

Einige problematische Punkte bei der Planung  
der Aluminiumlegierungskolben für schnellaufende  
Dieselmotoren

von Hideaki NAKANO  
und Tadao HATTORI

Firma Kawasaki Jukogyo K.K.

Universität Stuttgart

Zusatzblatt

Hand in Hand mit der Erhöhung der Drehzahlen und der Steigerung der Leistungen bei den Dieselmotoren mittlerer Größe ist in der neueren Zeit die überaus starke Beanspruchung der Kolben ganz allgemein zu einem brennenden Problem geworden. Bisher hat man zwar bei den Dieselmotoren mittlerer und hoher Drehzahlen Aluminiumkolben aus einem Stück verwendet, für die Planung der Kolben in dieser Form gibt es jedoch auf reicher Erfahrung beruhende Beispiele in großer Zahl. Man hat deshalb bei den einzelnen Firmen die jeweiligen Formen des Kolbens einfach übernommen, und so ist das über die Technik dieser Planung veröffentlichte Material außerordentlich spärlich.

In der vorliegenden Arbeit wird nun über die Verhütung von Spannungskonzentrationen, die Temperatur des Kolbens und seine Dauerfestigkeit bei hohen Temperaturen berichtet; weiterhin ist aufgrund des gesamten experimentell und empirisch ermittelten Materials die Planung eines Kolbens mit hoher Dauerfestigkeit bei hohen Temperaturen durchgeführt worden, und es wird der Nachweis erbracht, daß auch ganz einfache aus einem Stück hergestellte Aluminiumkolben hohen Belastungen standhalten können.

## 1. Vorwort

Aluminiumlegierungskolben werden in großer Zahl in den kleinen schnellaufenden Dieselmotoren bis hinauf zu den Dieselmotoren mittlerer Größe und mittlerer Drehzahl verwendet, es gibt jedoch in der Literatur kaum eine Veröffentlichung über die Planung dieser Kolben. Der Grund dieses

Fehlens von Literaturberichten dürfte wohl darin zu suchen sein, daß man die Planung eben aufgrund der sich bei der täglichen Arbeit ansammelnden Erfahrung ausgeführt hat, und daß es natürlich außerordentlich schwierig ist, über eine ausschließlich auf Erfahrung beruhende Planung zu berichten. Insbesondere dann, wenn man es mit Kolben aus einem Spezialmaterial, wie etwa mit den Aluminiumlegierungskolben zu tun hat, die unter ganz komplizierten Betriebsbedingungen arbeiten müssen, dann ist es unerlässlich, all diese Faktoren in ihrer Gesamtheit zu erfassen und bei der Planung des Kolbens zu berücksichtigen; es ist deshalb außerordentlich schwierig, Richtlinien für eine Planung zu finden, welche auf allgemein gültigen Gedankengängen aufgebaut sind.

Die Verfasser haben nun einen verhältnismäßig einfachen einteiligen Legierungskolben möglichst hohen Belastungen ausgesetzt und auf experimentellem Wege die Fragen untersucht, wie man den Kolben am besten verstärken und ihm eine höhere Festigkeit verleihen kann und in welcher Weise die Festigkeit dieses Kolbens im Zusammenhang mit der Betriebstemperatur bewertet werden muß. Hierüber wird in der vorliegenden Arbeit berichtet. Wir haben uns zwar alle Mühe gegeben, der empirischen Planung eine Allgemeingültigkeit zu verleihen, da wir jedoch dieses Ziel mancherorts nicht in befriedigender Weise erreichen konnten, so bitten wir den Leser von vornherein, hierfür Verständnis zu haben.

## 2. Die mechanische Beanspruchung

Durch den Druck der im Zylinder explodierenden Gase wer-

den in den einzelnen Teilen des Kolbens mechanische Spannungen erzeugt. Selbst dann, wenn der Kolbendurchmesser verschieden ist und wenn die geometrische Form des Kolbens Unterschiede aufweist, werden durch einen und denselben Gasdruck die gleichen Spannungen erzeugt. Weiterhin besteht zwischen dem Gasdruck und den Spannungswerten immer eine proportionale Beziehung. Wenn man also für die repräsentativen Kolbenformen die Spannungsverteilung untersucht, dann kann man auch für verschiedene Durchmesser auf leichte Weise die Spannungswerte vorausschätzen.

Im folgenden soll über die Einrichtung für Messung dieser Spannungen und über die wichtigsten Punkte der Messung selbst berichtet werden, von den bei der Messung erhaltenen Spannungsverteilungen soll anhand von drei Spannungsmodellbeispielen dargelegt werden, wie man durch Ausschaltung der Spannungskonzentrationen die Festigkeit erhöht hat.

## 2.1 Die Einrichtung zur Spannungsmessung und die Meßmethodik

Wir haben die Kurbelwelle eines einfachen Versuchsmotors mit 220 mm Zylinderdurchmesser in der oberen Totpunktlage fixiert, und in diesem Zylinder die zu prüfenden Kolben eingebaut; durch das Anlaßventil des Zylinderdeckels lassen wir die Hochdruckgase einströmen, und maßen die in dem zu prüfenden Kolben erzeugten Spannungen (Dehnungen?). In der Abb.1 ist die Spannungsmeßeinrichtung dargestellt. Um zunächst die Spannungsverteilung kennenzulernen, bauten wir einen an der Oberfläche seiner Innenwände mit einem Spannungslack überzogenen Kolben ein, und wir beobachteten die beim Angreifen des Gasdruckes entstehen-

