

## 6.3 Schadenfälle an Komponenten und Bauteilen – Schadenanalyse

### 6.3.1 Kühlsystem und Motorkühlung

Mangelnde Funktion und Ausfälle bei der Kühlung führen im Extremfall zur Überhitzung und in der Regel über kurz oder lang zum Totalschaden eines Motors. Das gilt gleichermaßen sowohl für mit Luft- als auch für mit Flüssigkeit arbeitende Kühlsysteme. Da Luftkühlung vor allem wegen der zunehmend größeren spezifischen Belastung der Motoren immer seltener angewendet wird, sollen im Folgenden Funktion und mögliche Schadenfälle bei Flüssigkeitskühlsystemen betrachtet werden.

Bild 6.13 zeigt einen schwerwiegenden Schaden, der offenkundig von einem Totalausfall der Kühlung herrührt. Die Ursachen mögen zuweilen recht einfacher Natur sein. Die Schäden können sich längerfristig anbahnen infolge stetigen Verlustes an Kühlflüssigkeit bei kleineren Undichtigkeiten, z.B. bei defekten Dichtungen an Verbindungsstellen, bei Porositäten oder bei übermäßigen Leckagen an der Gleitringdichtung der Wasserpumpe, um nur einige Möglichkeiten zu nennen. Es können aber auch mehr oder weniger abrupte Verluste an Kühlflüssigkeit sein, wie sie beispielsweise bei Marderverbiss, beim Abrutschen eines nicht genügend gesicherten Schlauches oder beim Platzen des Schlauches bzw. von sonstigen Kühlsystembauteilen sowie bei überhitztem Kühlsystem mit einem Auswurf von Kühlflüssigkeit durch die Entlüftung einhergehen. In aller Regel sind Spuren solcher Kühlmittelverluste gut sichtbar.



Bild 6.13 Risse an Ventilsteg und Brennkammer eines Pkw-Wirbelkammermotors

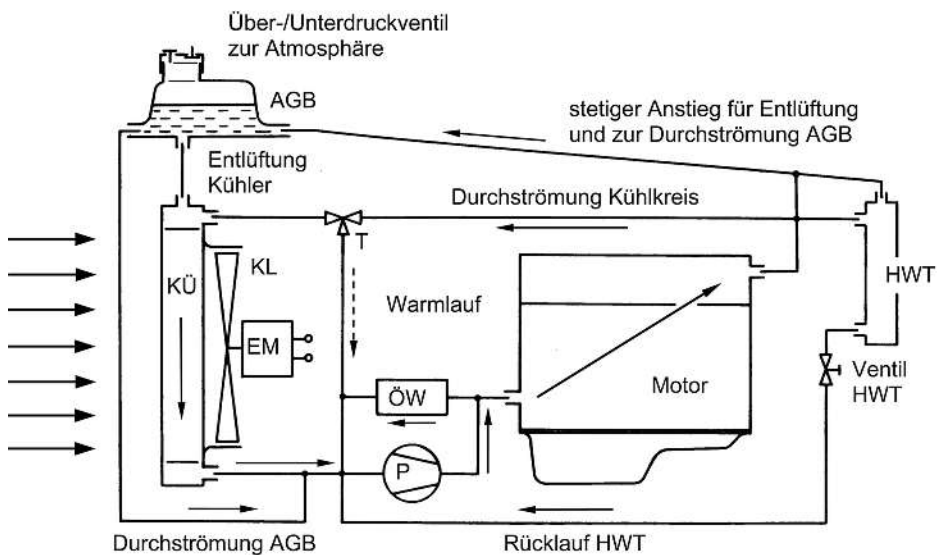


Bild 6.14 Kühlkreislauf eines Kraftfahrzeugs mit Flüssigkeitskühlung (schematisch)

P	Kühlmittelpumpe	KL	Kühlerlüfter
T	Thermostat	EM	Elektroantrieb Kühlerlüfter
KÜ	Fahrzeugkühler	ÖW	Ölwärmetauscher
AGB	Ausgleichsbehälter	HWT	Heizungswärmetauscher

