufgeblasen».
- ❑ Der Anlagewechsel des Kolbens im Zylinder infolge der wechselnden Normalkraft (Gleitbahnkraft, s. Bild 6.336) regt die Zylinderbuchse zu Schwingungen an.
- ❑ Die heißen Gastemperaturen, die rapide Temperaturzunahme und die Temperaturänderungen bei Lastwechsel rufen in den Zylinderbuchsen Wärmespannungen und Wärmeverformungen hervor (s. Bild 6.301).
- ❑ Zusätzliche Beanspruchungen entstehen als Folge ungleicher Temperaturen von Zylinder und Zylinderkopf, die in der Dichtungsebene Schubbeanspruchungen verursachen.
- ❑ Tribologisch werden die Zylinderlaufbahnen von Mischreibung zwischen den Gleitpartnern Kolbenring und Kolben sowie Zylinderlaufbuchse beansprucht. Es kommt zu mechanischem Verschleiß.

Die für die Funktion der Zylinderlaufbuchse erforderlichen Eigenschaften werden mit der Werkstoffauswahl und der Bearbeitung erreicht:

Verformung einer Zylinderbuchse

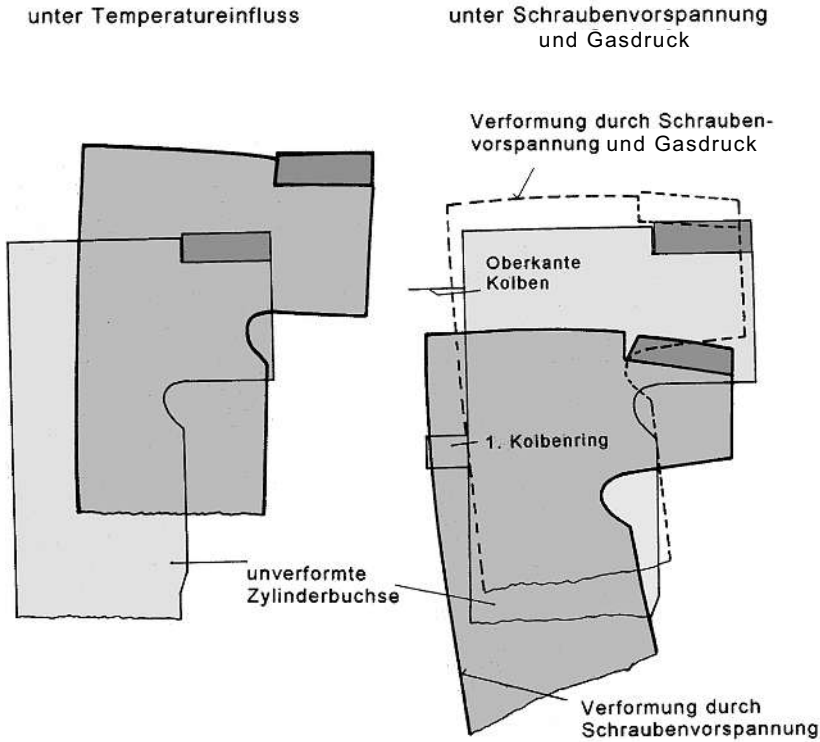


Bild 6.299 Einfluss von Schraubenanzug, Temperatur und Gasdruck auf Form und Lage einer Zylinderbuchse. Die Darstellungen sind bezogen auf die Kolbenposition bei OT.

□ Werkstoff und Gefüge

Für Zylinderbuchsen von Dieselmotoren wird legierter Grauguss mit perlitischem Grundgefüge und feinem, harten Phosphidnetz («Stützgitterwirkung») verwendet, und zwar

- Cr-legierter lamellarer Grauguss (GJL – Standardmaterial),
 - CrNi-legierter GJL (bessere Verschleißfestigkeit und mechanische Beanspruchbarkeit) und
 - CrMo-legierter GJL mit großem Kohlenstoffgehalt (gute Gleiteigenschaften).
- Mit Verbundguss von lamellarem Gusseisen (gute Gleiteigenschaften) und globularem Gusseisen (große Festigkeit) lassen sich die spezifischen Vorteile der unterschiedlichen Werkstoffe gezielt ausnutzen. Pkw-Motoren mit Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminiumlegierung haben entweder bewehrte Zylinderlaufflächen (z.B. dünne Buchsen) oder geeignet beschichtete Kolben laufen direkt auf den Siliziumkristallen übereutektischer Aluminium-Zylinderlaufbahnen.