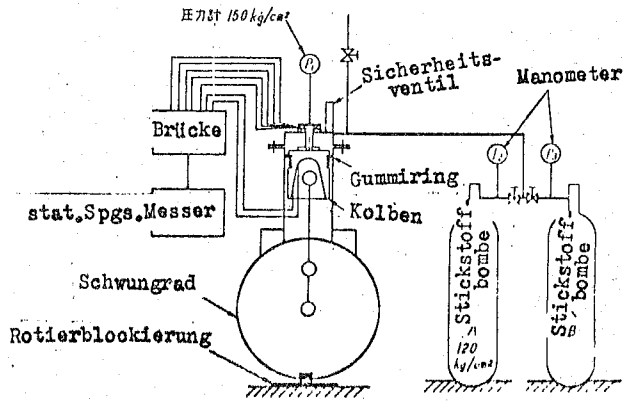


Abb.1 Schematische Darstellung der Einrichtung zum Messen der vom Gasdruck am Kolben angreifenden Kräfte

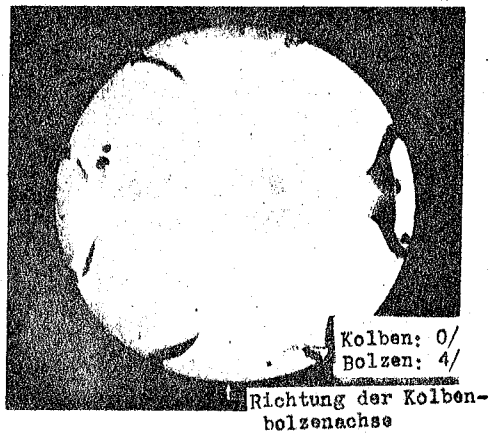


Abb.2 Das mit Hilfe von Spannungslack erzeugte Rißmuster der oberen Kolbenkopffläche

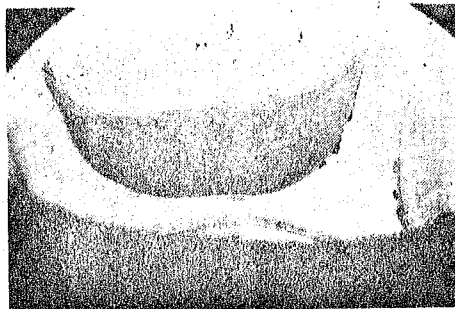


Abb.3 Das mit Hilfe von Spannungslack erzeugte Rißmuster über der Kolbenbolzennabenschulter

den Rißmuster. In der Abb.2 sehen wir ein Beispiel des Rißmusters, wie es in dem Spannungslack an der Kolbenkopf-  
fläche entstanden ist. In der Abb.3 sehen wir das Span-  
nungslackrißmuster des Außenumfangs der Rippen der Rück-  
seite eines mit Rippen versehenen Kolbens. Nachdem wir auf  
diese Weise die Spannungsverteilung im voraus beobachtet  
hatten, klebten wir an ungefähr 70 Punkten der Spannungs-  
konzentrationsstellen der Innenfläche und der Außenfläche  
des zu prüfenden Kolbens Querdehnungsmeßstreifen von 3 mm  
und 5 mm Länge auf. Die Anschlußdrähte der auf die Kopf-  
fläche des zu prüfenden Kolbens aufgeklebten Dehnungsmeß-  
streifen wurden durch den Zylinderdeckel nach außen durch-  
geführt, während die Anschlußdrähte der in den Ringnuten  
und auf der rückwärtigen Fläche aufgeklebten Dehnungsmeß-  
streifen vom Kurbelgehäuse nach außen herausgezogen wurden;  
sämtliche Anschlußdrähte der Dehnungsmeßstreifen wurden  
an einen statischen Dehnungsmesser angeschlossen. In den  
Abb.4 und 5 sehen wir fotografische Aufnahmen, welche die  
auf den Kolben aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen zeigten.  
Nachdem man auf die Kolben der verschiedenen Formen die  
Dehnungsmeßstreifen aufgeklebt hatte, wurden diese einge-  
baut, man ließ den Gasdruck einwirken und maß dann die  
Dehnung. Bei den aus praktischen Motoren entnommenen Prüf-  
kolben maßen wir den Elastizitätsmodul des Materiales,  
und rechneten die Dehnung auf die Spannung unter Berück-  
sichtigung des Poisson'schen Verhältnisses um.

## 2.2 Die Spannungsverteilung

In den Abb.6,7 und 8 sehen wir die Ergebnisse, die wir  
bei der Messung der Verteilung der mechanischen Spannungen



Abb.4 Die auf der oberen Kolbenkopffläche aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen

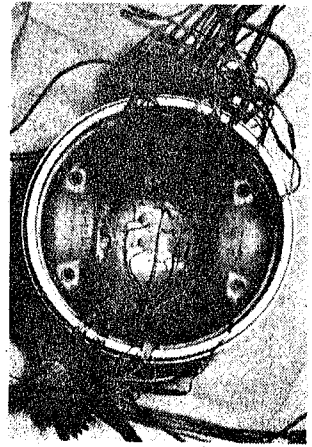
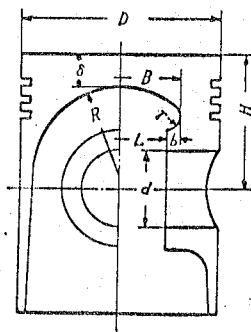


