

Die Auspuffventilschäden bei den mittleren
und kleinen Dieselmotoren

von Yasuo Nagahata

Techn.Forschungsanstalt der
Firma Hitachi-Schiffbau AG.

In der neueren Zeit werden bei den mittleren und kleinen Dieselmotoren immer höhere Drehzahlen und immer höhere Leistungen verlangt, und gleichzeitig geht man aus Gründen der Wirtschaftlichkeit darauf aus, die Qualität der Kraftstoffe, mit denen ein Betrieb der Motoren möglich sein soll, immer niedriger anzusetzen. Aus diesem Grunde wird die Wärmebelastung der Umgebung der Verbrennungskammer wesentlich erhöht, und diese erhöhte Wärmebelastung ist auch verantwortlich für alle möglichen Motordefekte; einer der am stärksten hervortretenden, auf die Wärmebelastung zurückgehenden Defekte ist der Auspuffventilschaden. Ein Auspuffventilschaden kann auch schon seinem äußeren Aussehen nach ganz verschiedener Art sein, die gegenseitige Einwirkung zwischen dem Metall und den heißen Verbrennungsgasen, die Wärmespannungen und die mechanischen Spannungen, die Einflüsse der sich festsetzenden und ablagernden Verbrennungsrückstände und noch viele andere komplizierte Erscheinungen hängen auf das engste mit der Entstehung der Auspuffventilschäden zusammen. Um einen Motor zu planen, braucht man deshalb eine sich über sehr lange Zeit hin erstreckende Erfahrung, die auf der Beobachtung und der Prüfung der bei den Versuchen vorkommenden Fehler beruht. In der vorliegenden Arbeit soll über die Auspuffventilschäden aufgrund einer reichen Erfahrung mit mittleren und kleinen Dieselmotoren berichtet werden, dabei sollen die Ursachen, der Mechanismus und die Maßnahmen zur Verhütung dieser Schäden vom praktischen Gesichtspunkt aus dargelegt werden.

1. Vorwort

In der neueren Zeit ist bei den verschiedenen Arten der Brennkraftmaschinen, insbesondere bei den kleineren und mittleren Dieselmotoren eine Tendenz zur Erhöhung der Drehzahl und zur Steigerung der Leistung deutlich zu beobachten. Der Erhöhung der Leistungskennlinien der Motoren kommt deshalb eine wesentliche Bedeutung zu. Diese Steigerung der Drehzahl und der Leistung bei den kleinen und mittleren Dieselmotoren hat insbesondere im Zusammenhang mit den Schwingungen der Motoren mit der notwendigen Materialfestigkeit und mit der Wärmebelastung viele schwierige Probleme mit sich gebracht; insbesondere müssen hier die erhöhte Wärmebelastung in der Umgebung der Verbrennungskammer und die sich hieraus ergebenden Maßnahmen in Betracht gezogen werden, und im Zusammenhang mit der Verwendung niederwertiger Kraftstoffe und im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit und die Lebensdauer des Motors, sowie auf die Erhöhung seiner Zuverlässigkeit dürften diese Probleme mit Recht als überaus wichtig und dringend betrachtet werden. Die Störungen jedoch, welche durch die im Gefolge einer erhöhten Wärmebelastung auftretenden Auspuffventilschäden entstehen, sind eines der Probleme, welche schnellstens Gegenmaßnahmen erfordern.

Die in erster Linie verantwortliche Ursache der Auspuffventilschäden ist ganz selbstverständlich in der Tatsache zu suchen, daß die Auspuffventile während ihres Betriebes auf hohe Temperaturen erhitzt werden und in diesem erhitzten Zustand sich fortwährend wiederholenden Stoßbelastungen ausgesetzt sind. Man kann jedoch nicht sagen, daß der Zusammenhang zwischen dieser grundlegenden Ursache der

Schäden und den tatsächlich auftretenden Auspuffventilschäden durchweg als ganz geklärt bezeichnet werden könne. So stellt z.B. die gegenseitige physikalische und chemische Einwirkung zwischen dem Metall und den heißen Verbrennungsgasen eine außerordentlich komplizierte Erscheinung, dies rührt wahrscheinlich auch daher, daß gleichzeitig noch einige andere unmittelbare Ursachen überlagert sind. Von diesen Ursachen hat man durch Vermutung oder Hypothese die mit bezug auf die augenblicklich auftretenden Beschädigungen wichtigsten Ursachen herausgegriffen, man hat entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen und sich von dem Erfolg dieser Gegenmaßnahmen überzeugt und so ist man Schritt für Schritt auf dem Wege der Verbesserung vorwärts gegangen, und es ist anzunehmen, daß dieses Vorgehen den besten praktischen Erfolg verspricht, wenn es sich darum handelt, Gegenmaßnahmen gegen die Auspuffventilschäden festzulegen.

In der vorliegenden Arbeit werden Überlegungen im Zusammenhang mit den bei der praktischen Erfahrung der Verfasser bisher festgestellten Auspuffventilschäden der verschiedene Art Überlegungen angestellt und es werden Versuchsergebnisse mitgeteilt; weiterhin bezieht sich die Arbeit auf die Darlegung der verschiedenen Ursachen der Auspuffventilschäden bei den mittleren und kleinen Dieselmotoren und auf die vorgeschlagenen Gegenmaßnahmen.

2. Die Ursachen der Abbrandschäden an der Ventilspindel

Die an den Auspuffventilen der Dieselmotoren auftretenden Störungen sind im wesentlichen folgende: Risse und Brüche am Auspuffventilteller, Abbrandschäden an den Teilen der Ventiltellerbodenfläche, welche unmittelbar den Flammen

ausgesetzt sind und Schäden an der Berührungsfläche mit dem Ventilsitz (Durchblasschäden); die an 2.Stelle genannten Schäden treten besonders häufig bei den großen und den mittleren Zweitaktmotoren auf, bei denen die Wärmebelastung der Auspuffventile besonders groß ist und bei denen als Kraftstoff niederwertige Schweröle verwendet werden; bei den kleinen schnellaufenden Dieselmotoren sind diese Schäden weniger häufig.