Womit allerdings die Ursache noch nicht gefunden ist, sondern nur die Auswirkung infolge einer Fehlfunktion sichtbar wird. Bei den Gleitringdichtungen der Wasserpumpen ist sogar ein sehr kleiner Kühlmittelverlust infolge Leakage als normal anzusehen. Es gibt nämlich keine, insbesondere bewegten Dichtungen, die vollkommen dicht sind. Eine gewisse, wenn auch nur sehr kleine Leakage, ist sogar als immanenter Bestandteil der Dichtfunktion anzusehen. Damit das nicht so sehr ins Auge fällt, wird vielfach die Leakage an den Wellendichtungen der Wasserpumpen in kleinen Behältern aufgefangen, verdampft und somit ohne auffällig zu werden an die Atmosphäre abgegeben. Mit einer Kontrolle des Flüssigkeitsstandes im Ausgleichsbehälter des Kühlsystems, z.B. im Rahmen der Inspektionen, können die Dichtheit des Systems kontrolliert und kleine Fehlmengen ergänzt werden.

Leider sind die eigentlichen Ursachen von Fehlfunktionen bei Flüssigkeitskühlsystemen nicht so einfach zu erkennen. Es ist deshalb notwendig, die Funktionen der einzelnen Kühlsystembauteile und des Systems im Ganzen näher anzusehen (Bild 6.14).

Ein Flüssigkeitskühlsystem für Verbrennungsmotoren besteht prinzipiell neben den erforderlichen Schläuchen und Rohrleitungen aus dem zu kühlenden Motor, der Kühlmittelpumpe, dem Fahrzeugkühler, einem Thermostat, einem Kühlerlüfter mit Elektroantrieb (oder mechanischem Antrieb), einem Heizungswärmetauscher sowie dem Ausgleichsbehälter. Immer öfter ist auch ein Ölwärmetauscher vorgesehen. Die einzel-

nen Komponenten des Kühlsystems stellen ein Strömungsnetzwerk dar, mit dem mittels Konvektion in der Regel die Wärmeabfuhr von den zu kühlenden Bauteilen erfolgt. Die abzuführende Wärme wird bei Kraftfahrzeugen mit dem Kühlmittel zum Kühler und dort weiter an die Luft übertragen.

Als Kühlmittelpumpen werden generell Radialkreispumpen oder Pumpen mit axialem Flügelrad angewendet. Die Radialkreispumpen werden in der Regel von dem zu kühlenden Motor selbst angetrieben (Bild 6.15). Bei elektrisch mit größerer Drehzahl betriebenen Pumpen ist ein Axialflügelrad zweckmäßig.

Ein wichtiges Merkmal der Kühlmittelpumpen ist, dass im Gegensatz zu Kolbenpumpen der Durchfluss auch bei abgestelltem Motor offen ist. So kann sich im Kühlkreislauf infolge der aus Wärmezu- und -abfuhr entstehenden Dichteunterschiede nahezu von selbst eine gewisse Kühlmittelströmung ausbilden (Thermosyphoneffekt), mit der auch die beim Nachheizen des stehenden Motors anfallende Restwärme noch abgeführt werden kann. Die Thermosyphon-Strömung ist maßgeblich von der Wärmeabfuhr am Fahrzeugkühler bestimmt. Im Stand muss dazu vielfach die notwendige Kühlung ggf. mit dem Elektrolüfter sichergestellt werden. Da die erforderliche Antriebsleistung für Kühlmittelpumpen einerseits einen nicht zu vernachlässigenden mechanischen Verluste für den Motor darstellt und andererseits vielfach bereits mit der Thermosyphon-Strömung Einiges an Wärme abgeführt werden kann, werden Kühlmittelpumpen neuerdings auch dem Kühlungsbedarf entsprechend angetrieben bzw. abgeschaltet. Gut geeignet sind dazu Elektropumpen.

Wichtig für das Verständnis des Kühlsystems sind die Zusammenhänge beim Warmlauf und im betriebswarmen Zustand.