Abb.5 Die aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen

Tafel 1

Vergleichende Gegenüberstellung der Formen der untersuchten Kälben



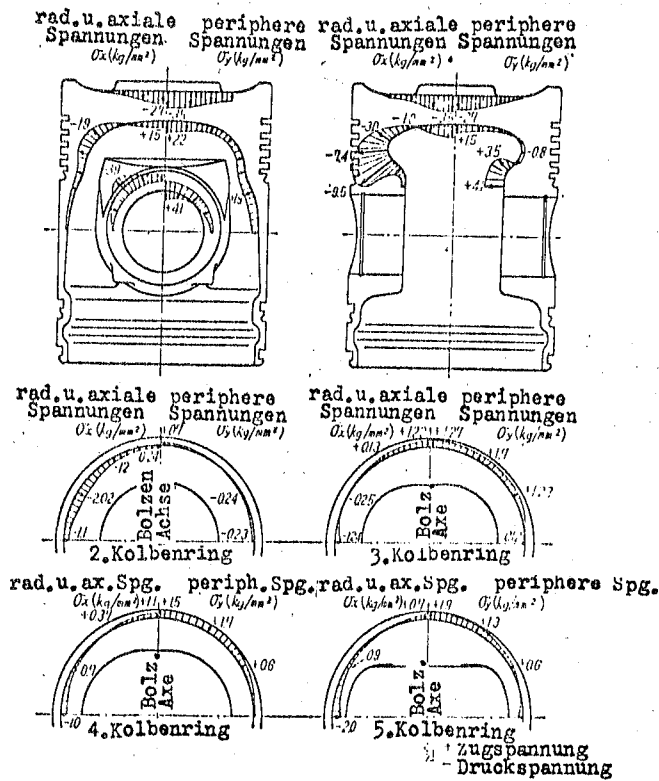
Formen	Form 1	Form 2	Form 3
d/D	0.386	"	"
H/D	0.67	"	"
s/D	0.148	0.148	0.168
B/D	0.632	0.430	0.568
b/D	0.08	-0.023	0.068
R/D	1.8	1.8	0.8
r/D	0.068	—	0.068
L/D	0.473	"	"

für die Kolbenformen 1,2 und 3 erhalten haben. Diese Spannungen entsprechen einem Gasdruck von  $80 \text{ kg/cm}^2$ . Die Abmessungen sind der Tafel 1 zu entnehmen.

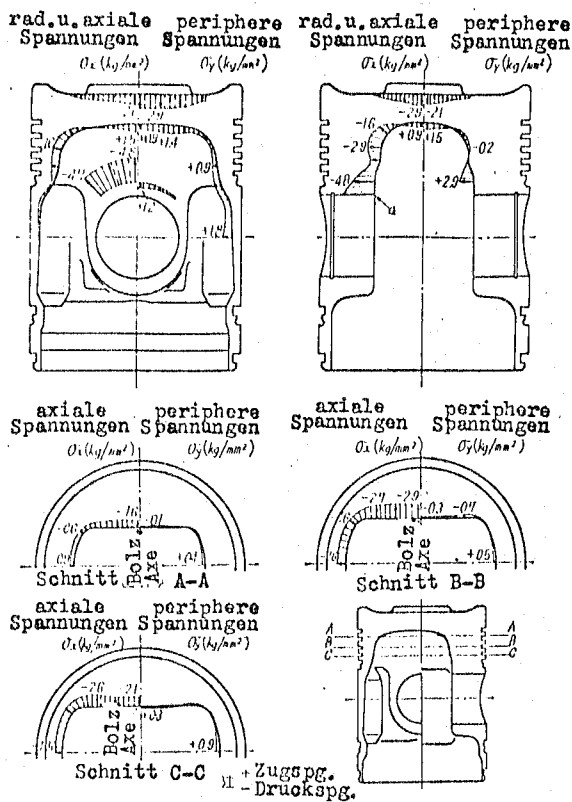
Bei der Kolbenform 1 ist die maximale Spannungskonzentration in dem ausgesparten Teil über der Kolbenbolzennabenschulter an der rückwärtigen Fläche des Kolbens entstanden. Diese Spannungen stellen, wie wir dies aus der Abbildung ersehen können, nach oben und nach unten wirkende Druckspannungen dar, welche ungefähr  $9,5 \text{ kg/mm}^2$  erreichen. Die in der oberen Kopffläche entstehenden Spannungen sind höher als die Spannungen der rückwärtigen Fläche, sie stellen ebenfalls Druckspannungen von  $3,5 \text{ kg/mm}^2$  dar. Die Spannung in der engen zweiten Ringnut betrug dabei  $2,02 \text{ kg/mm}^2$ .

Bei der Kolbenform 2 haben wir die Aussparung über der Kolbenbolzennabenschulter weggelassen. In diesem Falle tritt die Beseitigung der Spannungskonzentration in diesem Teile ganz deutlich in Erscheinung. Auch die Spannung in der oberen Kolbenkopffläche ist unter dem Einfluß der Beseitigung der Aussparung des Kolbens auf  $2,9 \text{ kg/mm}^2$  abgesenkt worden. Andererseits jedoch ist die Spannung an der innenseitigen Nabenstirnfläche auf ungefähr  $4,8 \text{ kg/mm}^2$  angestiegen und man kann abschätzen, daß die Spannung im Punkte a des Kolbenbolzenlagers ungefähr  $7 \text{ kg/mm}^2$  (noch nicht gemessen) erreicht.