Das Durchblasen an der Dichtfläche ist eine Störung, die wir am häufigsten bei den Auspuffventilen der mittleren und der kleinen Dieselmotoren finden; die Abb.1(a) zeigt eine Ventilspindel, bei welcher an der Dichtfläche mit dem Ventilsitz tiefe Aushöhlungen entstanden sind.

Für die Entstehung dieser Schäden werden folgende Ursachen angenommen:

- (1) Die durch das im Kraftstoff enthaltene Vanadium (V) hervorgerufene Korrosion, die sogenannte Vanadiumattacke
- (2) der Abbrand, welcher dadurch hervorgerufen wird, daß die heißen Verbrennungsgase mit hoher Geschwindigkeit durch den an der Dichtfläche entstehenden Spalt hindurchblasen;
- (3) eine ungenügende Hochtemperaturbeständigkeit des Ventilspindelmaterials.

Diese Ursachen wollen wir nun der Reihe nach im einzelnen besprechen.

3. Die durch das im Kraftstoff enthaltene Vanadium hervorgerufene Korrosion

Durch die Verbrennung des Schwerölkraftstoffes wird das im Schweröl enthaltene Vanadium zu Vanadiumoxyd oder zu einem

Natriumsalz des Vanadiums, welches an der heißen Stahloberfläche haften bleibt und schmilzt; die Tatsache, daß dies zu einer Korrosion der Stahloberfläche führt, ist bei den Gasturbinenschaufeln, den Überhitzungsrohren von Kesseln und dergleichen eine wohlbekannte Erscheinung. Auch bei den Dieselmotoren sind es insbesondere die großen Zweitaktmotoren, als deren Hauptkraftstoff ein niederwertiges Schweröl mit hohem Vanadiumgehalt verwendet wird, an deren Auspuffventilen und insbesondere an der den höchsten Temperaturen ausgesetzten Ventiltellerbodenfläche, wie wir an vielen Beispielen beobachten können, eine Korrosion entsteht, als deren Ursache diese Vanadiumattacke zu betrachten ist. In der Abb.2(a) haben wir eine modellhafte Abbildung dieser Korrosion gezeigt. Die mengenmäßige Verteilung des Abbrandes in radialer Richtung auf der Bodenfläche ist in der Abb.2(b) dargestellt; diese Verteilung des Abbrandes stimmt ihrem Verlauf nach sehr gut mit der Temperaturverteilung auf der Oberfläche überein. Die Ergebnisse der radiochemischen Analyse der von den Abbrandstellen entnommenen Ablagerungen sind in der Tafel 1 zusammengestellt; dabei wurde das Vorhandensein großer Mengen von V, Cl und Na festgestellt. Diese Analyse berechtigt zu der Annahme, daß die Korrosion, wie wir sie in der Abb.2 beobachten, tatsächlich im wesentlichen von einer Vanadiumattacke herrührt.

An der Auspuffventilbodenfläche der kleinen Viertaktmotoren wird die Entstehung einer derartigen Korrosion nahezu überhaupt nicht beobachtet (vergleiche Abb.1(b)). Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß der Vanadium- und der Natriumgehalt des als Kraftstoff für diese kleinen Vier-

taktmotoren verwendeten A-Schweröles wesentlich niedriger ist als der Vanadiumgehalt und der Natriumgehalt der niederwertigen Schweröle (C-Schweröl), und daß die Oberflächentemperatur der Auspuffventile, wo sich die das Vanadium und das Natrium enthaltenden Verbrennungsrückstände festsetzen, wesentlich niedriger ist als die Oberflächentemperaturen bei den großen Zweitaktmotoren.

In dem Vanadiumoxyd und in dessen Natriumsalzen, welche sich bei der Verbrennung der Vanadium und Natrium enthaltenden Kraftstofföle bilden, sind, wie man annimmt, die in der Tafel 2 zusammengestellten chemischen Verbindungen enthalten, deren Schmelzpunkte im wesentlichen in dem Bereich von 550°C - 1000°C liegen.

Die Oberflächentemperatur der Auspuffventile bei den großen Zweitaktmotoren liegt je nach den Betriebsbedingungen bei 650°C oder in manchen Fällen auch noch höher, bei den kleinen Viertaktmotoren liegt diese Temperatur im allgemeinen höchstens bei 500°C . Somit besteht durchaus die Möglichkeit, daß das Vanadiumoxyd und die Natriumsalze des Vanadiumoxydes, welche sich an den Auspuffventilen der großen Zweitaktmotoren festsetzen, an der Ventiloberfläche schmelzen, während bei den Auspuffventilen der kleinen Viertaktmotoren eine solche Möglichkeit nur in ganz geringem Umfang gegeben ist.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Kraftstoffverbrauches, wie auch auf den immer größer werdenden zahlenmäßigen Anteil der mittleren und kleinen Motoren bei den Antriebsmotoren für Fahrzeuge aller Art kann man wohl an-

nehmen, daß es überhaupt nicht möglich ist, in der Zukunft einer Verschlechterung des Kraftstoffes für die mittleren und die kleinen Motoren auszuweichen; und deshalb muß man in erheblichem Umfang mit einer Vanadiumattacke auf die Dichtflächen von Ventilspindel und Ventilsitz dieser Motoren rechnen. Als Gegenmaßnahmen ist an eine Verringerung der Oberflächentemperatur der Auspuffventile und an die Entwicklung eines wärmebeständigen Stahles mit einer hervorragenden Widerstandsfähigkeit gegen die Korrosivität der Vanadiumattacke gedacht. Die erstgenannte Gegenmaßnahme ist eine dem Motorenhersteller gestellte Aufgabe, der sie im Zusammenhang mit der Verbesserung der Verbrennungseigenschaften der niederwertigen Öle in den schnellaufenden Motoren lösen muß, während die zweite Gegenmaßnahme in das Aufgabengebiet des Spezialstahlherstellers fällt; Forschung und Entwicklung sind auf diesem Gebieten zwar schon weit fortgeschritten, man hat jedoch den Eindruck, daß bis heute noch immer keine ganz bestimmten konkreten Lösungen herausgekommen sind.

