

ohne Genehmigung  
gestaltet  
dare nur durch  
bersetzer

ustav Kraut  
irmbronn  
im Gäble 16

YIGART  
1972  
Stelle

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift

"Nainen Kikan" (Die Brennkraftmaschine)

Band 8, Nr.81, Februar 1969, Seite 35 - 43

Die Hochtemperaturkorrosion der Auspuffventile  
der Brennkraftmaschinen und Maßnahmen dagegen

von O.Miyakawa  
und S.Tobe

## 1. Vorwort

Bei den verschiedenen Arten von Brennkraftmaschinen, angefangen mit den Kraftfahrzeugmotoren, werden in der letzten Zeit immer höhere Drehzahlen und eine immer höhere Leistung verlangt, aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird die Qualität des verwendeten Kraftstoffes immer niedriger, und zu all diesen Problemen kommt noch die Verschlechterung des Schmieröles, die durch die fortwährend wechselnden Betriebsbedingungen, nämlich die Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten auf den Schnellstraßen einerseits und die Fahrt mit niedrigen Geschwindigkeiten im innerstädtischen Verkehr, bedingt ist. Diese Entwicklung bringt es mit sich, daß die Wärmebelastung der Verbrennungskammer und ihrer Umgebung immer stärker wird, und daß dadurch die verschiedensten Störungen hervorgerufen werden, von denen eine der wichtigsten die Zerstörung der Auspuffventile darstellt. Diese Zerstörung der Auspuffventile ist einerseits der Wärmebelastung und der mechanischen Beanspruchung und andererseits der chemischen Einwirkung der heißen Verbrennungsgase, sowie auch der wechselseitigen Einwirkung dieser beiden Einflüsse zuzuschreiben, weiterhin hängt die Zerstörung der Auspuffventile auch auf das engste mit der Ablagerung und (dem Festsetzen) der Verbrennungsrückstände zusammen, die eine äußerst komplizierte Erscheinung darstellt. Somit stellt

sich uns das schwierige Problem nach Maßnahmen zu suchen, welche geeignet sind, die Ursachen dieser Zerstörung der Auspuffventile zu erfassen und einzudämmen.

Die vorliegende Arbeit ist als eine Hilfe beim Verfolgen und Auffinden der Ursachen der Zerstörung der Auspuffventile, sowie auch beim Aufstellen von Gegenmaßnahmen gedacht; es werden deshalb aus diesen Zerstörungsvorgängen insbesondere die Probleme der Verbrennungsschäden und der Hochtemperaturkorrosion herausgegriffen, und es werden vor allem vom Gesichtspunkt der Werkstoffkunde her die im Inland und im Ausland erhaltenen Forschungsergebnisse zusammengetragen und diskutiert.

## 2. Die Ursachen der Verbrennungsschäden der Auspuffventile

Die Abb.1 zeigt eine schematische Darstellung der verschiedenen Ursachen der Auspuffventilzerstörung. Die Abb.2 dient der Erklärung der Bezeichnung der verschiedenen Teile des Auspuffventils. Die Auspuffventilschäden können somit in einer ersten großen Einteilung in die Abbrandschäden und in die Bruchschäden aufgeteilt werden. Wenn wir der systematischen Darstellung in der umgekehrten Richtung folgen, dann haben wir dort zunächst die Abbrandschäden, welche von dem Durchlecken der heißen Verbrennungsgase infolge einer ungenügenden Abdichtung herrühren, welche aber außerdem auch dann, wenn das Ventil gut abgedichtet ist, dadurch entstehen können, daß der Ventilteller an einzelnen Stellen einer übermäßigen und langen Erhitzung ausgesetzt ist. Eine derartige lokale Überhitzung kann an den betreffenden Stellen leicht zu einem Weichwerden, zu einer Deformation, zum Schmelzen usw. führen, was schließlich die Abbrandschäden

des Ventiltellers zur Folge hat. Dabei kommt es sehr häufig vor, daß das Durchlecken der Verbrennungsgase als eine Folge der lokalen Überhitzung sekundär auftritt<sup>1)</sup>. Als Ursache einer derartigen lokalen Überhitzung ist zunächst die Frühzündung zu nennen. Außerdem sind es aber auch die ungleichmäßige Kühlwirkung, die Ablagerungen auf der Ventilsitzfläche, und ein messerschneidenartiger dünner Ventiltellerrand, welche leicht zu lokalen Erhitzungen führen können.

Zu der ungenügenden Abdichtung, welche die wichtigste Ursache der Abbrandschäden darstellt, gehören ein mangelhafter Ventilsitz, aber auch bei ausreichendem Ventilsitz das Entstehen einer Vielzahl von feinen Nuten (Kratzern?) auf der Ventilsitzfläche, d.h. also das sogenannte "channeling". Für den zuerst erwähnten ungenügenden Ventilsitz werden, wie dies aus der Abb.1 zu ersehen ist, die nachstehend aufgeführten Ursachen angenommen:

1) Wenn das Spiel der Führung zu groß ist, und wenn in überschüssigem Maße Schmieröl zugeführt wird, dann lagern sich die verbrannten Rückstände des Schmieröles am Schaft ab. Auch dann, wenn umgekehrt das Spiel der Führung zu klein ist und wenn die Schmierölaufuhr ungenügend ist, geht die glatte und reibungslose Bewegung des Schaftes verloren. Weiterhin geht infolge der von der sich fortwährend wiederholenden Erhitzung und Abkühlung herrührenden bleibenden Formveränderung des Schaftes die gute Passung zwischen Schaft und Führung verloren<sup>2)</sup>. Man sagt, daß in Amerika mehr als 50% aller bei den Kraftfahrzeugen vorkommenden Auspuffventilschäden in irgend einer Weise mit einem derartigen, als "das Hängen der Ventile" (sticking) bezeichneten

Fehlen der glatten Bewegung des Ventilschaftes zusammenhängen<sup>3)</sup>.