Bei der Kolbenform 3 hat man die Kolbenkopflattendicke ganz wesentlich verstärkt und die Kolbenkopffläche wellenförmig geändert. In dem ausgesparten Teil über der Kolbenbolzennabenschulter haben wir eine Spannung von  $6,8 \text{ kg/mm}^2$



**Abb. 6** Die Ergebnisse, die wir bei der Messung der Verteilung der vom Gasdruck herrührenden Spannungen für die Kolbenform 1 erhalten haben



**Abb. 7** Die Ergebnisse die wir bei der Messung der Verteilung der vom Gasdruck herrührenden Spannungen für die Kolbenform 2 erhalten haben



und an der Stirnfläche der Nabenseite eine Spannung von  $2,7 \text{ kg/mm}^2$ , während die Spannung in der Kolbenkopffläche  $2,7 \text{ kg/mm}^2$  beträgt, wobei es sich durchweg um Druckspannungen handelt.

### 2.3 Die Beseitigung der Spannungskonzentrationen

Obwohl wir nur drei verschiedene Kolbenformen betrachtet haben, so sind doch die von uns dort festgestellten Spannungswerte und die Stellen der Spannungskonzentration außerordentlich verschieden, und man kann verstehen, wenn man auf die Bestimmung der Form die größte Sorgfalt verwendet. Um bei der Planung eines Kolbens die Spannungskonzentration abzusenken, muß bezüglich der Form auf die nachstehend aufgeführten Punkte ein besonderes Augenmerk gerichtet werden:

#### a) Die Spannungen in der oberen Fläche des Kolbenkopfes

Diese Spannungen sind zwar auf den ersten Blick ihrem Zahlenwert nach nur niedrig, da jedoch, wie wir nachher noch im einzelnen darlegen werden, die Temperatur in diesem Teil sehr hoch ist, so ist es wünschenswert, daß diese Spannungen um 30-50% niedriger sind als die Spannungen im Nabenteil. Um eine Absenkung dieser Spannungen zu erreichen, genügt es zwar, wie leicht einzusehen ist, die Kolbenbodenplatte recht dick zu machen, da jedoch die Wärmeableitung zur rückwärtigen Fläche schlecht ist, so muß man sich hier auf eine unbedingt notwendige Mindestgrenze beschränken. Wenn man sich einer Kühlung durch eingespritztes Öl bedient, dann ist es wünschenswert, die Kolbenkopfbodenplatte in der Mitte dünn zu machen und sie von der Mitte an in radialer Richtung dicker werden zu lassen. Wie wir in einem späteren Abschnitt darlegen wer-

den, muß letztlich der äquivalente Zusammenhang der Festigkeit mit der Temperatur des Kolbens untersucht werden.

b) Die Spannungen über der Nabenschulter

Wenn wir annehmen, daß, wie dies bei der Kolbenform 2 der Fall ist, keine Aussparung vorgesehen ist, so kann die mit dieser Aussparung zusammenhängende Spannungskonzentration ausgeschaltet werden. Dann besteht jedoch die Gefahr, daß lokale Spannungen in der Kolbenbolzenachse auftreten. Auf diesen Punkt hat Bensinger<sup>1)</sup> hingewiesen, wenn man nämlich im Punkte a eine Rundung anbringt, dann muß man auch in Kauf nehmen, über der Nabenschulter eine kleine Aussparung vorzusehen. Dabei ist es besonders wichtig, die Tiefe dieser Aussparung und ihre Krümmung zu bestimmen.

c) Die Spannungen in den Kolbenringnuten

Wie wir in der Abb.6, unten, sehen können, sind die Spannungen im äußeren Umfang nicht so groß, daß sie ein besonderes Problem darstellen. Was die Spannungskonzentrationen in den Ecken der Kolbenringnuten, welche gewöhnlich problematisch sind, anbetrifft, so genügt es, wenn man auf die Dicke des Kolbenringnutrandes nach oben und nach unten, sowie auf die Krümmung in den Ecken achtet.

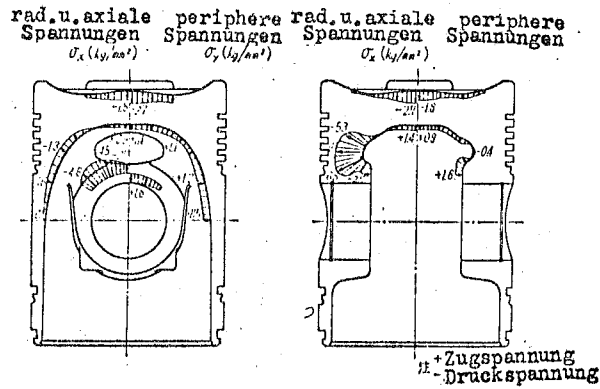
In der Abb.9 sehen wir eine unter Berücksichtigung des oben Gesagten konstruierte Kolbenform mit 220 mm Durchmesser, sowie die bei dieser Kolbenform gemessenen Spannungswerte. Da man bei diesem Kolben ganz besonders auf die Abänderung gegenüber der bisherigen Form geachtet hat, so hat man zwar nicht immer gerade die ideale Form getroffen, aber man sieht doch deutlich, daß man eine aus-

reichende Erhöhung der Festigkeit erzielt hat. Eine Untersuchung, inwieweit wir bei den jeweils gegebenen Betriebstemperaturen und bei den Gasdruckbedingungen eine Erhöhung der Festigkeit erzielen, ist im Abschnitt 5 angeschlossen.