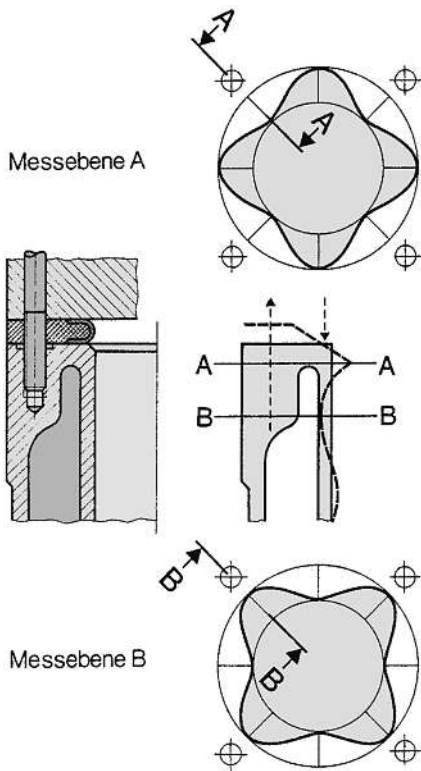


Bild 6.300

Zylinderverzug bei einem Closed-deck-Kurbelgehäuse [Quelle: Goetze]

Übliche Konstruktion eines «closed-deck»-Kurbelgehäuses mit den typischen elastischen Zylinderverzügen unter den Zylinderkopf-Schraubenkräften.

- ❑ Die makrogeometrische Zylinderform wird mit der Kurbelgehäusekonstruktion (Steifigkeit), der Art und Anordnung der Zylinderkopfverschraubungen, der Zylinder- und Bodenwanddicke sowie der Montage und Bearbeitung der Buchse bestimmt.

Zusätzlich werden die tribologischen Merkmale Verschleiß- und Gleiteigenschaften der Zylinder verbessert mit

- ❑ Härten (induktives Härten, Nitrieren oder Laserhärtung),
- ❑ Phosphatieren (Beschichten)
 - Phosphatkristalle auf der Zylinderoberfläche verbessern die Haftung des Öls und auf diese Weise die Dichtwirkung, was einem Brandigwerden der Kolbenringe entgegenwirkt;
- ❑ Bearbeitung im Hinblick auf eine bestimmte Oberflächenbeschaffenheit. Die Mikrogeometrie der Zylinderbahn beeinflusst maßgeblich die Gleiteigenschaften von Kolbenringen und Kolben und die Dichtigkeit des Arbeitsraums, weshalb Zylinderlaufflächen mittels Honen feinbearbeitet werden (Bild 6.302).

Bild 6.301
Temperaturfeld in einer Zylinder-
buchse
4-Takt-Dieselmotor, Bohrung
ca. 165 mm, $P = 1000 \text{ kW}$,
 $n = 2200 \text{ min}^{-1}$

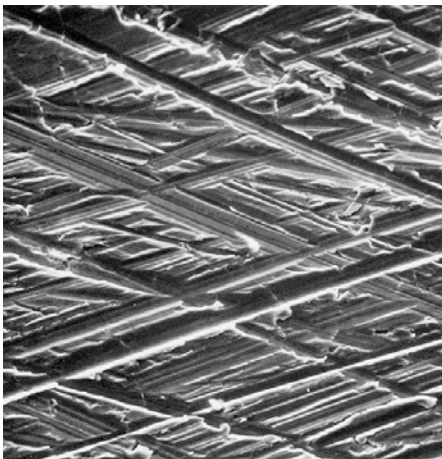
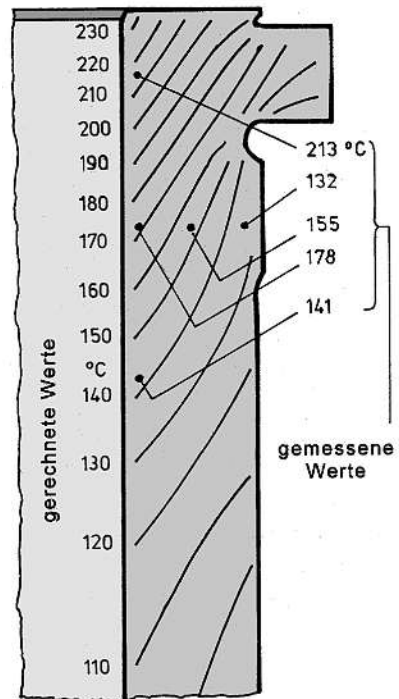