2) Da das Einschleifen und Einpassen der Ventile bei gewöhnlicher Temperatur ausgeführt wird, entsteht beim Ansteigen der Motortemperatur eine durch die Wärme bedingte Formänderung des Ventilkopfes, sowie des Ventilsitzes und des Zylinderdeckels. Dadurch werden Abweichungen (deflections) und Dehnungen des Ventilkopfes und des Ventilsitzes gegenüber der Führungssachse hervorgerufen, was wiederum eine Verschlechterung der Passung von Ventilsitzfläche und Ventilsitz (face and seat) zur Folge hat. Als Hauptursachen einer derartigen Wärmebedingten Formveränderung sind die von der Bearbeitung und vom Wärmebehandlungsprozeß herrührenden zurückgebliebenen Spannungen, sowie die Ungleichmäßigkeit der Temperaturverteilung in der Verbrennungskammer und die ungleichmäßige Kühlwirkung des Kühlsystemes zu nennen.

3) Ein unzureichendes Spiel des Ventilstößels führt zum Abriebverschleiß zwischen der Ventilsitzfläche und dem Ventilsitz (face and seat) und zur Entstehung von Vertiefungen, und am Ventilteller wird durch die hohen Temperaturen und die hohen Spannungen eine Napfbildung (cupping) hervorgerufen.

Wenn es infolge der oben aufgeführten Ursachen zu einem ungenügenden Ventilsitz kommt, dann tritt natürlich infolge der ungenügenden Dichtung ein Durchlecken der heißen Gase ein, das schließlich zu Abbrandschäden führt. Gleichzeitig läßt es sich, wie wir dies auf der rechten Seite der Abb.1 sehen, nicht vermeiden, daß ein derartiges Unge-

nauwerden des Ventilsitzes auch zur Ursache eines Ventilbruches wird. Auf die mit den Bruchschäden der Ventile zusammenhängenden Einzelheiten soll hier zwar nicht näher eingegangen werden, in den Fällen jedoch, wo Abweichungen (deflections) des Ventilkopfes und Dehnungen (Spannungen?) im Ventilsitz entstehen, und wo durch den Abriebverschleiß der Ventilschaftführung das Spiel der Ventilschaftführung allzu groß wird, entsteht eine oszillierende Bewegung des Ventiles (wörtlich: eine Halsschüttelbewegung) und gleichzeitig kommt es nicht zu einem dichten Aufsitzen der Ventilsitzfläche auf dem Ventilsitz. Infolge der dadurch erzeugten zusätzlichen Biegemomente kommt es leicht zu Ermüdungsbrüchen des Ventilkopfes und der Ventilspindel (in dem sich von unterhalb des Halses bis zum Eintritt in die Ventilspindelführung erstreckenden Teil der Ventilspindel). Dies bedeutet, daß bei der Konstruktion des Ventiles ganz besonders darauf geachtet werden muß, daß die Beschleunigung im Augenblick des Schließens, d.h. also im Augenblick des Aufsetzens der Ventildichtfläche auf dem Ventilsitz auf das kleinstmögliche Maß beschränkt wird<sup>4)</sup>.

So muß also ein eventueller derartiger Ermüdungsbruch bei der Konstruktion berücksichtigt werden, und außerdem kommt es leicht zu einer Dehnung unterhalb des Ventilhalses (Einschnürung) und zu einer Napfbildung wegen geringer Wandstärke des Ventiltellers, (wenn die Federbelastung sehr groß ist und wenn das Ventil beim Aufsetzen auf den Ventilsitz mit der ganzen Fläche zugleich aufschlägt); aus diesem Grunde muß der Festigkeit des Materiales, aus dem das Ventil hergestellt wird, besondere Aufmerksamkeit geschenkt

werden und es dabei besonders die Kriechfestigkeit hervor-  
gehoben werden. Deshalb muß bei der Konstruktion und beim  
Ergreifen von Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen darauf  
geachtet werden, daß die Hochtemperaturermüdungsfestigkeit  
(die Wärmeermüdung), sowie die Kriechbruchfestigkeit und  
weiterhin wenn irgend möglich auch die dynamische Kriech-  
festigkeit eingehend untersucht werden. Dabei muß insbeson-  
dere auch der Einfluß von Rissen auf die Ermüdungsfestigkeit  
und auf die Kriechfestigkeit berücksichtigt werden<sup>6)</sup>.

Eine weitere wichtige Ursache für die Abbrandschäden infol-  
ge ungenügender Dichtung ist in dem sogenannten "channeling"  
d.h. also in der Riefenbildung auf der Dichtfläche des Ven-  
tiles zu suchen. Diese Riefenbildung besitzt einen Mecha-  
nismus und stellt einen Vorgang dar, wie er im folgenden  
beschrieben werden soll. Die Abb.3 zeigt eine Vielzahl fei-  
ner Nuten und Vertiefungen in der Dichtfläche des Ventil-  
tellers, wie sie als kennzeichnende Erscheinung bei dem  
sogenannten "channeling" entstehen; diese feinen Nuten und  
Vertiefungen können natürlich auch ganz feine Risse dar-  
stellen. Die Verbrennungsrückstände des Kraftstoffes oder  
auch des Schmieröles, das von der Zylinderwand her und  
auch von der Ventilspindelführung her in die Verbrennungs-  
kammer eingedrungen ist, lagern sich auf der Dichtfläche  
des Ventiltellers ab, werden dort komprimiert, d.h. also  
zusammengedrückt und fest angedrückt, und werden auf die-  
se Weise zu einer Art Dichtung, da sie jedoch dadurch eine  
Wärmeisolationswirkung ausüben, so verursachen sie einen  
Anstieg der Ventiltemperatur und beschleunigen dadurch  
außerdem auch die Korrosion des Ventiles. Wenn wir nun  
annehmen, daß durch das Aufschlagen des Ventils ein Teil