Während des Warmlaufs wird die Kühlflüssigkeit vom Thermostat durch die Kurzschlussleitung (gestrichelter Pfeil) im inneren Kreislauf unmittelbar zurück in den

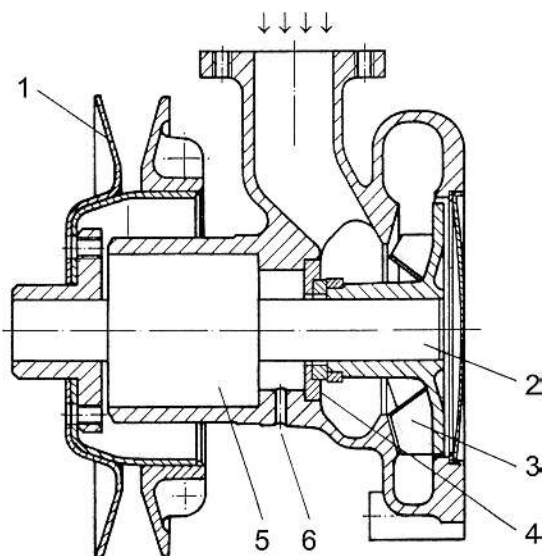


Bild 6.15  
Radialkreispumpe eines  
Fahrzeugkühlsystems  
1 Riemenscheibe zum  
Pumpenantrieb  
2 Welle  
3 Schaufel des Flügelrades  
4 Gleitringdichtung  
5 Lagerung  
6 Bohrung zur Abfuhr  
von Leckage

Motor geleitet. Der Weg zum Kühler ist abgesperrt. So kann die umlaufende Kühlflüssigkeit relativ schnell erwärmt werden. Der im Nebenschluss zum Motorblock angeordnete Ölwärmetauscher ist eigentlich zur Kühlung des Schmieröls bei warm gefahrenem Motor vorgesehen. Da aber das Schmieröl beim Warmlauf des Motors u.U. schneller «auf Temperatur kommt» als die oft vergleichsweise große Menge an Kühlflüssigkeit, kann mit dem Ölwärmetauscher der Warmlauf ggf. sogar noch etwas beschleunigt werden. Das ist besonders im Winter von Nutzen, wenn bei Minusgraden der Warmlauf kaum unter etwa 20 km Fahrstrecke abgeschlossen werden kann. Es ist in diesem Zusammenhang insbesondere noch darauf zu verweisen, dass die im Winter oft zu beobachtende Praxis, den Motor im Stand bei Leerlauf zum Vorwärmen zu betreiben, generell als sehr schädlich zu werten ist. Übermäßig erforderliche Kraftstoffzugabe zur Sicherung des Motorlaufs führt zu verhältnismäßig viel Kraftstoff an der Zylinderwand, Schmierölverdünnung und deshalb schlechter Schmierung bis hin zu einem beobachtbaren Ansteigen des Ölstands in der Ölwanne. Auch aus der Verbrennung resultierendes Wasser gelangt mit den Durchblaseverlusten (Blow-by) an den Kolbenringen vorbei in das Schmieröl und verschlechtert die Schmierfähigkeit. Die Folge können Korrosion sowie vermehrter Verschleiß ganz allgemein an den Lagerstellen bis hin zu erheblichen Fresserscheinungen an Kolben sein.

Grundsätzlich sollten Kurzstrecken im Kaltbetrieb soweit möglich vermieden und der Warmlauf möglichst schnell realisiert werden. Kaltlauf verursacht wegen großer Viskosität des Öls beachtliche Reibverluste und davon bedingten Mehrverbrauch an Kraftstoff und mehr Schadstoffe (CO und CH).

Schneller Warmlauf ist am besten mit sofortigem Losfahren nach dem Start und Betrieb des Motors anfangs bei kleiner Belastung und mittleren Drehzahlen im mittleren Gang zu bewerkstelligen. Noch besser ist es, mit Hilfe einer Zusatzheizung Kühlmittel und Schmierkreislauf vor dem Start anzuwärmen. Die Energie kann mit Kraftstoff aus dem Tank oder zweckmäßig elektrisch von der Steckdose bereitgestellt werden.