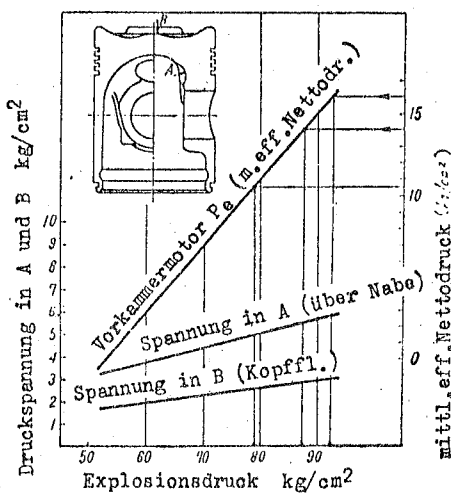
### 3. Die Temperatur des Kolbens

Unter Kolbentemperatur wollen wir die sich während des Betriebes einstellende stationäre Temperatur, sowie die sich während des Betriebes periodisch ändernde Temperatur, sowie die durch das Anfahren und Halten und durch plötzliche Belastungsschwankungen hervorgerufenen Temperaturschwankungen verstehen.

Die Temperaturänderung stellt an sich eine sich dauernd wiederholende Wärmespannung dar, welche zusammen mit den in der gleichen Weise sich wiederholend angreifenden mechanischen Beanspruchungen als eine überlagerte Spannung wirkt. Wenn wir die Temperaturänderung von diesem Gesichtspunkt aus betrachten, dann kommen wir zu der Frage der Amplitude und der Schwingungszahl der Temperaturänderung. Wenn wir beispielsweise lokal eine Temperaturänderung von  $8^{\circ}\text{C}$  haben, dann bedeutet dies eine Wärmespannung von  $1 \text{ kg/mm}^2$ . Es scheint jedoch ganz allgemein so zu sein, daß die Amplitude der lokal und periodisch wirkenden Temperaturänderungen keinen besonders hohen Wert besitzt. Andererseits wird jedoch bei einem Vorkammermotor in der von den aus der Vorkammeröffnung herausströmenden Flammen getroffenen Kolbenoberfläche lokal eine Temperaturänderung erzeugt, deren Amplitude (deren Maximalwert?) so groß ist, daß man sie bei der Spannungsbewertung nicht vernachlässigen darf.

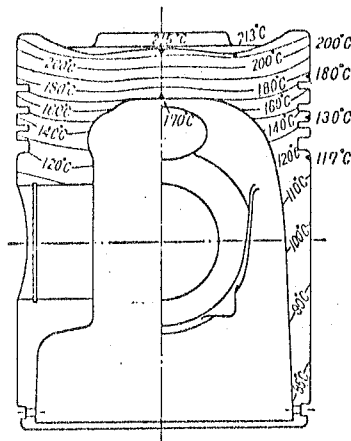


**Abb. 8** Die Ergebnisse, die wir bei der Messung der Verteilung der vom Gasdruck herrührenden Spannungen für die Kolbenform 3 erhalten haben



**Abb. 9**

Die in einem verstärkten Kolben entstehenden mechanischen Spannungen



Untersuchter Motor:  
V8V 22/30 mAL, Viertaktvorkammer-Hohlkolbenmotor mit Auflader und mit Luftkühler  
Betriebsbedingungen:  
Leistung: 1600 PS/750 U/Min.  
mittlerer effektiver Nettodruck:  $10.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$   
▲: praktisch gemessene Werte

**Abb. 10** Die Ergebnisse der praktischen Messung der Kolbentemperatur in einem Schiffshauptmotor

Da die Verfasser gerade diesen Punkt noch nicht in ausreichendem Maße untersucht haben, so soll in der vorliegenden Arbeit auf die Temperaturänderungen, welche die Ursache der Wärmewechselspannungen bilden, nicht bezug genommen werden, sondern wir wollen vielmehr über unsere Untersuchungen berichten, deren Gegenstand die sich während des Betriebes einstellende stationäre Temperatur war.

Da die Kolbentemperatur für die durch die Wärmeexpansion hervorgerufene Formänderung des Kolbens, sowie für die Schmierfunktion des obersten Kolbenringes bestimmend ist, so unterliegt diese Kolbentemperatur im Hinblick auf die Konstruktion des Kolbens ganz bestimmten Bedingungen. Ein weiterer problematischer Punkt, welcher im Hinblick auf die Kolbenplanung nicht übersehen werden darf, ist, insbesondere dann, wenn es sich um Aluminiumlegierungskolben handelt, die außerordentlich starke Absenkung der Ermüdungsgrenze bei höheren Temperaturen.

Wenn wir deshalb die Festigkeit in den einzelnen Teilen des Kolbens untersuchen, dann müssen wir im Zusammenhang damit unter allen Umständen auch die jeweilige Temperatur an diesen einzelnen Stellen des Kolbens berücksichtigen. Von dem oben dargelegten Gesichtspunkten aus wollen wir also jetzt einmal die Temperatur in den einzelnen Teilen des Kolbens untersuchen.

### 3.1 Praktische Beispiele der Temperaturverteilung

Die Abb.10 zeigt ein Beispiel der Temperaturverteilung in den einzelnen Teilen des Kolbens. Es handelt sich bei dieser Abbildung um die Temperaturverteilung in einem

Aluminiumlegierungskolben während des Betriebes in einem 16 Zylinder V8-Kawasaki-MAN Motor der Bauart V 22/30 mAL mit 1600 PS/750 U/Min. ( $P_e = 10.5 \text{ kg/cm}^2$ ) mit einem Zylinderdurchmesser von 220 mm und einem Hub von 300 mm. Bei der Abnahmeprüfung dieses Motors im Landbetrieb sind die von der technischen Forschungsanstalt der Eisenbahn in 7 Hauptpunkten gemessenen Temperaturen in ihrer Verteilung in dieser Weise vorausgeschätzt worden. Bei diesem Beispiel betrug die Temperatur in der Kolbenkopfbodenplatte  $215^\circ\text{C}$ , während die Temperatur in der Mitte der rückwärtigen Fläche  $170^\circ\text{C}$  betrug; die Temperaturdifferenz zwischen der oberen und der unteren Fläche, mit welcher die Wärmespannung in der Kolbenkopfbodenplatte eng verknüpft ist, betrug also  $45^\circ\text{C}$ . Die Temperatur in dem Teil der Spannungskonzentration oberhalb der Nabenschulter betrug  $140^\circ\text{C}$ , während die Temperatur im hinteren Teil der oberen Kolbenringnut  $170^\circ\text{C}$  betrug. Die Temperatur im Kolbenbolzenlager betrug  $110^\circ\text{C}$ .