der Ablagerungen sich wieder abschält und daß sich durch die festen Ablagerungen lokale Vertiefungen in der Dichtfläche des Ventiles bilden, dann ist es ganz klar, daß sich auch dann, wenn das Ventil geschlossen ist, an diesen Stellen Nuten bilden, welche die Dichtung beeinträchtigen. Um nun das durch einen solchen Mechanismus entstehende "channeling" zu verhüten, muß man unter allen Umständen dafür sorgen, daß so wenig wie irgend möglich Verbrennungsrückstände entstehen, weiterhin muß man der Tatsache größte Beachtung schenken, daß die dem Motor zugeführte Schmierölmenge bei Motoren mit höherer Drehzahl meistens übermäßig groß ist und, wenn dann dieses Öl verschmutzt ist und in großer Menge im Ölsumpf enthalten ist und verbrennt, dann darf man nicht außer acht lassen, daß dadurch harte, fest anhaftende Ablagerungen entstehen, deren Hauptbestandteil Kohlenstoff ist<sup>7)</sup>. Wenn man das Ventil zwangsläufig in eine Drehbewegung versetzt, dann ist dies ein sehr wirksames Mittel, um die verschiedenen Ablagerungen gering zu halten.

Die Hochtemperaturkorrosion der Dichtfläche stellt eine äußerst komplizierte Erscheinung dar, welche durch eine chemische Reaktion zwischen dem Ventilmaterial und den heißen Verbrennungsgasen entsteht. Diese Reaktion wird durch die im Benzin enthaltenen Antiklopfmittel, wie etwa Bleitetraäthyl oder Bleibromid oder dergleichen und durch das Vanadium, den Schwefel, das Natrium usw., welche im Dieselkraftstoff enthalten sind, noch unterstützt. Je höher die Ventiltemperatur ist, umso mehr wird das Fortschreiten der Korrosion beschleunigt. Wie später noch im einzelnen dargelegt werden soll, entstehen im Ventilteller wegen des

radial gerichteten Temperaturgefälles in der Umfangsrichtung Wärmespannungen, eine periodische Änderung der Ventiltemperatur jedoch und ein sich dauernd wiederholendes Erhitzen und Abkühlen erzeugen in der Ventiltellerperipherie radial gerichtete Ermüdungsrisse. Diese Risse sind die effektive Ursache der von dem "channeling" herrührenden Abbrandschäden. Die Abb.4 zeigt Beispiele der oben besprochenen Brandschäden, und zwar sehen wir auf der linken Seite Abbrandschäden, die auf das Durchblasen der heißen Gase infolge ungenügender Dichtung zurückzuführen sind, während wir auf der rechten Seite einen durch starke lokale Erhitzung verursachten Abbrandschaden sehen. Diese Fächerform ist gewöhnlich das deutliche Kennzeichen für einen durch lokale Erhitzung aufgetretenen Abbrandschaden. Verhängnisvolle Abbrandschäden in Auspuffventilen treten in der Hauptsache in dieser Weise an der Ventiltellerperipherie auf, es gibt jedoch auch außerdem noch Fälle, in denen die Korrosion der Ventiltellerfläche problematisch wird. Bei den großen Zweitaktdieselmotoren, die in der Hauptsache mit niederwertigem viel Vanadium enthaltenden Schwerölen betrieben werden, gibt es viele Beispiele, wo auf der Ventiltellerfläche, wo die Temperatur am höchsten ist, in großem Umfang Korrosionen entstehen, als deren Ursache die vom Vanadium herkommenden Angriffe vermutet werden<sup>2)</sup>.



## 5. Die Maßnahmen gegen die Hochtemperaturkorrosion der Auspuffventile

### 5.1 Das Material für die Ventile

Bei der Wahl des Materials für die Ventile kommt es neben den mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen und bei dauernder Erhitzung ganz besonders auch auf die Korrosionsbeständigkeit des Materiales bei hohen Temperaturen an; deshalb ist die Entwicklung eines Materiales mit hervorragenden Korrosionsbeständigkeitseigenschaften ein Problem, das vordringlich gelöst werden muß. In der vorliegenden Arbeit soll in der Hauptsache über die Hochtemperaturbeständigkeit des Materiales für die Ventile gesprochen werden, zunächst wollen wir jedoch die Verfahren zur Prüfung dieses Materiales auf einfache Weise erklären.

Als Verfahren zur Prüfung der Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit gibt es die Fahrtprüfung, die Betriebsprüfung auf dem Versuchsstand (bench test) und die Schmelztiegelprüfung <sup>53)</sup>, weiterhin gibt es noch das Verfahren, bei welchem das Material, nachdem man  $PbO$  und  $V_2O_5$  aufgetragen hat, erhitzt wird <sup>54)</sup>. Von diesen Verfahren hat die weiteste Verbreitung die oben erwähnte Schmelztiegelprüfung gefunden, bei welcher das Material in einem geschmolzenen korrosiven Oxid erhitzt wird.