Bild 6.302
Struktur einer «normalen» Honung

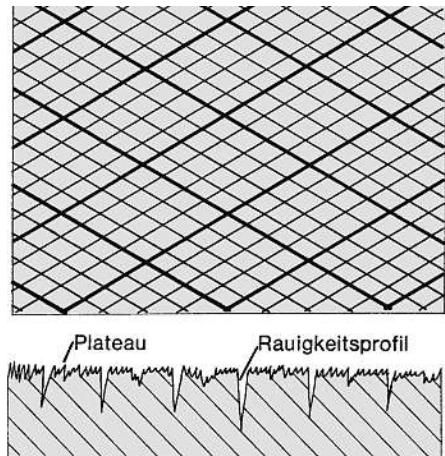


Bild 6.303
Plateauhonung (Schema) [Quelle: Goetze]

Die Feinstruktur der Zylinderoberfläche ist von maßgeblicher Bedeutung für den Schmierstoff-«Haushalt» zwischen Zylinder, Kolbenringen und Kolben. Es ist zum einen notwendig, dass in der Zylinderoberfläche Raum geschaffen wird, in dem Schmieröl gespeichert werden kann. Und zum anderen muss eine möglichst tragfähi-

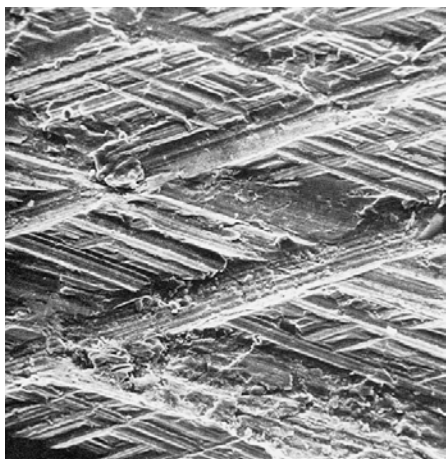


Bild 6.304
Plateauhonung (REM-Aufnahme)

ge glatte Oberfläche erzeugt werden, an der die wirkenden Kräfte abgestützt werden und an der gleichzeitig die notwendige Dichtheit zwischen den Verdichtungsringen und dem Zylinder mit einer sehr dünnen Ölschicht realisiert werden kann.

Die Zylinderlaufbahnen erhalten deshalb mit einem speziellen Honverfahren, dem *Plateauhonen* (Bild 6.303) die Endbearbeitung. Erforderlich ist ein gleichmäßiges Honbild mit sauber geschnittenen Honriefen, ohne Verschmierungen und Überlappungen (Bild 6.304). Die Riefen von etwa gleichmäßigem Abstand bilden die Ölspeicher in der Oberfläche, die rhomboiden Plateauflächen die Gleit-, Dicht- und Tragflächen. Ein solches Honbild wird erreicht, indem beim Fertigbearbeiten der Zylinder während der Vorhonstufe die tieferen Riefen erzeugt werden. Beim Fertighonen werden dann die Rauheitsspitzen so weit abgearbeitet, dass die gewünschten Plateaus mit geringer Rauheit entstehen. Damit wird der Einlaufprozess bereits weitgehend vorweggenommen. Der Honwinkel (die Neigung der Riefen im Zylinder) soll zwischen $30^\circ \dots 60^\circ$ bezogen auf den Zylinderumfang sein. Beurteilt wird die Ausbildung der Plateaustruktur nach der *Abbott'schen Tragkurve* (Bild 6.305) mit den Kriterien *Rauheit*, *Traganteil* der tragenden Fläche und *mittlere Tiefe* der Riefen.