4. Der von dem Durchblasen der heißen Gase herrührende Abbrand

Die in der Abb.1(a) beobachteten erheblichen Kavitationschäden, stellen aller Vermutung nach derartige Abbrandbeschädigungen dar, wie sie infolge des Durchblasens der heißen Verbrennungsgase entstehen. Ein besonderes Problem stellt hierbei "der an der Dichtfläche entstehende Spalt" dar, und man hat sich die Frage gestellt, auf welche Weise überhaupt dieser Spalt zustande kommt; hierbei hat man an die nachstehend aufgeführten verschiedenen Fälle gedacht:

4.1 Die Ablagerung der Verbrennungsrückstände an der Dichtfläche und ihre Abschälung

Wenn der in den Verbrennungsraum eingespritzte Kraftstoff und das an den Zylinderwänden haftende Schmieröl nicht vollständig zur Verbrennung kommen, dann entstehen die Verbrennungsrückstände, deren Hauptbestandteil der Kohlenstoff darstellt; und wenn nun die Verbrennungsgase in die Umgebung des Auspuffventiles strömen, dann findet an der Berührungsfläche (der Dichtfläche) zwischen Ventilspindel und Ventilsitz eine Ablagerung statt. Diese Ablagerung wird zwischen der Ventilspindel und dem Ventilsitz zusammengedrückt und sie wird genau an der Stelle, wo sich die Ventilspindel und der Ventilsitz berühren, zu einer Art Dichtung; wenn sich jedoch diese Dichtung infolge der Stöße, mit denen die Ventilspindel und der Ventilsitz aufeinanderprallen, teilweise ablöst, dann entstehen dadurch beim Schließen des Ventiles überall dort, wo sich diese Ablagerung abgeschält hat, enge Spalte, durch welche die heißen Verbrennungsgase mit sehr hoher Geschwindigkeit durchblasen

Wenn wir nun die Möglichkeit der Entstehung von Spalten aufgrund eines mit einem derartigen Mechanismus ablaufenden Prozesses, sowie die Möglichkeit der Entstehung von Abbrandschäden annehmen, dann können wir, um dies zu verhindern, an folgende Maßnahmen denken:

(1) Durch eine Verbesserung des Kraftstoffeinspritzsystems des Schmier-systemes, sowie durch eine Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Motor und Ladegebläse kann man für eine gute Verbrennung des Kraftstoffes sorgen und die Entstehung von Verbrennungsrückständen auf ein äußerstes Min-

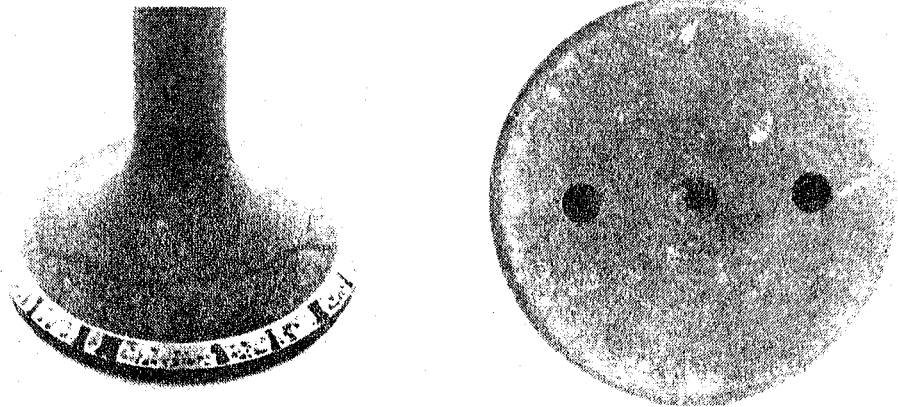
destmaß zurückdämmen. Im Hinblick auf die Verbrennungsrückstände muß dem Schmieröl ganz besondere Beachtung geschenkt werden. Je höher die Drehzahlen und je höher die Leistungen der Motoren werden, umso größer werden, ob wir uns dessen bewußt sind oder nicht, auch die Schmierölmengen, welche den Zylinderbüchsen und den anderen Teilen zugeführt werden müssen, und dies ist sehr häufig die Ursache, weshalb die sich an der Oberfläche der Auspuffventile ablagernden Verbrennungsrückstände so groß sind. Dies ist ein Punkt, auf welchen selbstverständlich der Motorenhersteller aber auch der den Motor Betreibende mit aller Vorsicht achten müssen.

(2) Dadurch, daß man dafür sorgt, daß bei der Berührung der Ventilspindel und des Ventilsitzes die Berührungsflächen der beiden eine Relativbewegung in der Umfangsrichtung ausführen, erreicht man, daß die Verbrennungsrückstände, welche sich auf dieser Berührungsfläche abgesetzt haben, zwangsläufig losgelöst und beseitigt werden, und dadurch, daß sich infolge dieser Relativbewegung die Stellen, an denen sich die beiden Dichtflächen gegenseitig berühren, fortwährend ändern, wird eine Ausweitung der Ablagerung von Verbrennungsrückständen und der Abbrandschäden wirksam verhütet. In der neueren Zeit hat man bei den schnellaufenden mittleren Motoren zu diesem Zwecke Einrichtungen verwendet, welche ein zwangsläufiges Rotieren der Auspuffventile bewirken.

Aus den in der Abb.3 dargestellten Photos können wir deutlich den Zusammenhang zwischen dem Rotieren der Ventilspindel und den Abbrandschäden an den Berührungsteilen erkennen