Dieser Kolben wurde dadurch gekühlt, daß man Kühlöl von dem oberen Ende der Pleuelstange aus gegen die rückwärtige Fläche des Kolbens spritzte; da der Motor mit einem Ladeluftkühler ausgerüstet war, so wurden ganz allgemein niedrige Temperaturen erzielt. Bei Fahrzeugmotoren und dergleichen und auch in anderen Fällen, wo sich ein Ladeluftkühler nicht einbauen läßt, und in solchen Fällen, wo der Motor häufig hohen Sommertemperaturen ausgesetzt ist, kommt es nicht selten vor, daß die obere Kolbenkopffläche eine Temperatur von  $300^\circ\text{C}$  erreicht.

### 3.2 Eine Methode zum Vorausschätzen der Kolbentemperatur

Wenn man dabei ist, einen neuen Kolben zu entwickeln, dann kommt man nicht darum hinum, die Kolbentemperatur im voraus abzuschätzen. Zu diesem Zwecke wird gewöhnlich in wohl bekannter Weise die von Eichelberg vorgeschlagene und dann von Pflaum verbesserte Experimentalgleichung für die Wärmeübertragung<sup>3)</sup> angewandt. Die Verfasser haben nun die Temperatur in der Mitte der oberen Kolbenkopffläche und die Temperatur an der unmittelbar darunter liegenden Stelle der rückwärtigen Kolbenfläche als eine Vergleichsgrundnorm betrachtet. Im folgenden werden nun die den Zusammenhang mit diesen Temperaturen herstellenden Berechnungsgleichungen angegeben:

Wenn wir  $\Delta A$  als eine winzig kleine Fläche betrachten, dann ist:

$$\left. \begin{aligned} q &= K \cdot \alpha_{gm} (t_{g \text{ res}} - t_{p1}) \Delta A \\ q_{oil} &= \frac{\lambda}{\delta} (t_{p1} - t_{p2}) \Delta A \\ &= \alpha_{oil} (t_{p2} - t_{oil}) \Delta A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

Hierin sind:

- q : die von der Gasseite her in den Kolben einströmende Wärmemenge
- q oil: die von der rückwärtigen Fläche abströmende Wärmemenge
- $\alpha_{gm}$  : der nach der Experimentalgleichung von Eichelberg berechnete mittlere Wärmeübertragungskoeffizient zwischen den Gasen und der oberen Kolbenkopffläche
- t<sub>g res</sub>: die mittlere Gastemperatur unter Berücksichtigung von  $\alpha_{gm}$
- t<sub>p1</sub> : die Temperatur der oberen Kolbenkopffläche
- t<sub>p2</sub> : die Temperatur der rückwärtigen Kolbenkopffläche
- t oil: die Temperatur des Öles
- $\delta$  : die Dicke der Kolbenkopfplatte
- $\lambda$  : die Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumlegierung
- $\alpha_{oil}$ : die Wärmeleitfähigkeit der rückwärtigen Fläche und des Öles.

Die oben angeführte Größe K ist der Korrekturkoeffizient von  $\alpha_{gm}$ , bei einem üblichen Auflagemotor ist dieser

Koeffizient größer als 1. Hierbei ist die Anwendung des Wertes von Pflaum wahrscheinlich allgemein. Der Wärmeübertragungskoeffizient der rückwärtigen Kolbenkopffläche und des Öles ist

$$\alpha_{oil} = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{t_{p2} - t_{oil}} \frac{\lambda}{\delta} \dots \dots \dots (2)$$

Wenn wir diesen Wärmeübertragungskoeffizienten nach der Gleichung (2) bestimmen, dann finden wir  $\alpha_{gm}$ , wenn wir die Temperatur des Kolbens messen. Wie wir aus der Abb. 11 ersehen, ist die in die obere Kolbenkopffläche von der Gasseite her einströmende Wärmemenge, wenn wir sie uns in die in die Kolbenseitenfläche einströmende Wärmemenge  $(1 - \mu)q$  und die von der rückwärtigen Seite her in das Öl einströmende Wärmemenge  $q_{oil}$  aufgeteilt denken, durch folgende Gleichungen gegeben

$$t_{p1} = t_{g\ res} - (t_{g\ res} - t_{oil}) \cdot \frac{1}{1 + \mu K \alpha_{gm} \left( \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{oil}} \right)} \dots \dots \dots (3)$$

$$t_{p2} = t_{p1} - \mu K \alpha_{gm} \frac{\delta}{\lambda} (t_{g\ res} - t_{p1}) \dots \dots \dots (4)$$

hierin ist

$$\mu = q_{oil} / q \dots \dots \dots (5)$$

Nun kann man die oben erwähnte Beziehung herausfinden. Der Wert von  $\mu$  ist ein von den Verfassern gefundener Erfahrungswert und beträgt 0.3 - 0.7, je nach dem Kühlverfahren, er wird als im wesentlichen konstant angesehen.