Dabei ist es ein sehr wichtiges Problem, in welcher Wechselbeziehung die Ergebnisse einer derartigen Erhitzungsprüfung zu der praktischen Lebensdauer des Ventiles stehen. Bei seinen Untersuchungen über den Cr-Ni-Mn-Stahl hat Tauschek <sup>26)</sup> festgestellt, daß zwischen diesen beiden eine sehr gute Wechselbeziehung vorhanden ist. Wenn man bei seiner Beurteilung von derartigen Ergebnissen <sup>26)</sup> und <sup>51)</sup> ausgeht und die Grenze der Anwendung nicht verfehlt, kann man die

Anwendbarkeit der Schmelztiegelprüfung in ausreichendem Maße erkennen. Mit anderen Worten, die Beschleunigungsprüfung (Erhitzungsprüfung?) hat den Vorteil, daß sie leicht ausgeführt werden kann, wenn man mit Beschleunigungsprüfungen, welche einen derartigen Vorteil besitzen, vergleicht, dann ist anzunehmen, daß es sinnlos ist, die gleichen Erwartungen zu hegen, wie bei der Fahrtprüfung. Wenn man auf die Proben ein Korrosionsmedium aufträgt, und dann in einer strömenden Atmosphäre, welche ungefähr die gleiche Zusammensetzung besitzt, wie die Verbrennungsgase, erhitzt <sup>10)</sup>, dann sind die Bemühungen zu einer möglichst weitgehenden Annäherung der Bedingungen der Beschleunigungsprüfung an die praktischen Betriebsbedingungen zwar gut und schön, wenn jedoch diese Anpassung allzu kompliziert wird, dann beeinträchtigt dies die Vorteile der Beschleunigungsprüfung (beschleunigten Prüfung?). Auch mit der Versuchsstandprüfung haben schon viele Forscher Versuche gemacht <sup>12)</sup>.

Über den Einfluß von Legierungselementen auf die PbO-Beständigkeit eines Ventilmateriales gibt es ausführliche Forschungsarbeiten <sup>55)</sup>. Das im Sinne einer Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit wirksamste Element ist das Cr, auch Zusätze von Ni, Mn, Co, Mo usw. erhöhen die Korrosionsbeständigkeit. Von Silicium wird ganz allgemein gesagt, daß es ein Element sei, das die Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit erhöhe, auf die PbO-Korrosionsbeständigkeit jedoch übt es einen schlechten Einfluß aus, so daß Vorsicht geboten ist.

Die Abbildung 9 <sup>55)</sup> und <sup>56)</sup> zeigt den Einfluß des prozentualen Siliciumgehaltes auf die PbO-Korrosionsbe-

ständigkeit der wärmebeständigen Stähle des Cr-Ni-Systemes und des Cr-Ni-Mn-Systemes. Wir sehen aus dieser Abbildung, daß das Silicium auf die Stähle mit niedrigem Cr-Gehalt sowie auf die Stähle, welche die PbO-Korrosionsbeständigkeit herabsetzende Elemente, wie etwa W, As oder P enthalten, einen besonders starken Einfluß ausübt, während andererseits bei den Stählen mit hohem Cr-Gehalt, denen man geeignete Mengen von Ni, Mn, Co, Mo usw. zugesetzt hat, bis zu 1 % kein schlechter Einfluß ausgeübt wird. Von den im Stahl enthaltenen Verunreinigungen hat As einen besonders starken Einfluß, und, sei es nun in der Grundzusammensetzung des Stahles oder in irgendeinem der zugesetzten Elemente als Verunreinigung enthalten, so übt es selbst dann, wenn es nur in äußerst kleiner Menge enthalten ist, einen sehr schlechten Einfluß aus 55).

Die Abbildung 10 56) zeigt einige Beispiele von Ergebnisse der PbO-Schmelztiegelprüfung der in der Tafel 4 zusammengestellten heute in Amerika repräsentativen Ventilwerkstoffe TPM ist eine für die Ventile von Flugzeugen verwendete Legierung auf Nickelbasis. In den letzten Jahren wird bei den Benzinmotoren, insbesondere wenn diese bei ihrem Betrieb auf hohe Temperaturen kommen, die PbO-Korrosionsbeständigkeit stark betont worden, die Legierungen auf Nickelbasis sind in ihren PbO-Korrosionsbeständigkeitseigenschaften besonders hervorragend, und aus diesem Grunde werden in Europa und in Amerika bei den hochbeanspruchten Benzinmotoren, bei den Rennmotoren usw. die Legierungen auf Nickelbasis des Ni-monic-Systemes und des Inconel-Systemes in ganz großem Maßstabe hergestellt. Von den austenitischen Cr-Ni-Stählen ist der 21-4N-Stahl (mit niedrigem Silicium-Gehalt) besonders bemerkenswert.

Wenn wir nur die heute verwendeten Werkstoffe für Ventile in Betracht ziehen, dann sind Angaben über dessen Beständigkeit gegenüber den Angriffen des Vanadiums verhältnismäßig spärlich; die Abbildung 11 <sup>57)</sup> zeigt die Ergebnisse, die man für die Gewichtsabnahme durch Korrosion erhalten hat, indem man die verschiedenen Legierungen zunächst in eine  $V_2O_5$ -Schmelze von  $900^\circ C$  eintauchte und dann ungefähr 15 Minuten lang einem  $O_2$ -Gasstrom von  $925^\circ C$  aussetzte, und diese Operation mehrmals wiederholte. In dieser Abbildung sind die eine gute Korrosionsbeständigkeit aufweisenden Legierungen das 23 Cr Sicromal (23Cr-3 Si-Al) und die Legierungen mit hohem Si-Fe-Gehalt. Die Korrosionsbeständigkeit der Stähle mit hohem Chromnickel-Gehalt ist außerordentlich gut, so hat man beispielsweise bei den Stählen mit 30 bis 60 % Cr-Ni-Gehalt bei der Prüfung in Temperatur von  $700-1\ 000^\circ C$  eine wesentlich bessere Korrosionsbeständigkeit gegen den Schwerölaschegehalt festgestellt <sup>58)</sup> als bei den gewöhnlichen wärmebeständigen austenitischen Cr-Ni-Stählen. Tatsächlich werden die Cr-Ni-Legierungen vom Typ 60-40 oder vom Typ 50-50 als vanadiumbeständiges Material für die mit Schweröl beheizten Kessel weithin verwendet <sup>50)</sup>. Lediglich die Legierungen mit hohem Nickelgehalt werden durch die  $Na_2SO_4$  enthaltende Asche schnell angegriffen. So hat man beispielsweise bei einer Prüfung mit der Asche des aus Venezuela stammenden Erdöles (V 45 %, Na 2 %, S 3 %) mit den Legierungen auf Eisenbasis, welche nur wenig Nickel oder überhaupt kein Nickel enthielten, wesentlich bessere Ergebnisse erzielt als bei den Legierungen auf Nickelbasis oder auf Co-Basis <sup>59)</sup>. Die Schwefelbeständigkeit der Legierungen mit hohem Nickelgehalt wird durch einen Aluminiumzusatz auffallend verbessert.