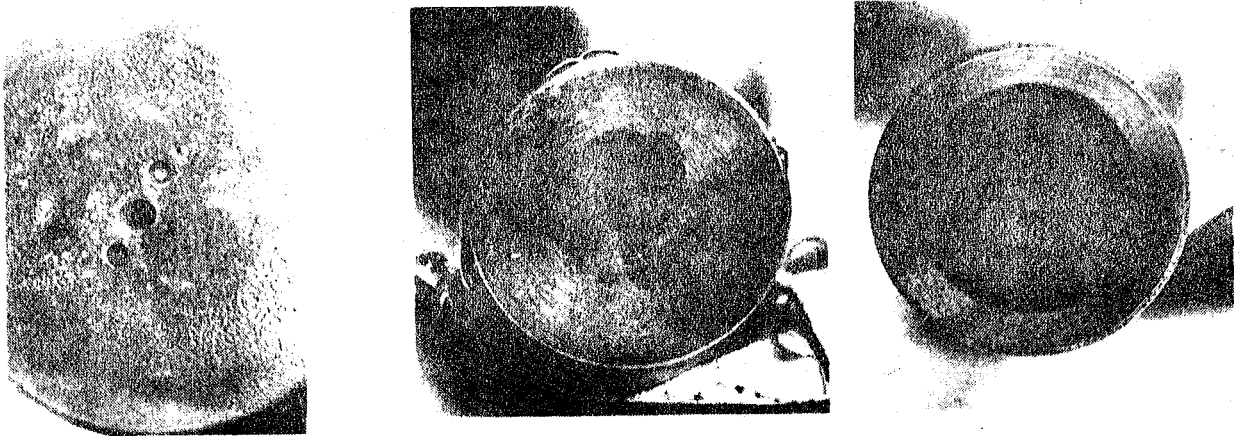
Die beiden dort gezeigten Auspuffventile sind genau aus dem gleichen Material (SUH3B) hergestellt worden, sie haben genau die gleiche Wärmebehandlung erfahren, sie waren in dem gleichen Motor eingebaut und waren gleichzeitig in Betrieb (die durch die Wärmebehandlung erreichte Härteverteilung, sowie die Metallstruktur waren nahezu die gleichen, wovon man sich nachträglich, d.h. nachdem die Ventile bereits in Betrieb gewesen waren, durch eine Materialprüfung überzeugt hat). Trotzdem können wir an den Dichtflächenschäden ganz erhebliche Unterschiede beobachten; während das Ventil A bereits bei einer Betriebszeit von 400 Stunden sehr starke Aushöhlungschäden zeigte und unbrauchbar geworden war, konnte man, wie man dies auch in der Abbildung sieht, bei dem Ventil B nach 3200 Betriebsstunden zwar Abbrandschäden feststellen, diese waren jedoch durchweg ganz klein und so gleichmäßig verteilt, daß ein Durchblasen nicht entstand, dieses Ventil B war also in einem noch durchaus betriebsfähigen Zustand. Der sehr starke Unterschied zwischen diesen beiden Ventilen ist, wie man aus den von dem Hebel des Ventilspindelkopfteiles herrührenden Schlagbeschädigungen deutlich sieht, dadurch zu erklären, daß das Ventil B eine Drehbewegung ausführte, während bei dem Ventil A das Ausmaß der Drehbewegung äußerst klein war.

Selbstverständlich ist damit nicht gesagt, daß sämtliche Auspuffventile, welche keine Drehbewegung ausgeführt haben, so werden wie das Ventil A, wenn man jedoch die Ergebnisse der mit einer großen Anzahl von Probeventilen durchgeführten Versuche und die Ergebnisse der Beobachtung dieser Ventile im Betrieb statistisch auswertet, dann kann man

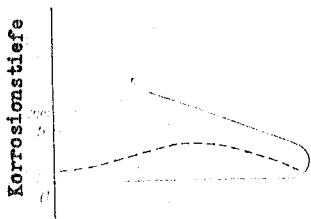


(a) Durchblassschäden an der Dichtfläche (b) Ventiltellerbodenfläche

Abbildung 1 Durchblassschäden an Auspuffventilen



(a) Das Aussehen der Korrosion



(b) Die Verteilung der Korrosionstiefe

Abbildung 2

Die Korrosion
des Ventilteller-
bodens

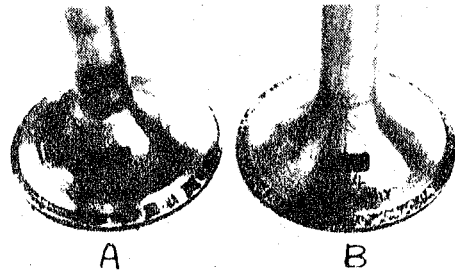


Abbildung 3

Die Ventilrotierung
und die Abbrandschä-
den (Betriebszeiten:
links 400 Stunden,
rechts 3 200 Stunden

deutlich die oben dargelegte Tendenz beobachten und hat damit eine Bestätigung für diese Tendenz. Auch bei den in der Abb.3 dargestellten Probeventilen kann man nicht behaupten, daß sämtliche Abbrandunterschiede zwischen diesen beiden Ventilen A und B nur darauf zurückzuführen sind, daß im einen Falle eine Drehbewegung stattgefunden hat und im andern Falle nicht, man kann es jedoch als erwiesen ansehen daß zwischen diesen beiden Tatsachen ein enger Zusammenhang besteht.

4.2 Die nicht so ganz glatte Auf- und Abbewegung der Ventilspindel

Wenn wir annehmen, daß infolge der Erwärmungsänderung der Auspuffventilspindel der Passungszustand zwischen der Ventilspindel und ihrer Führung sich ständig ändert und daß die winzig kleinen Teile der Verbrennungsrückstände in den Spalt zwischen der Ventilspindel und ihrer Führung eindringen und sich ablagern, dann wird sich die Auf- und Abbewegung der Ventilspindel bald nicht mehr ganz glatt vollziehen können, oder zwischen der Ventilspindel und ihrer Führung wird ein Festfressen stattfinden, die Berührungsdichtflächen der Ventilspindel und des Ventilsitzes werden den heißen Verbrennungsgasen ausgesetzt sein, so daß natürlich leicht Abbrandschäden entstehen können.

Um dies zu verhüten, hat man an die nachstehend aufgeführten Maßnahmen gedacht:

(1) Die thermische Stabilität der Auspuffventile muß erhöht werden und es muß verhindert werden, daß durch die fortwährende Wiederholung von Erwärmung und Abkühlung der Ventilspindel bleibende Spannungen erzeugt werden. Um die-

sen Zweck zu erreichen, ist es außerordentlich wichtig, die maximale auftretende Temperatur beim Betrieb des Ventils zu berücksichtigen und die diesen Betriebsbedingungen entsprechende geeignete Wärmebehandlung durchzuführen. Der hitzebeständige Stahl der 3. Sorte (SUH 3 B) ist bei den Ventilspindeln bei 1000°C in Öl gehärtet und dann bei 700°C getempert worden; wir haben diese Ventilspindeln vor der Inbetriebnahme und nach dem Betrieb ganz genau gemessen und aufgrund unserer Messungen konnten wir eine Entstehung von bleibenden Spannungen infolge der Erwärmungen während des Betriebes so gut wie überhaupt nicht feststellen, somit darf man ruhig annehmen, daß ein Festsitzen von Ventilspindel und Führung oder ein nicht ganz glattes Gleiten infolge von Wärmespannungen in der Ventilspindel nicht vorkommen.