Mit zunehmender Erwärmung des Kühlmittels gibt der Thermostat den Durchfluss zum Fahrzeugkühler in den eigentlichen Kühlerkreislauf frei. Der Kurzschlusszweig wird im entsprechenden Maß gedrosselt, so dass bei mittleren Temperaturen am Thermostat eine Aufteilung der Strömung erfolgt. Es stellt sich an der Zusammenführung der Zweigströme vor der Pumpe eine Mischtemperatur ein. Die bislang noch im Kühler befindliche kalte Kühlmittelmenge wird mehr oder weniger sukzessive in die Erwärmung einbezogen. Da mit dem Zuschalten des Kühlers die insgesamt im Umlauf befindliche Flüssigkeitsmenge zunimmt, verzögert sich der Warmlauf. Bei kalten Außentemperaturen (Frost) besteht darüber hinaus die Gefahr, dass bei zu schnellem Öffnen des Thermostats ein so großer Kühlmittelstrom mit Minusgraden aus dem Kühler in den Motor zugeführt wird, dass ein sogenannter «Kälteschock» auftritt. Die Folge sind u.U. nachteilige thermisch bedingte Spannungen, die zu erheblichen Zusatzbeanspruchungen bei den Motorbauteilen führen können.

Erst bei Erreichen der vorgesehenen Betriebstemperatur wird die Hauptmenge des Kühlmittelstroms durch den Kühler geleitet. Im Regelbereich des Thermostats erfolgt je nach Abweichung der Ist-Temperatur vom Sollwert eine entsprechende Aufteilung

der Kühlmittelströme auf den Kurzschluss- bzw. den Kühlerzweig. Die temperaturabhängige Steuerung der Kühlmittelströme wird von einem Dehnelement im Thermostat besorgt. Nimmt bei langsamer Fahrt und viel Leistung des Motors (z.B. Anhängerbetrieb und große Steigung der Fahrbahn) die Temperatur weiter zu, so wird dann der gesamte Kühlmittelstrom durch den Fahrzeugkühler geleitet (Kurzschlusszweig zu). Zur Regelung der Kühlmitteltemperatur muss schließlich mit dem Kühlerlüfter der Luftdurchsatz durch den Fahrzeugkühler vergrößert werden. Das Zuschalten des Lüfters erfolgt von einem Kühlmitteltemperatursensor. Bei vielen Fahrzeugen ist aber noch mechanischer Antrieb des Kühlerlüfters — meist mittels Riementrieb von der Kurbelwelle aus — vorgesehen. Und der Kühlerlüfter wird permanent angetrieben. Das bedeutet schließlich, dass bei einer auf steilen Anstieg folgenden Abfahrt mit kleiner Motordrehzahl die Lüfterdrehzahl nicht mehr genügt, um die infolge Nachheizens noch anfallende Wärme sicher abführen zu können. Für solche Extremfälle sind elektrisch betriebene Lüfter besser geeignet, um Überhitzungen zu vermeiden.

Die für den Antrieb eines Kühlerlüfters erforderliche Leistung ist nicht unerheblich. So kann z.B. bei einem 4-Zylinder-Traktormotor mit etwa 100 kW Nennleistung die für den Lüfter notwendige Antriebsleistung ohne Weiteres beachtliche 15 kW bei Maximaldrehzahl betragen. Und um diesen Betrag ist die Nutzleistung des Motors kleiner als eigentlich möglich wäre. Es werden deshalb zunehmend auch bei mechanischem Lüfterantrieb Einrichtungen zur bedarfsabhängigen Zuschaltung des Lüfterantriebs (Magnetkupplungen, Visco®-Kupplungen usw.) angewendet.