In der Abb. 12 haben wir den Wert  $\mu K$  als konstant vorausgesetzt und das Ausmaß der vom Öl herrührenden Kühlung sowie die Temperatur der oberen Kolbenkopffläche im Zusammenhang mit der Dicke der oberen Kolbenplatte untersucht. Mit zunehmender Dicke der Kolbenkopffplatte steigt allmählich die Temperatur des Kolbens an, und andererseits wird die Temperaturdifferenz zwischen der oberen Fläche und der unteren Fläche der Kolbenkopffplatte größer. Wenn wir



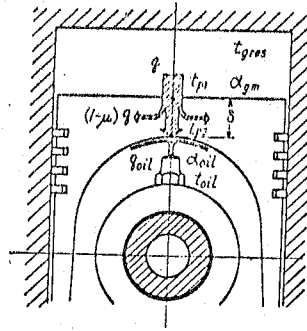


Abb.11 Der Wärmefluß

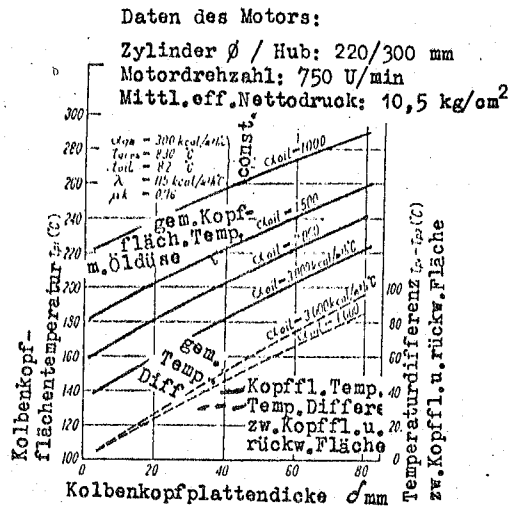


Abb.12 Der Zusammenhang zwischen der Dicke der oberen Kolbenkopfflatte und der Temperatur

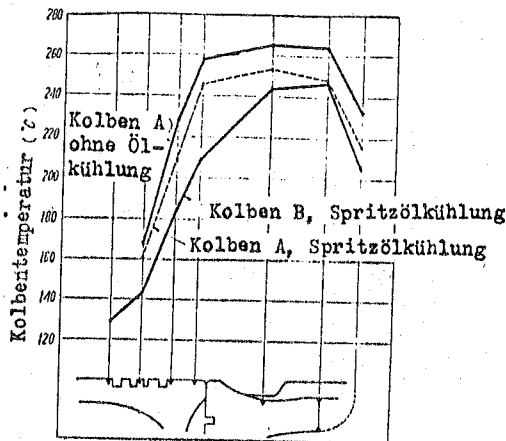


Abb.13 Vergleichende Darstellung der Ergebnisse, die wir bei der praktischen Messung der Kolbentemperatur unter den Bedingungen des fahrenden Wagens erhalten haben

in diesen Kurven den Fall geometrisch ähnlicher Kolben annehmen, dann machen wir die Feststellung, da sich ja die Dicke der Kolbenplatte und der Kolbendurchmesser proportional ändern, daß bei den Kolben mit großem Durchmesser selbst bei gleichen Wärmeverlusten die Temperatur allmählich ansteigt und daß hier die Wärmespannungen problematisch werden. Wenn wir aufgrund derartiger Kurven einen <sup>zu</sup> Kolben konstruieren haben, dann können wir auch die Frage untersuchen, ob hier nicht irgend ein besonderes Kühlsystem angewandt werden muß.

### 3.3 Beispiele für die Absenkung der Temperatur des oberen Kolbenringes

Wir wollen hier zum Vergleich ein praktisches Beispiel der effektiven Absenkung der Temperatur des oberen Kolbenringes anführen. Die Abb.13 zeigt die Ergebnisse, welche die Verfasser mit einem ganz einfachen Versuchsmotor bei ihren Messungen der Kolbentemperatur bei ihren Versuchen unter normalen praktischen Fahrbedingungen im Wagen erhalten haben. Natürlich war dabei kein Luftkühler vorhanden. Wir haben bei diesen Versuchen die Kolbenformen A und B verwendet, und dabei die beiden Fälle mit Kühllöleinspritzung vom oberen Pleuelstangenende her und ohne diese Einspritzung miteinander verglichen. Die Betriebsbedingungen (Fahrbedingungen?) waren dabei genau die gleichen. Bei dem Kolben B haben wir den Durchmesser des Körpers (?) von der Kolbenkrone bis zum Kolbenringrand größer gemacht als beim Kolben A und dadurch den Spalt (das Spiel?) enger gemacht. Die Temperaturdifferenz zwischen der punktierten Linie und der strichpunktierten Linie ist die Auswirkung des verringerten Spaltes (Spieles?), und da

Tafel 2

Die mechanischen Eigenschaften der eutektischen und der übereutektischen Aluminium-Silizium-Kolbenlegierungen

Materialeigenschaften	Zustand	0.2 % Streckgrz. $\sigma_{0.2}$ kg/mm <sup>2</sup> 20°C	Zugfestigkeit			Bruchdehnung $\delta_B$ % 20°C	Biegedauerfestigkeit $\sigma_{bw}$ kg/mm <sup>2</sup> 20°C
			$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup> 20°C	$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup> 150°C	$\sigma_B$ kg/mm <sup>2</sup> 250°C		
eutektische Al-Si-Kolbenlegierung Mahle 124	gegossen	19~23	20~25	18~23	10~15	0.3~0.8	8~12
	geschmiedet	28~34	30~37	25~30	11~17	1~3	11~14
übereutektische Al-Si-Kolbenlegierung Mahle 138	gegossen	17~20	18~22	17~20	10~14	0.2~0.7	8~11
	geschmiedet	22~26	23~30	20~24	11~17	0.5~1.5	9~12

Aluminium-Taschenbuch, 12 Auflage, 1963, S. 103, Tafel 22.