(2) Es muß verhütet werden, daß in dem Einpassungsspalt zwischen dem Ventilschaft und seiner Führung Verbrennungsrückstände eindringen und sich dort ablagern. Um dies zu erreichen, muß man die diesen Spalt zugeführte Schmierölmenge dauernd auf dem richtigen Wert halten. Wenn die Schmierölmenge allzu groß ist, dann fließt das überschüssige Öl in den Spalt hinunter und leckt in diejenigen Teile der Auspuffventilspindel durch, welche unmittelbar mit den Auspuffgasen in Berührung kommen, dies hat zur Folge, daß dieses durchleckende Schmieröl durch die Auspuffgase verschmort wird und daß sich diese Rückstände ablagern (vergleiche Abb.4). Diese Ablagerung frißt sich bei der Auf- und Abbewegung des Ventiles in den Spalt zwischen dem Ventilschaft und seiner Führung hinein und wird so zu einem Hindernis für die Auf- und Abbewegung des Ventil-

schaftes, und schließlich wird sie zur eigentlichen Ursache für ein Festfressen. Wenn umgekehrt die Menge des zugeführten Schmieröles zu klein ist, dann reicht in dem Spalt zwischen dem Ventilschaft und seiner Führung der Schmierölfilm ab und der Ventilschaft und seine Führung kommen in der Atmosphäre der heißen Verbrennungsgase in den Zustand der Berührung von Metall auf Metall und das Ergebnis ist das gleiche wie in dem Falle einer übermäßigen Schmierölzuführung.

Da also den Ventilen weder zu viel noch zu wenig Schmieröl zugeführt werden darf, so muß man es unter allen Umständen erreichen, daß dem Ventil genau die richtige Schmierölmenge zugeführt wird; dieser richtige Wert muß jedoch für jeden einzelnen Motor empirisch gefunden und festgelegt werden. Diese Festlegung der richtigen Schmiermenge ist für den Betrieb des Motors, wie auch für seine Erhaltung von allergrößter Wichtigkeit, wider Erwarten jedoch ist die Meinung weit verbreitet, daß die Menge des zugeführten Schmieröles eine Sache sei, über die man nicht viel Worte zu verlieren brauche. Die Erfahrungen der Verfasser haben gezeigt, daß in einem für den Antrieb eines Generators auf einem Schiff bestimmten Dieselmotor ein Festfressen und ein Abbrennen der Auspuffventile sehr häufig auftrat, und daß man aufgrund der oben dargelegten Überlegungen die dem Spalt zwischen dem Ventilschaft und seiner Führung zugeführte Schmierölmenge stark reduziert und dadurch erreicht hat, daß die Störungen durch Festfressen ganz erheblich verringert wurden und daß gleichzeitig auch die Abbrandschäden an der Dichtfläche der Ventilspindeln in einem nennenswerten Maße verringert werden konnten.

4.3 Die durch die Wärme bedingte Formänderung des Ventiltellers und des Ventilsitzes

Da die Ventilspindel und der Ventilsitz in kaltem Zustand aufeinander eingepaßt worden sind, so ändern sich, wenn beim Betrieb des Motors ihre Temperatur ansteigt, infolge der wärmebedingten Formänderung der Ventilspindel und des Ventilsitzes bzw. des Zylinderdeckels die Abmessungen dieser Zusammenpassung, und es wird angenommen, daß dadurch ein Spalt entsteht. Diese Formänderungen rühren mit großer Wahrscheinlichkeit daher, daß die Flammen in der Verbrennungskammer nicht gleichmäßig verteilt sind und daß die Abkühlung des Ventilsitzes an den einzelnen Stellen nicht gleichmäßig erfolgt und daß außerdem auch die Ventilspindel und der Ventilsitz nicht gleichmäßig erwärmt werden.

Eine gleichmäßigere Flammenverteilung wird dadurch erreicht daß man die Form der Kraftstoffeinspritzöffnung sowie die Spritzrichtung verbessert. Zu einer stellenweise ungleichmäßigen Kühlung des Ventilsitzes kommt es leicht, wenn, bei einem Zylinderkopf, welcher so zusammengebaut ist, daß der Zylinderkopfkörper und die Ventilsitze für sich getrennte Teile darstellen, der Berührungszustand der Berührungsflächen zwischen dem Zylinderkopf und den Ventilsitzen nicht gut ist. Da diese Berührungsflächen wichtige Kanäle für das Abströmen der Wärme der Ventilsitze in das im Zylinderkopfkörper enthaltene Kühlwasser darstellen, so müssen sie unter allen Umständen so bearbeitet und feinst bearbeitet sein, daß über ihren ganzen Umfang eine gleichmäßige und absolut dichte Berührung gewährleistet ist.

4.4 Die Entstehung von Rissen an der Berührungsfläche der Ventilspindel mit dem Ventilsitz

Wenn am Ventilsitz und an der dem Ventilsitz zugekehrten Fläche des Ventiltellers radial gerichtete Risse entstehen, dann werden diese Risse, wenn das Ventil geschlossen ist, zu Strömungskanälen für die heißen Verbrennungsgase und es wird angenommen, daß dadurch Abbrandschäden entstehen, daß die Risse dabei breiter und zu Durchblaswegen werden. Dies hat man bei Ventilen beobachtet, bei denen man auf die Berührungsfläche der Ventilspindeln mit dem Ventilsitz Stellite aufgeschweißt hatte.