Von hier ausgehend können wir den Schluß ziehen, daß bei den Auspuffventilen der Dieselmotoren, bei denen die Korrosion in der Hauptsache von dem Vanadium und dem Schwefel herrührt, zum Unterschied von den Benzinmotoren noch immer in der Hauptsache die verschiedenen wärmebeständigen Stähle des Silchrome-Systems angewandt werden. Der Aluminiumzusatz ist sofern es sich nicht um gegossene Ventile handelt im Hinblick auf das Herstellungsverfahren nach der Umformtechnik begrenzt.

Wir haben im Vorstehenden einen Überblick über die Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit der Ventilwerkstoffe gegeben, je nach der Verschiedenheit der korrosiven Umgebung ist jedoch auch die Zusammensetzung der für diese Umgebung geeigneten Werkstoffe außerordentlich verschieden. Im Hinblick auf die Bearbeitbarkeit und auf die verschiedenen mechanischen Materialeigenschaften ist es außerordentlich schwierig, ein Material zu finden, das für eine sehr weiten Bereich der Anwendungsbedingungen eine vollkommene Korrosionsbeständigkeit besitzt. Wenn man weiterhi bedenkt, daß die vorhandenen, sich auf die Korrosion beziehenden Daten, in der Hauptsache von beschleunigten Prüfungen im Laboratorium herkommen, und wenn man sich zudem vergegenwärtigt, daß schon durch ganz geringe Unterschiede der Versuchsverfahren und der Versuchsbedingungen erhebliche Schwankungen in den Ergebnissen zu befürchten sind, dann weiß man, daß man diese Daten nur mit größter Vorsicht anwenden darf.

### 5.2 Das Aufschweißen von Hartlegierungen

Eine Legierung, der man gleichzeitig eine Hochtemperaturhärte und eine Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion verliehen hat, wird auf die Ventilsitzfläche und auf die

Ventiltellerfläche des Auspuffventiles aufgeschweißt (oder durch Pulverflammspritzen aufgebracht). Wenn man diese Bearbeitungsoperation vom Gesichtspunkt des Betriebszustandes eines Auspuffventiles her betrachtet, dann ist dies eine Maßnahme, die sich äußerst wirksam auf die Verhütung der Abbrandverluste auswirkt, in dieser Weise werden deshalb heute in der Hauptsache für die Hochleistungsbenzinmotoren die verschiedenen Legierungen angewandt. In der Abbildung 10<sup>56)</sup> werden Beispiele der Ergebnisse der PbO-Schmelztiegelprüfung der heute in Amerika verwendeten, in der Tafel 4 zusammengestellten Aufschweißlegierungen gezeigt. X-782 ist eine Legierung auf Nickelbasis, welche für die oben erwähnten TPM-Ventile verwendet wird. Die PbO-Korrosionsbeständigkeit dieser Legierung ist zwar ganz allgemein gesehen hervorragend, die Legierung Stellite 6 auf Co-Basis jedoch, die bisher in sehr weitem Umfang verwendet wurde, steht der Ni-Cr-Legierung nach. In England ist heute die Verwendung von Stellite 6 und Brightray am weitesten verbreitet, in Westdeutschland wird auch Ni 60 verwendet (Zusammensetzung von Brightray: C 0,2, Cr 20, Mn 0,8, Si < 0,3, Fe < 1,0, Rest Ni; Zusammensetzung von Ni 60: C 0,45, Cr 15, Si 4,5, Ni 60, Rest Fe). Wenn wir einige amerikanische Beispiele, die sich auf Ventile für Flugzeugmotoren beziehen, näher betrachten, dann finden wir, daß zuerst Stellite 6 und dann Brightray verwendet wird, weiterhin wird in der neueren Zeit C26 versuchsweise verwendet (Zusammensetzung von C26: Cr 10, Si 0,2, Mo 2,5, Al 11, Rest Ni). Da C26 ungefähr 10 % Aluminium enthält, so wird beim Aufschweißen leicht eine Oxidschicht gebildet und es werden leicht Einschlüsse beigemischt, und da sehr häufig

auch ein Einschmelzen des Muttermaterialies (ein Hineinschmelzen in das Muttermaterial?) erfolgt, ist C26 in diese Punkte dem Brightray unterlegen. Die Leistungsfähigkeit einer Aufschweißlegierung wird wesentlich davon beeinflusst, ob die Aufschweißigenschaften mehr oder weniger gut sind; der Zusatz aktiver Elemente wie etwa Al, Ti, Zr oder einiger Elemente der seltenen Erden, bringt, wenn man beim Auftragsschweißverfahren nicht eine ganz besondere Sorgfalt walten läßt, selbst bei sehr kleinen Mengen dieser Zusätze leicht eine Beeinträchtigung der Aufschweißigenschaften mit sich.