Als Problem stellt sich bei Kühlmitteltemperaturen nahe dem Siedepunkt dar, dass der Dampfdruck im Kühlmittel erheblich zunimmt. Das bedeutet, dass an den heißesten Stellen im Kühlmittel und an Stellen mit kleinem statischen Druck Kavitation eintreten kann. Kavitation führt zu einem wegen der Blasenbildung zu einer deutlichen Verkleinerung des Kühlmittelmassenstroms und damit einher gehender weiterer Temperaturzunahme. Und zum anderen verursacht Kavitation erheblichen Verschleiß infolge Erosion insbesondere an den Laufrädern der Kühlmittelpumpen, weil dort infolge der großen Strömungsgeschwindigkeiten der statische Druck am kleinsten ist (Bild 6.16).

Um Kavitation bei der Kühlmittelpumpe möglichst zu vermeiden, sollte die Pumpe im kühleren Zweig des Kreislaufs zwischen Austritt Kühler und Eintritt Motorblock angeordnet sein.

Ganz ähnliche Verschleißerscheinungen wie bei Kavitation können auch bei schlecht gereinigten Gussteilen von in Umlauf geratenem Kernsand verursacht werden. Schmutz und Verschleiß sind dann überall im gesamten Kühlkreislauf zu finden. Abhilfe ist nur mit gründlicher Reinigung möglich. Allerdings ist die Reinigung der Teile im Fertigungsprozess in aller Regel so gut, dass Schmutz als Schadenursache in der Praxis selten auftritt.

Kavitationserscheinungen ist schwierig zu begegnen. Grundsätzlich sind bei der Auslegung des Kühlsystems möglichst große Strömungsquerschnitte im Hauptstrom vorzusehen. Das gilt auch für den Wasserraum im Motor selbst. An Stellen mit engen Querschnitten treten nämlich große Strömungsgeschwindigkeiten auf. Und das führt zu kleinen statischen Drücken bis hin zu Dampfblasenbildung und Kavitationsschä-



Bild 6.16

Folgen von Kavitation am Laufrad einer Wasserpumpe

Links: Wasserpumpenrad in der Draufsicht

Rechts: Die Schaufel des Laufrades hatte ursprünglich Trapezform wie in Bild 6.15 dargestellt.

den. Solche Schäden können manchmal an Wasserdurchtritten zum Zylinderkopf oder an der Zylinderkopfdichtung vorkommen. (Anm.: Mit der Größe der Durchtritts-querschnitte an der Zylinderkopfdichtung wird die Gleichverteilung der Kühlmittelströmung im Motorblock eingestellt.) Mit großen Strömungsquerschnitten im gesamten Kühlkreislauf wird erreicht, dass der Strömungswiderstand klein bleibt. Auf diese Weise ist dann auch weniger Antriebsleistung für die Kühlmittelpumpe notwendig. Bei Bauteilen im Nebenstrom wie bei der in Bild 6.14 dargestellten Anordnung des Ölwärmetauschers bzw. des Heizungswärmetauschers sollten dagegen eher kleine – der beabsichtigten Wärmeabfuhr entsprechende – Querschnitte realisiert sein.

Ausgesprochen wichtig für die Vermeidung von Kavitation im Kühlsystem ist der Ausgleichsbehälter. Der Ausgleichsbehälter ist ein Druckbehälter. Beim Warmlauf erfolgt mit der Ausdehnung des Kühlmittels bei zunehmender Temperatur eine Zunahme des Drucks im gesamten Kühlsystem. Mit dem größeren Druck kann sonst auftretender Kavitation entgegengewirkt werden. Wichtig ist, dass der Ausgleichsbehälter kontinuierlich mit einem Zweigstrom des erwärmten Wassers durchströmt wird. Die Temperaturzunahme im Ausgleichsbehälter ergibt mit der Erwärmung des Luftpolders über dem Flüssigkeitsspiegel eine schnellere Druckzunahme und auf diese Weise noch mehr Sicherheit gegen das Auftreten von Kavitation.