In der Abb.5 sehen wir die Makrostruktur der Oberfläche bei einer Ventilspindel mit Stelliteaufschweißung; die Pfeile zeigen auf diejenigen Stellen hin, wo das aufgeschweißte Stellite Defekte aufweist. An diesen Stellen beobachtet man eine von der übermäßigen Erhitzung herrührende Veränderung der Struktur des Muttermaterialies, eine Vergrößerung der Stellitekristalle und eine Verschmelzung des Stellites mit dem Muttermaterial, dadurch sind natürlich die Materialeigenschaften des Stellites ganz erheblich verschlechtert worden. Die Abb.6 zeigt die Mikrostruktur eines gesunden Teiles und eines nicht gesunden Teiles in der Stelliteaufschweißung einer Ventilspindel aus dem hitzebeständigen Stahl der 4.Sorte (SUH 4 B), in dem nicht gesunden Teil haben wir eine Härte von Hv 300, während die Härte des gesunden Teiles in der Größenordnung von Hv 420 liegt; im Hinblick auf die Festigkeit besteht also zwischen dem gesunden Teil und dem nicht gesunden Teil ein ganz erheblicher Unterschied, und die Möglichkeit, daß dies zur Ursache für die Rißbildung wird, ist sehr groß. Es ist also eine

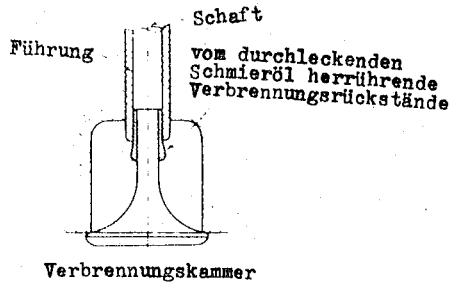
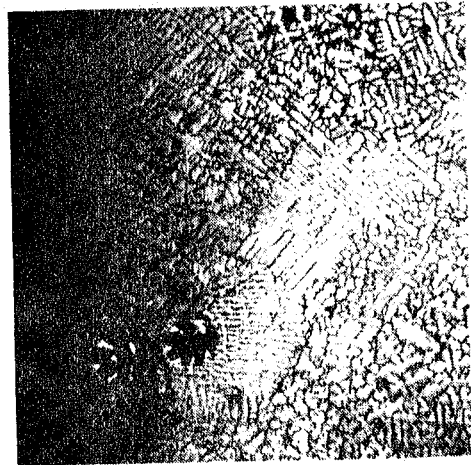


Abbildung 4

Die Verbrennungsrückstände im Spalt zwischen d. Ventilschaft und seiner Führung



nicht gesund (2) (Hv = 310)

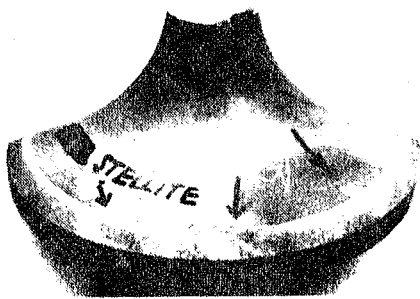
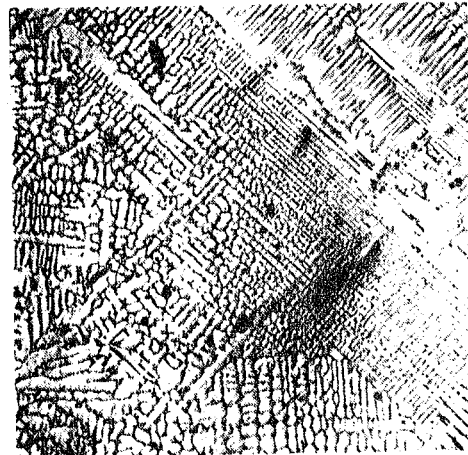


Abbildung 5

Defekte in der Stellitaufschweißung



nicht gesund (1) (Hv = 230)

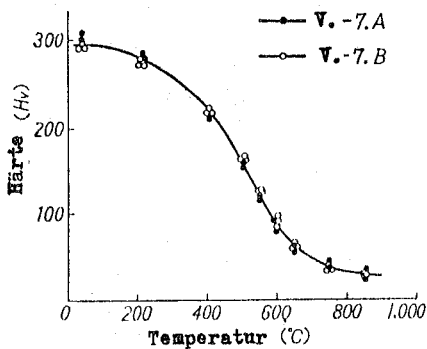
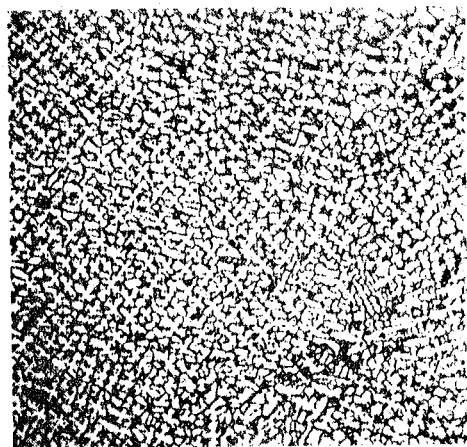


Abbildung 8

Die Hochtemperaturhärte des hitzebeständigen Stahles der 3. Sorte (Bei den einzelnen Prüftemperaturen hat man die Temperatur jeweils 20 Minuten lang gehalten und dann die Warmmessung durchgeführt)



gesund (Hv = 400)

Abbildung 6 Die Struktur des aufgeschweißten Stellites (50-fache Vergrößerung)

erwiesene Tatsache, daß schon nach ganz kurzer Betriebszeit die an einem Ventil mit Stellitaufschweißung in Erscheinung tretenden Risse an solchen Stellen in großer Zahl vorhanden sind.

Bei den Ventilen mit Stellitaufschweißung muß also der Einhaltung der Bedingungen bei der Aufschweißoperation größte Aufmerksamkeit geschenkt werden; wenn eine Aufschweißschicht Defekte aufweist, dann ist dies gleich oder sogar noch schlechter, wie wenn man gar keine Stellitaufschweißung hätte.