Da die Güte der Honung einerseits von entscheidender Bedeutung für die Gleit- und Dichtfunktion der tribologischen Funktionsgruppe Zylinder-Kolben-Kolbenring ist, andererseits eine «gute» Honung fertigungstechnisch aufwendig ist und entsprechendes Wissen, Erfahrung und Maschinenausrüstung voraussetzt, sind Zylinderbuchsen des *Grauen Marktes*, von sog. *Produktpiraten* gefertigt, ein beträchtliches Risiko für den Motorbetreiber. Bild 6.306 zeigt eine Honung sehr schlechter Qualität mit sogenannter Blechmantelbildung. So etwas entsteht, wenn die Honleisten des Werkzeugs mit den Schneidkörpern nicht ausreichend scharf sind und wegen zu großen Schnittdrucks bei der Bearbeitung Werkstoff in die Riefen verquetscht und die ölspeichernden Graphitlamellen im Gefüge an der Zylinderfläche überdeckt werden. Ein Vergleich der Honstrukturen zeigt die Unterschiede zwischen dem Originalteil und einem schlechten «Nachbauteil» (Bild 6.307) [6.26].

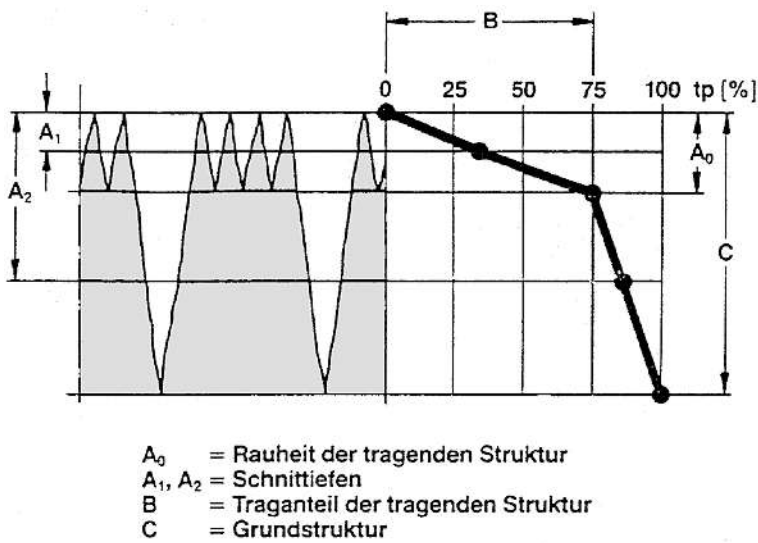
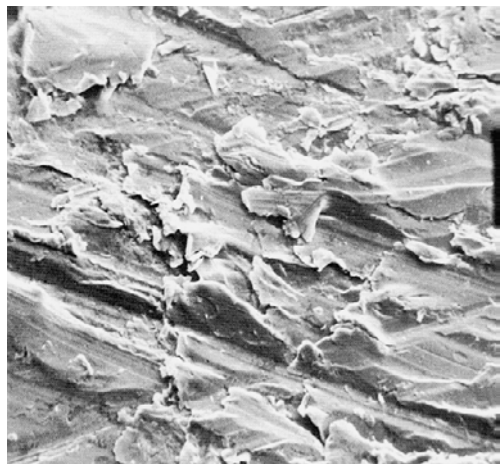


Bild 6.305 Beurteilung der Honstruktur anhand der Abbott'schen Tragkurve

Bild 6.306
Honbild mit Blechmantelbildung



Schäden am Kurbelgehäuse

Anrisse, Risse und Dauerbrüche

Ungünstige Beanspruchung, Fertigungsfehler (z.B. Ebenheitsabweichungen) bzw. Montagefehler führen zu Anrissen in der Hohlkehle der Balkonauflage für die Zylinderbuchsen. Ebenso hat Reibrost zwischen Zylinderbuchsenbund und der Balkonauflage («Balkon» – ringförmiger Auflagebund für nasse Zylinderlaufbuchse in der Deckplatte eines Zylinderkurbelgehäuses) entsprechendes Schadenpotential.