### 5.3 Der Aluminiumüberzug

Das Aufschweißen von Stellite oder dergleichen hat heute große Verbreitung gefunden und hervorragende Erfolge gezeitigt. Eine solche Legierung ist jedoch außerordentlich teuer, und auch die Operation der Auftragsschweißung erfordert viel Erfahrung und Geschick. Dies ist der Grund, weshalb der Aluminiumüberzug als eine außerordentlich leicht aufzubringende Oberflächenüberzugsschicht auch in Amerika weite Verbreitung gefunden hat. Das Verfahren der Herstellung eines Aluminiumüberzuges besteht in einem Flamspritzen (wörtlich: Schmelzspritzen) und einem sich daran anschließenden kurzzeitigen Diffusionserhitzen, es hat den Vorteil, daß sich der ganze Prozeß nahezu vollständig automatisch gestalten läßt. Ein anderes Verfahren ist das Verfahren des Hochtemperatureintauchens, das jedoch abgesehen von den ganz großen Ventilen, kaum angewandt wird. Die hervorragende Oxidationsbeständigkeit einer Aluminiumüberzugsschicht sowie ihre Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer schwefelenthaltenden Atmosphäre sind seit langen allgemein bekannt.

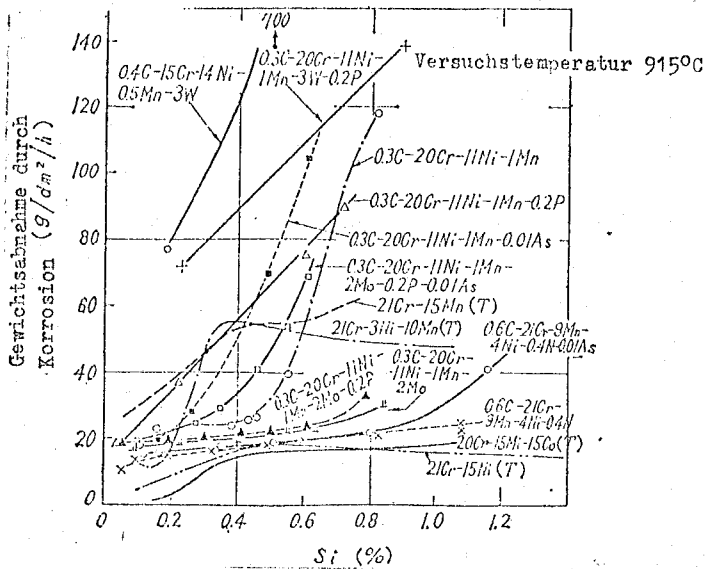


Abbildung 9 Der Einfluß des prozentualen Siliciumgehaltes auf die PbO-Korrosionsbeständigkeit der wärmebeständigen Stähle des Cr-Ni (Cr-Ni-Mn)-Systemes

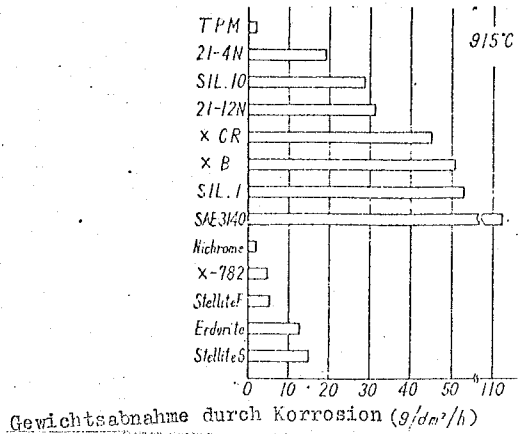


Abbildung 10 Die Ergebnisse der PbO-Schmelztiegelprüfung der heute verwendeten Auspuffventilstähle und Aufschweißlegierungen



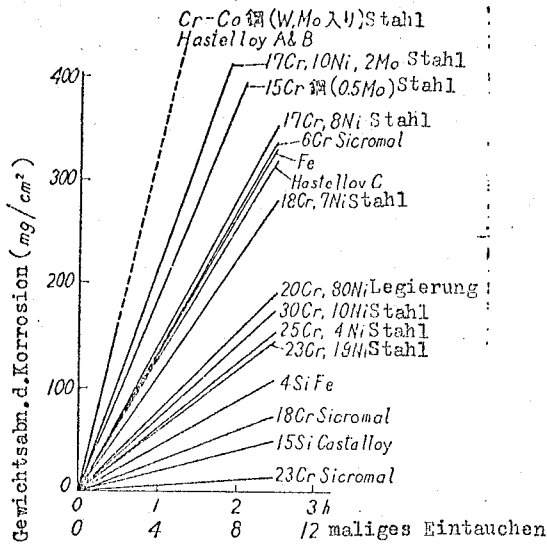


Abbildung 11 Die Ergebnisse der  $V_2O_5$ -Schmelztiegelprüfung verschiedener Legierungen

		C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe	N	W	Co	sonst.
Ferrit-System	SAE 3140	0.4	0.8	0.3	0.7	1.3	Bal.				
	XB (En 59)	0.8	0.4	2.0	21.0	1.5	Bal.				
	Sil.1 (En 52)	0.5	0.4	3.3	8.5		Bal.				
σ 相	XCR	0.4	1.0	1.0	23.5	5.0	Bal.				2.8 Mo
Austenit-System	Sil.10	0.4	1.1	2.9	19.0	8.0	Bal.				
	21-12 N	0.2	1.3	1.0	21.0	11.5	Bal.	0.18			
	21-4 N	0.6	9.0	0.2	21.0	4.0	Bal.	0.40			
	TPM	0.1	2.0	0.1	15.7		Bal.	6.0			3Ti
Aufschweißlegierungen	Stellite 6	1.05	0.61	21	27.6		2.0		4.25	Bal.	
	Stellite F	1.60	0.25	1.25	24.0	24.0			12.5	37.0	
	X-782	2.0			25.0	60.0	4.0		8.5		
	Endurite	2.0		1.0	29.0	39.0	8.0		3.15	10.0	
	Nichrome	0.20	94.0	21	20.25	77.10	80				