5. Die Hochtemperaturbeständigkeit des Ventilspindel- materiales

Da die Berührungsfläche der Auspuffventilspindel mit ihrem Ventilsitz im Zustand einer sehr starken Erhitzung auf eine Temperatur in der Größenordnung von 500°C , die sich dauernd wiederholenden Stöße vom Ventilsitz her aufnehmen muß, so stellt, im Hinblick auf das Material die Hochtemperaturbeständigkeit der Ventilspindel ein äußerst wichtiges Problem dar. Welche konkreten Eigenschaften sind es nun, an die man denkt, wenn man von der Hochtemperaturbeständigkeit eines Materiales spricht und wie hängen diese Eigenschaften mit den üblicherweise in Betracht gezogenen Eigenschaften eines Materiales zusammen? Dies ist zwar eine sehr schwierig zu beantwortende Frage, wenn man jedoch die Arbeitsbedingungen eines Auspuffventiles und seine Umgebung in Betracht zieht, dann dürften in diesem Falle doch wohl die Oxydationsbeständigkeit, die Härte und die Bruchschlagfestigkeit (spallation resistance) bzw. die Zähigkeit bei hohen Temperaturen gemeint sein.

(a) Die Oxydationsbeständigkeit

Als Material für die Auspuffventile der kleinen Dieselmotoren wird im allgemeinen der hitzebeständige Stahl der 3. Sorte (SUH 3 B) oder ein diesem ähnliches Material verwendet. Dieses Material stellt einen Chrom und Silizium enthaltende Legierungsstahl des Ferritsystemes dar, es ist deshalb anzunehmen, daß dieses Chrom und dieses Silizium Elemente darstellen, welche mit bezug auf die Hitzebeständigkeit eine sehr starke positive Wirkung haben, da jedoch der prozentuale Chromgehalt und der prozentuale Siliziumgehalt von entscheidendem Einfluß auf die Oxydationsbeständigkeit der Legierung sind, kommt einer richtigen Bemessung und genauen Überwachung des prozentualen Gehaltes dieser Elemente die größte Bedeutung zu.

(b) Die Härte und die Zähigkeit

Die Berührungsfläche der Auspuffventilspindel mit ihrem Ventilsitz muß im Hinblick auf ihre Arbeitsbedingungen eine hohe Härte bei hohen Temperaturen besitzen, im Hinblick auf die außerordentlich hohen Stoßbelastungen, welche gleichzeitig an einzelnen Stellen auftreten, ist es jedoch unbedingt erforderlich, daß die Berührungsfläche zwischen dem Ventilteller und dem Ventilsitz eine so hohe Bruchschlagfestigkeit (spallation resistance) bzw. eine so hohe Zähigkeit besitzt, daß keine Risse entstehen.

Die Härte eines Materiales und seine Zähigkeit werden durch den von einem Härtemesser angezeigten Widerstand gegen das Eindringen einer Pyramidenfläche oder einer Kugelfläche bzw. durch den Wert der Zugkraft beim Zerreißen eines Rundstabes, wie er bei der Zugfestigkeitsprüfung angegeben

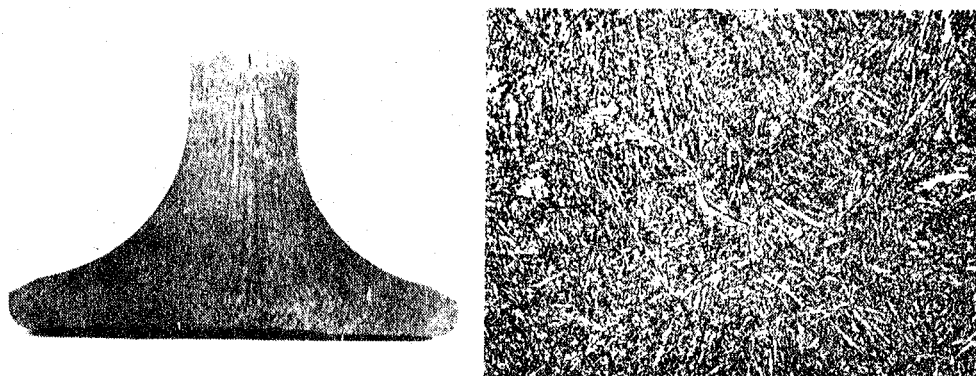
wird, ausgedrückt. Dabei wird jedoch die Ungleichmäßigkeit des Metallmaterials, wie sie durch die Ansammlung der winzig kleinen Kristalle dargestellt wird, gänzlich vernachlässigt, und man erhält so eine makroskopische Größe, bei welcher man den ganzen Körper als aus einer homogenen Phase bestehend ansieht. Andererseits ist anzunehmen, daß die Risse, die Brüche, (spallation) und die Formänderungen in der Dichtfläche der Auspuffventile mikroskopische Erscheinungen sind, welche nur in einem sehr engen Bereich an der Oberfläche entstehen. Es dürfte jedoch eine große Frage sein, ob die besondere Charakteristik eines Materials mit bezug auf die zuletzt genannte mikroskopische Erscheinung durch einen makroskopischen Kennwert, wie wir ihn bei der zuerst genannten Erscheinung haben, genau ausgedrückt werden kann. Wenn man also die Sache vom Gesichtspunkt der sogenannten Abbrandschäden der Auspuffventilspindel her betrachtet, dann genügt es nicht, wenn man die Härte und die Zähigkeit des Ventilspindelmaterials durch die Werte der makroskopischen Härte und der Zugfestigkeit, wie man sie bei den Prüfungen auf den üblichen Materialprüfmaschinen erhält, beurteilt und entscheidet, sondern man muß dabei doch wohl den mikroskopischen Aufbau des Materials, d.h. also die Feinheiten und die Homogenität der Struktur des Materials berücksichtigen³⁾.