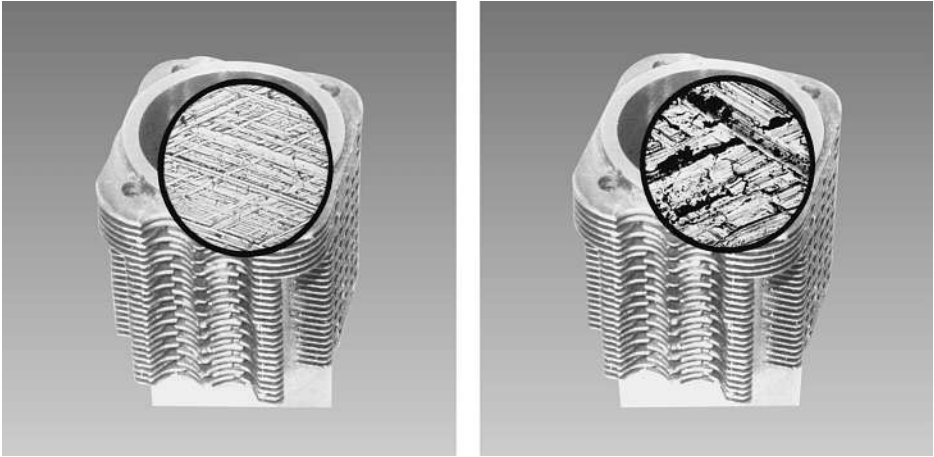


Bild 6.307 Honstrukturen luftgekühlter Zylinderbuchsen [Quelle: Deutz]
Originalteil (links) und «Piratenteil» (rechts)

Eine kritische Zone ist der Bereich zwischen den Bohrungen für Zylinderkopfschrauben und dem oberen Zylinderbuchseneinpass (vgl. Bild 6.300). Risse an dieser Stelle entwickeln sich zu Dauerbrüchen.

In den Sacklochgewinden der Zylinderkopf- und Kurbelwellenlagerdeckelschrauben treten formbedingt Spannungskonzentrationen auf. Bei Fertigungs- und Montagefehlern können diese Spannungen so zunehmen, dass es zu Anrissen – und weiter entwickelnd – zu Rissen kommt. Kurbelwellenlagerdeckel, die mit Querankern seitlich verspannt werden, sind meist mit Überdeckung eingebaut. Bei Einbau mit Gewalt kann es zu Anrissen in der Kurbelwellenlagerwand kommen. Auch besteht die Gefahr, dass abplatzende kleine Teilchen ins Schmieröl gelangen. Deshalb wird eine Verrundung der Kehlen am Lagerdeckeleinpass zum Abbau der Kerbwirkung vorgenommen (s. schwarze Pfeile in Bild 6.296).

Auch Schwingungen von Anbauteilen können über die Befestigungskonsolen zu Anrissen am Zylinderkurbelgehäuse führen.

Bruch infolge Gewalteinwirkung

In der Regel handelt es sich hierbei um Folgeschäden. Häufigste Ursache sind Pleuelschäden, bei denen der führungslos gewordene Pleuel die Kurbelgehäusewände durchschlägt (s. Bilder 6.308 und 6.309).

Bei Verwendung von Kühlmittel ohne genügenden Frostschutz kann bei Minustemperaturen das gefrierende Kühlmittel das Kurbelgehäuse aufsprengen.

Verschleiß, Materialabtrag

Kavitation und Korrosion können die kühlmittelführenden Wände bis zum Materialdurchbruch beschädigen. Aber auch eine kleine Vorschädigung kann unter Umständen