Tafel 4 Die chemische Zusammensetzung (%) der heute verwendeten Auspuffventilstähle und der Aufschweißlegierungen

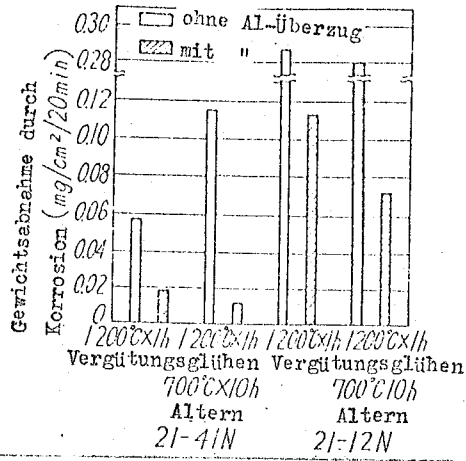


Abbildung 12 Der Einfluß eines Aluminiumüberzuges bei Auspuffventilstählen auf die PbO-Korrosionsbeständigkeit

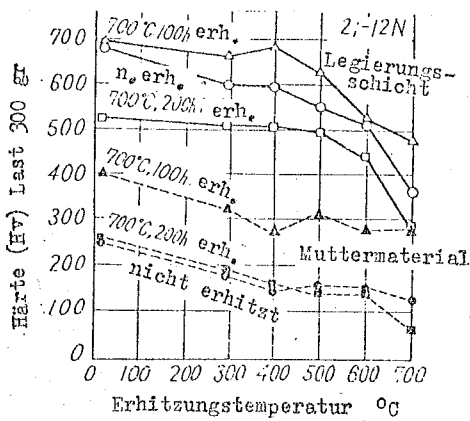


Abbildung 13 Die Hochtemperaturoberflächenhärte des mit einem Aluminiumüberzug versehenen Stahles 21-12N

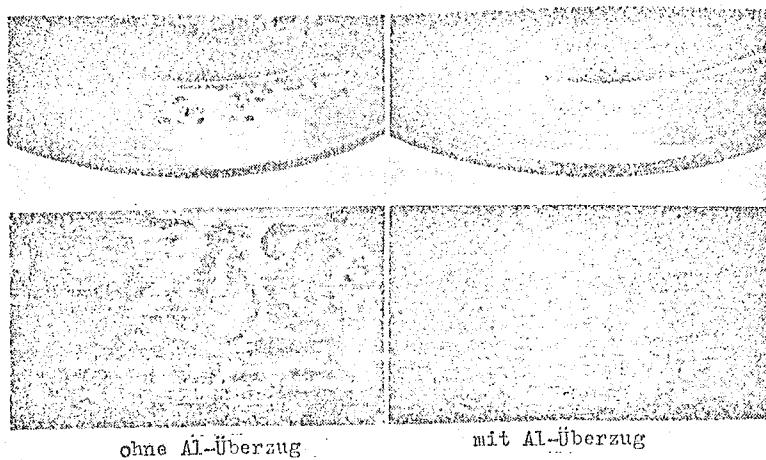


Abbildung 14 Der Zustand der Oberfläche bei Auspuffventilen aus dem Stahl 21-12N nach einer Betriebsdauer von 100 000 Stunden bei praktischer Fahrt (7000 km) (2/4 Last, 3 000 U/min)

Die Abbildung 12<sup>60)</sup> zeigt die Ergebnisse einer Schmelztiegelprüfung, bei der man den Einfluß einer Aluminiumüberzugsschicht auf die PbO-Korrosionsbeständigkeit repräsentativer Auspuffventilstähle untersucht hat. Zum Unterschiede von dem Fall<sup>54)</sup>, wo man bis zu ungefähr 1 % Aluminium zugesetzt hat, wird bei einer hochkonzentrierten Al-Fe-Legierungsschicht die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem PbO, wie man deutlich erkennt, ganz wesentlich erhöht. Auch bei den Stählen AISI 301, 302 und 446 hat man einen Aluminiumüberzug ausgeführt; wie man hört, wurde durch eine Prüfung bei 850 - 1000°C in 10 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> enthaltendem V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> festgestellt, daß durch die Aluminiumüberzugsschicht die Korrosionsbeständigkeit um das zwei bis drei Fache erhöht wurde.

Die Abbildung 13<sup>60)</sup> zeigt als Beispiel die Oberflächenhärte des mit Aluminium überzogenen Ventilstahles 21-12N bei hohen Temperaturen; bei der Aluminiumüberzugsschicht bleibt auch nach einem lange dauernden Erhitzen auf 700°C eine wesentlich bessere Hochtemperaturhärte erhalten als bei dem Muttermaterial. Bei einer Betriebsprüfung auf dem Versuchsstand (Benzinmotor), bei welcher man die mit Aluminium überzogenen Ventile prüfte, hat man die in der Abbildung 14<sup>62)</sup> und in der Abbildung 15<sup>62)</sup> dargestellten Ergebnisse erhalten, aus denen hervorgeht, daß die Korrosion und der Abriebverschleiß der Ventilsitzfläche von Auspuffventilen des Austenit-Systemes durch einen Aluminiumüberzug ganz wesentlich verringert werden. Bei den Ansaugventilen des Ferritsystemes jedoch hat man keine ausreichende Wirkung beobachtet, in der Hauptsache doch wohl deshalb, weil der Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten der Legierungsüberzugsschicht und des Muttermaterials allzu groß

war. Die Ventiltellerflächen der Auspuffventile großer Schiffsdieselmotoren werden mit Aluminiumüberzügen versehen, und es wird berichtet, daß aufgrund der Ergebnisse, die man bei einem sich über ungefähr 2 000 Stunden erstreckenden praktischen Betrieb bei Verwendung eines 100-270 ppm Vanadium enthaltenden Dieselkraftstoffes erhalten hat, die Abbrandverlustmenge der Ventiltellerfläche durch den Aluminiumüberzug um  $1/3 - 2/3$  verringert wurde.