Mit Rücksicht auf die Auslegung und die davon bestimmte Haltbarkeit der Kühlsystembauteile darf der Druck im Kühlsystem nicht zu groß werden. Deshalb sind in der Verschlusskappe des Ausgleichsbehälters 2 Ventile vorgesehen. Ein Ventil dient der Begrenzung des Überdrucks auf einen zulässigen Wert. Im Extremfall wird bei zu großem Überdruck Luft aus dem Raum des Ausgleichsbehälters abgelassen. Dieses abgelassene Luftvolumen muss nach dem Abstellen des Motors und Erkalten des Kühlsystems durch das Unterdruckventil ohne viel Widerstand wieder in den Aus-

gleichsbehälter zurückströmen können. Die Funktion des Ausgleichsbehälters und der Ventile ist entscheidend für das Vermeiden von Kavitation.

Als besonders schädlich für die Funktion des Kühlsystems stellt sich in den Kreislauf gelangte Luft dar. Deshalb müssen sämtliche Zu- und Abflüsse zum Ausgleichsbehälter unterhalb des Wasserspiegels angeschlossen sein. Und alle Zuflüsse zum Ausgleichsbehälter hin sollen stetig ansteigend ausgeführt werden. Das bedeutet, der Ausgleichsbehälter gehört im Kühlsystem an die höchste Position. Durchhängende Entlüftungsleitungen müssen vermieden werden, weil Gasblasen sonst nicht in den Ausgleichsbehälter abströmen können und auf diese Weise die nötige Durchströmung blockiert wäre.

Die Notwendigkeit für eine sicher funktionierende Entlüftung ist weniger von der Anbindung des Kühlsystems durch das Ausgleichsgefäß an die Atmosphäre und die Möglichkeit, dass unter extremen Bedingungen Luft in den Kühlkreis gesaugt werden könnte, bedingt als vielmehr davon, dass auch bei bestem Zustand der Zylinderkopfdichtung stets ein wenig Brenngas in den Kühlkreislauf gelangt. Es gibt keine vollkommene Dichtheit!

Gasblasen sind bei allen Bauteilen mit nach unten gerichteter Durchströmung nach oben zum Ausgleichsbehälter hin abzuleiten. Nur auf diese Weise kann für die gesamte Nutzungsdauer eines Motors gesichert werden, dass die Kühlung auch bei ggf. vermehrt anfallenden Brenngasen sicher funktioniert. Andernfalls kann bei fehlender Ableitung der Gase nach anfänglicher Verschlechterung der Wärmeabfuhr schließlich die Durchströmung vollkommen zum Erliegen kommen. Das wäre gleichbedeutend mit einem Kollaps der gesamten Motorkühlung mit den entsprechenden Folgen (s. Bild 6.13).

Wichtiges Bauteil für die Funktion des Kühlsystems ist der Thermostat. Bei Überhitzungsschäden ist deshalb notwendigerweise dessen Funktion in Abhängigkeit von der Temperatur im Wasserbad zu prüfen. Entscheidend ist aber auch, dass am Dehnelement des Thermostats stets Kühlflüssigkeit entsprechender Temperatur vorbei strömen kann. Ansammlungen von Brenngas bzw. Luft um das Dehnelement herum führen im Extremfall dazu, dass trotz heißer Temperaturen im Motor der Zweig zum Kühler nicht freigegeben wird. Die Folge ist, dass der Motor überhitzt.

Bei einfacheren Kühlsystemen ist der in Bild 6.14 dargestellte innere Kurzschlusszweig zum Motor nicht vorhanden. Der Kurzschlusszweig ist gewissermaßen in den Fahrzeugkühler hinein verlegt. Und der Thermostat wirkt ausschließlich wie eine temperaturabhängig gestellte Drossel. Solche einfachen Kühlkreisläufe sind weniger aufwendig (billiger). Der Nachteil ist aber, dass der als schädlich anzusehende Warmlauf des Motors länger dauert. Damit ein Kühlkreislauf mit Drosselventil überhaupt funktioniert, muss durch eine kleine Öffnung an dem geschlossenen Thermostat vorbei ein minimal erforderlicher Kühlmittelstrom fließen. Das ist notwendig, damit beim Warmlauf aufgeheizte Kühlflüssigkeit das Öffnen des Thermostats bewirken kann. Ist diese funktionell wichtige Öffnung z.B. wegen Verschmutzung zugesetzt, bedeutet das wiederum, dass wegen fehlender Erwärmung des Dehnelements die Strömung durch den Kühler nicht freigegeben wird. Überhitzung ist die Folge. Wichtig erscheint auch, dass die kleine Öffnung oberhalb des Dehnelementes angeordnet ist, damit ggf. eine Ansammlung von Brenngas möglichst weitgehend vermieden wird.