Bild 6.308
Vom Pleuel durchschlagenes
Kurbelgehäuse eines
Pkw-Motors

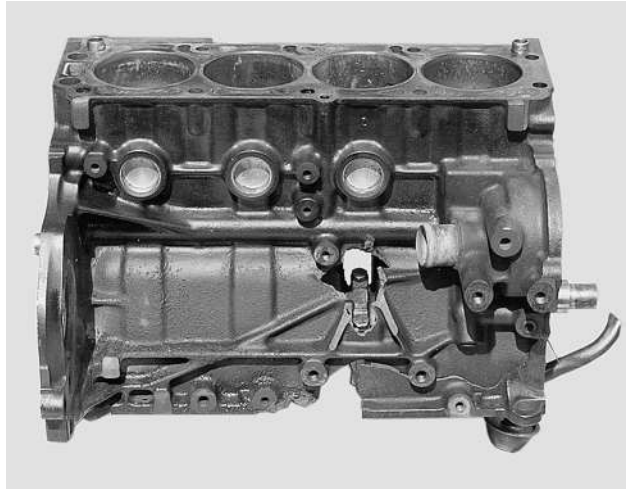
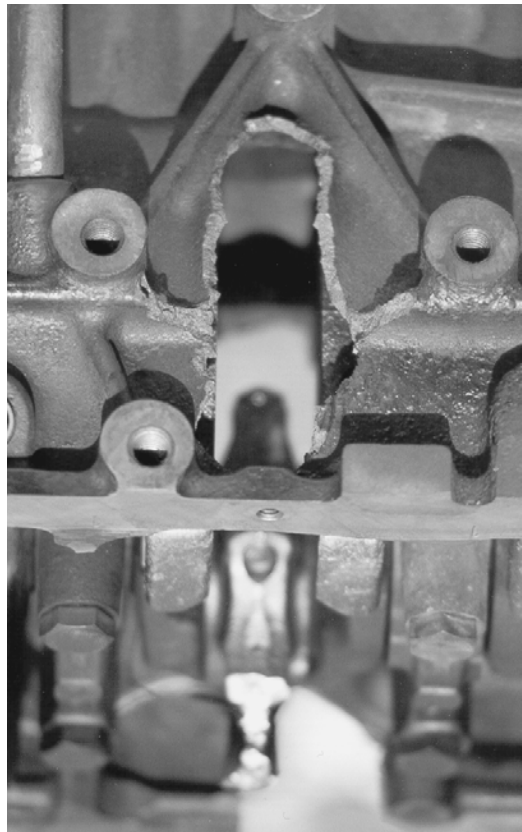


Bild 6.309
Detail dieses
Kurbelgehäuseschadens



zum Ausgangspunkt für einen Dauerbruch werden. Deshalb sind größere und große mittelschnelllaufende Dieselmotoren heute so konzipiert, dass das Kühlmittel – in Bohrungen und Kühlwasserringen geführt – nicht mehr mit dem Zylinderkurbelgehäuse in Berührung kommt.

Beispiel: Das Zylinderkurbelgehäuse eines größeren Dieselmotors hat in den Zylinderbuchsen-Aufnahmebohrungen am oberen und unteren Einpass großflächige, tiefe «Anfressungen» (Bild 6.310). Teilweise ist der obere Einpass zur Buchsenbundauflage («Balkon») durchgefressen. Der Wasserraum selbst zeigt stärkere Anfressungen sowie einen dicken Rostbelag. Kavitation führte zu einem Wassereinbruch in das Schmieröl am unteren Einpass der Zylinderbuchsen-Aufnahmebohrungen (Bild 6.311), was Rostnarben an der Kurbelwellenwange beweisen. Der große Wasseranteil im Schmieröl verursachte einen Lagerfresser. Als weitere Folge wurden die Zylinderköpfe wegen absinkenden Kühlwasserspiegels im Motor thermisch überbeansprucht. Es kam wegen der Überhitzung zu extremen Materialabtragungen am Boden der Zylinderköpfe und an Kolben. Die ausgeprägten Kavitationsschäden sind auf nicht geeignetes Kühlwasser zurückzuführen, was auch der extreme Rostansatz im gesamten Kühlwasserkreislauf beweist. Der Werkstoffabtrag am oberen Einpass führte zur Spielvergrößerung zwischen Buchsenbundauflage, Einpass und Bohrung im Zylinderkurbelgehäuse.

Schäden an der Ölwanne werden bei Fahrzeugmotoren meist von Schlag- und Stoßbeanspruchung verursacht, wenn die Ölwanne «Grundberührung» bekommt. Bei Motoren für allgemeine Verwendung, z.B. Bahn- bzw. Schiffsmotoren, besteht diese Gefahr nicht. Schäden an deren Ölwannen sind meist von Schweißfehlern, Schwingungen (angeregt vom Motor) und im Extremfall von Ölnebelexplosionen im Kurbelraum verursacht.



Bild 6.310
Kavitation an der oberen
Zylinderbuchsen-Aufnahme-
bohrung