Wenn wir die oben dargelegten Ergebnisse zusammenfassen, dann kommen wir zu dem Schluß, daß eine Aluminiumüberzugsschicht gegen den Abbrand der Auspuffventile außerordentlich wirksam ist, und daß man diesen Vorteil durch eine ganz leichte Maßnahme erreichen kann. So weit man jedoch nicht ganz besondere Maßnahmen ergreift, beträgt die Dicke der Überzugsschicht allenfalls 0,3 mm; entsprechend den beim praktischen Betrieb gegebenen Bedingungen muß man jedoch daran denken, daß es auch Fälle geben kann, in denen es sehr schwierig ist, eine korrosionsbeständige Überzugsschicht über ausreichend lange Zeit hinweg aufrechtzuerhalten. Als Oberflächenbehandlungsverfahren hat man außerdem auch noch an Keramiküberzüge und an galvanisch aufgebraute Chromüberzüge gedacht, all diese Verfahren sind bis jetzt jedoch noch nicht praktisch angewandt worden.

#### 5.4 Sonstige Maßnahmen

Außer den oben dargelegten Maßnahmen gibt es zur Verhütung der Abbrandverluste (der Hochtemperaturkorrosion) der Auspuffventile auch noch die Maßnahme des Herunterdrückens des Ventiltemperaturanstieges, sowie die Maßnahmen, welche sich auf den Kraftstoff und auf das Schmieröl beziehen. Die Maßnahmen, welche eine Niedrighaltung der Ventiltemperatur zum Ziele haben, hängen, wie wir dies oben

bereits erwähnt haben, auf das Engste mit den Problemen der Konstruktion der Ventile und des Motors, der Bearbeitung, der Einstellung und der Instandhaltung der Ventile zusammen. Man sagt, daß bei den hohlen Ventilen die maximale Temperatur um mindestens  $100^{\circ}\text{C}$  niedriger sei als bei den massiven Ventilen der gleichen Abmessungen; deshalb ist es eine ganz besonders kennzeichnende Tendenz bei den Auspuffventilen, welche nicht nur auf die Flugzeuge beschränkt ist, sondern in den letzten Jahren auch bei den Personenkraftwagen der höheren Klassen und bei den Sportwagen der Firma Daimler-Benz angewandt wurde, die hohlen Ventile mit einer Natriumkühlung (Wasserkühlung) zu versehen. Es gibt auch Fälle der Anwendung hohler Ventile, bei denen die Verwendung von Austenitstahl nicht notwendig ist

Sehr wichtig ist im Zusammenhang mit dem Ventilbewegungsmechanismus die Anwendung von Ventilrotierern. Durch diese Ventilrotierer wird das Ventil positiv in Drehung versetzt was sich sehr vorteilhaft im Sinne einer Verhütung der Abbrandverluste auswirkt. Die Ergebnisse von Betriebsprüfungen schwerer Lastwagen haben wie in mehreren Berichten 23) und 56) zum Ausdruck kommt, bewiesen, daß durch die Anwendung von Ventilrotierern die Ventillebensdauer um das 2-5-fache gesteigert wurde. Heute ist ganz allgemein die Tendenz vorhanden, bei den schweren Motoren diese Ventilrotierer anzuwenden. Außerdem ist es auch wünschenswert, hydraulische Ventilbetätigungen anzuwenden.

Über den Dieselkraftstoff und das Schmieröl ist zu sagen, daß heute die Forschung nach solchen Kraftstoffen und Ölen mit großer Dringlichkeit betrieben wird, welche bei hoher Leistungsfähigkeit eine möglichst geringe Korrosivi-

tät besitzen. Eines der Verfahren zur Unterdrückung der Aggressivität des Vanadiums bei Gasturbinen und Kesseln besteht darin, daß man dem Kraftstoff oder den Verbrennungsgasen ein Mittel zusetzt, durch welches der Schmelzpunkt des Aschegehaltes erhöht oder dessen Absetzfreudigkeit verringert wird; in dieser Richtung sind schon einige Verfahren (64) und (65) durchgeführt worden. Bei diesen Versuchen wurde festgestellt, daß MgO und CaO ganz hervorragende Zusatzmittel sind, welche sich insbesondere im Sinne einer Erhöhung des Schmelzpunktes von  $V_2O_5$  auswirken.

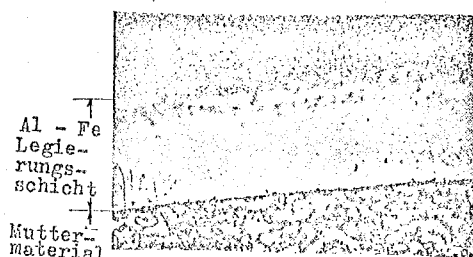


Abbildung 15 Der Zustand der Oberfläche bei einem Auspuffventil aus dem Stahl 21-12N (mit Aluminiumüberzug) nach einer Betriebsdauer von 250 Stunden bei praktischer Fahrt