Die Ausführungen zeigen, dass die Funktion eines Kühlsystems u.a. maßgeblich von der Dichtheit der Zylinderkopfdichtung bestimmt ist. Übermäßiger Brenngasgehalt der Kühlflüssigkeit führt gewissermaßen zwingend zu einer Überhitzung des Motors, davon bedingtem Verzug des Zylinderkopfes und wiederum davon bedingt zu vermehrter Undichtheit bis hin schließlich zur Rissbildung im Kopf infolge von nicht ertragbaren Temperaturen und Spannungen im Bauteil.

Manchmal ist ungenügende Dichtheit von Zylinderkopfdichtungen auch daran zu bemerken, dass die Fahrzeugheizung wegen zu vielen Brenngases im Heizungswärmetauscher nicht mehr funktioniert.

### **Wärmeübertrager**

Die bei einem Motor anfallenden und mit dem Kühlsystem abzuführenden Wärmeströme rühren hauptsächlich von der Verbrennung im Arbeitsraum des Motors (Zylinder) her. Aber auch infolge Reibung entsteht Wärme. Außerdem wird beim Vorverdichten der Luft im Lader ein Teil der Verdichtungsarbeit in Wärme umgewandelt, die ebenfalls abgeführt werden muss. Und im Zuge der Abgasrückführung ist auch Abgas zu kühlen. Der bisweilen noch deutlich größere Umfang der erforderlichen Kühlmaßnahmen ist in Bild 6.17 beispielhaft dargestellt.

Im Einzelnen hängt die Größe der abzuführenden Wärmeströme ab von

- ☐ thermodynamischem Prozess und dessen Bedingungen,
- ☐ Arbeitsverfahren (2- bzw. 4-Takt),
- ☐ Größe und Bauart der Motoren,
- ☐ Leistungsdichte,
- ☐ konstruktiven Merkmalen,
- ☐ Temperaturniveau, auf dem Bauteile und Betriebsmittel jeweils gehalten werden sollen, und den
- ☐ jeweiligen Nebenbedingungen, die mit den Betriebsanforderungen und aus Sicherheitsgründen an den Motor gestellt werden.

Der gesamte vom Motor mit dem Kühlmittel abzuführende Wärmestrom beträgt je nach Motorart und -größe 40...100% der Nennleistung bzw. 20...40% des mit dem Kraftstoff zugeführten Wärmestroms. Das zeigt die Bedeutung der Kühlung insgesamt. Wärmeübertrager («Kühler»; «Wärmetauscher») und Kühlkreislauf sind also keineswegs nur ein bloßes «Motorzubehör»!

Die Leistungskonzentration, vor allem im Zusammenhang mit der Aufladung, führt – bezogen auf die Motorgröße – zu immer größeren abzuführenden Wärmeströmen, wobei wegen besserer Motorwirkungsgrade die Verlustwärme relativ sogar abnimmt. Mit sogenannter Hochaufladung und Ladeluftkühlung, aber auch infolge Weiterentwicklung der Motorkonzeptionen haben sich die Wärmebilanzen verändert. Während im Motorkühlwasser (Zylinder- und Zylinderkopfkühlung) weniger Wärme abgeführt wird, hat der Wärmestrom aus Ladeluft und Motorenöl beachtlich zugenommen. Für die einzelnen Motorgattungen ergeben sich z.T. recht unterschiedliche Werte bezüglich der abzuführenden Wärmeströme (Tabelle 6.2).