6. Die Metallstruktur und die Abbrandschäden

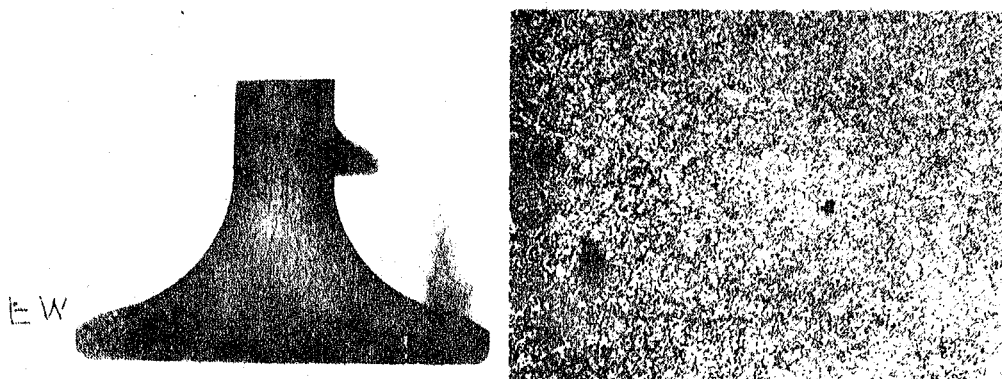
Wir wollen einige Beispiele anführen, welche den Zusammenhang zwischen der Metallstruktur und den Abbrandschäden zeigen. Bei Auspuffventilen, welche aus einem und demselben hitzebeständigen Stahl der 3. Sorte (SUH 3 B) hergestellt, in einem und demselben Motor eingebaut und lange Zeit hin-

durch in Betrieb waren, entstanden zwar durchweg die in der Abb.3, B zu erkennenden Abbrandschäden der Dichtflächen, in dem Ausmaß dieser Schäden wurden jedoch ganz erhebliche Unterschiede beobachtet. Beim Vergleich der Makrostrukturen und der Mikrostrukturen dieser Ventile zeigten sich ganz deutlich große Unterschiede.

In der Abb.7 A sehen wir die Makrostruktur der Querschnittsfläche eines durch Abbrandschäden sehr stark mitgenommenen Ventils sowie die Mikrostruktur in der Nähe der Dichtfläche dieses Ventils; die Abb.7 B zeigt ebenfalls die Makrostruktur der Querschnittsfläche und die Mikrostruktur in der Nähe der Dichtfläche für ein Ventil mit nur leichten Abbrandschäden. Wenn wir die vom Schmieden herrührende Faserstruktur in der Makrostruktur bei den beiden Ventilen miteinander vergleichen, dann stellen wir fest, daß bei dem zuerst genannten Ventil dieser Faserstruktur durch eine geringe Anzahl von Schlägen bei hoher Temperatur gebildet wurde und daß das Ausmaß des Schmiedens und des Bearbeitens (der Schmiedebearbeitung?) nur ganz gering war, während bei dem zuletzt genannten Ventil die Anzahl der beim Schmieden geführten Schläge sehr groß und das Ausmaß des Schmiedens und der Bearbeitung (der Schmiedebearbeitung?) groß war. Bei der Mikrostruktur sind im Falle des zuerst genannten Ventiles die Kristallkörner grob, und man vermißt die Feinheit und die Gleichmäßigkeit der Struktur, während bei dem zuletzt genannten Ventil die Kristallkörner winzig klein sind und die Struktur außerordentlich fein und gleichmäßig ist.



(A) Struktur eines Ventils mit schweren Abbrandschäden



(B) Struktur eines Ventils mit leichten Abbrandschäden

Abbildung 7 Die Metallstruktur und die Abbrandschäden

Tafel 1 Die chemische Zusammensetzung der Auspuffventilablagerungen

Nummer der Probe	Zusammensetzung (Gew.%)		
	V	Cl	Na
1	14.0	0.19	0.10
2	15.0	0.14	0.11

Tafel 2 Die Schmelzpunkte der Vanadiumverbindungen

Chemische Verbindung	Schmelzpunkt °C
$\text{NiO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$	900
Na_3VO_4	850
V_2O_5	675
$2 \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$	640
NaVO_3	630
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5 \text{V}_2\text{O}_5$	625
$5 \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 11 \text{V}_2\text{O}_5$	535

In der Abb.8 sehen wir die Ergebnisse, die wir bei der Messung der Hochtemperaturhärte des Ventilspindelmaterialies im Falle der beiden oben genannten Ventile erhalten haben; die Werte der Härte in Abhängigkeit von der Temperatur, sowie die Art der Änderung mit der Temperatur sind in den beiden genannten Fällen nahezu gleich. Obwohl wir also hier nahezu die gleichen Ergebnisse erhalten haben, wie wir sie nach einem üblichen Materialprüfungsverfahren für die makroskopischen Materialkennwerte bekommen, sind die bei den gleichen Betriebsbedingungen erhaltenen Abbrandschäden doch außerordentlich verschieden; und man kann sich wohl überlegen, ob hierbei nicht die Feinheit und die Gleichmäßigkeit der mikroskopischen Struktur des Materialies bei den beiden Ventilspindeln von großem Einfluß war.

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit haben wir über die Auspuffventilschäden bei den mittleren und kleinen Dieselmotoren berichtet und wir haben uns diese Auspuffventilschäden von ihrem Mechanismus her und von der Materialseite her überlegt.

Diese Auspuffventilschäden sind jedoch Erscheinungen, welche unter äußerst rauhen Bedingungen über eine sehr lange Zeit hinweg ganz langsam nach und nach fortschreiten, und deshalb ist die Messung und die Beobachtung des Fortschreitens dieser Erscheinungen, sowie die reproduzierbare, experimentelle Untersuchung der Erscheinungen außerordentlich schwierig. So ist es beispielsweise sehr schwierig, den Zusammenhang der Temperatur oder der angreifenden Kräfte und Spannungen mit den Schäden in seinem ganzen größenmäßigen Ausmaß zu messen. Dies ist einer der Gründe, weshalb es sehr schwierig ist, nun einfach schnell Maßnahmen gegen

die Auspuffventilschäden anzugeben und festzulegen. Wir dürfen deshalb nicht annehmen, daß es in unseren vorstehenden Ausführungen gelungen ist, die Ursachen der Auspuffventilschäden und die entsprechenden Gegenmaßnahmen vollständig zu klären, es gibt noch sehr viele Erscheinungen, deren Ursachen bis heute noch im Dunkel liegen, wir hoffen trotzdem, einen nennenswerten Beitrag zur Steigerung der Leistung der Motoren und zu ihrer Verbesserung durch die Entdeckung neuer Erscheinungen beigetragen zu haben.

Allen Herren, die uns bei unserer Forschungsarbeit unterstützt haben, wollen wir hiermit unseren herzlichsten Dank aussprechen.