Tafel 3

Das Diagramm der Hochtemperaturermüdungsgrenze und die Zusammenstellung der gemessenen Werte

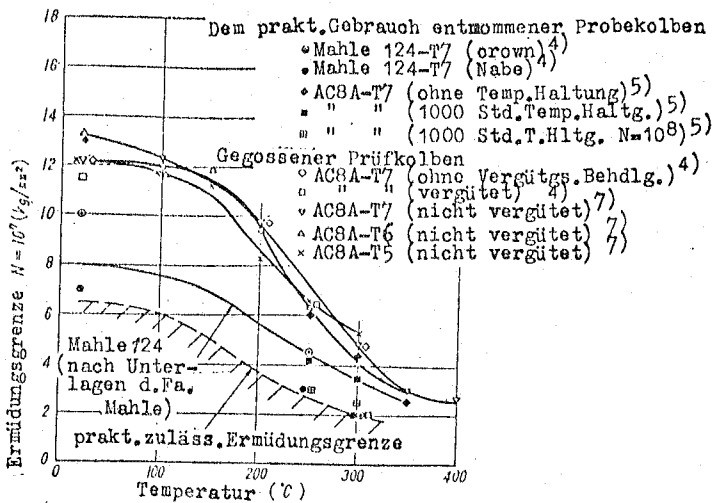
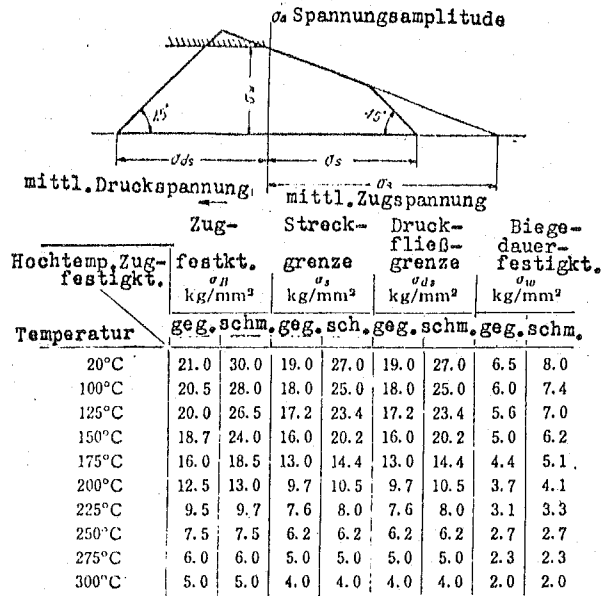


Abb. 14 Die Hochtemperaturermüdungsfestigkeit der gegossenen eutektischen Al-Si-Legierung

die Wärme von der Kronenkörperseite unmittelbar in die Zylinderbüchse abfließt, so sehen wir hier in der Kolbenkronen eine Absenkung der Temperatur um  $37^{\circ}$ . Dies bedeutet eine ganz deutliche Absenkung der Temperatur an der Stelle des oberen Kolbenringes um  $25^{\circ}$ .

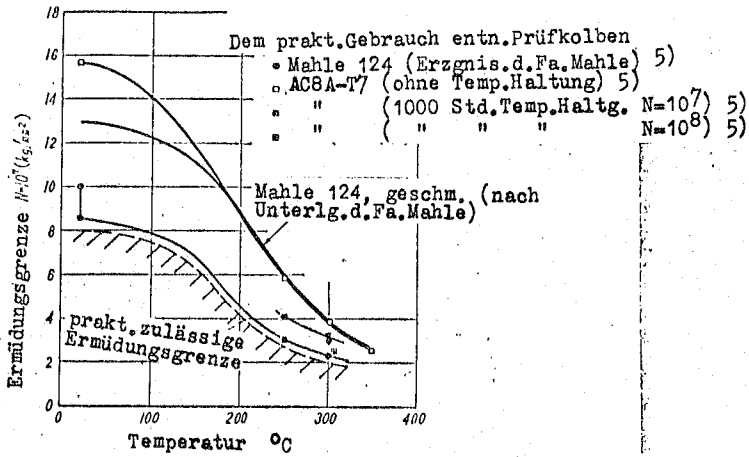
Hierbei wirkt sich die Einspritzung von Kühlöl in der Mitte der Kolbenkopffläche in einer Absenkung der Temperatur um  $17^{\circ}\text{C}$  aus. Wir sehen hieraus, daß eine Verengung des Spaltes (des Spieles?) im Sinne einer Absenkung der Temperatur außerordentlich wirksam ist, daß sich jedoch die Frage erhebt, ob eine kurzzeitige Erhöhung der Belastung über das durch die im einzelnen Falle vorhandene Kühlung gegebene Maß hinaus zugelassen werden kann oder nicht. Die Verfasser haben für den Kolben B in dieser Richtung praktische Versuche durchgeführt, indem sie diesen Kolben ganz kurzzeitig unter Vollast setzten und sie haben dabei die Feststellung gemacht, daß man dabei keine übertriebene Besorgnis zu haben braucht (?).

#### 4. Der Zusammenhang zwischen der Betriebstemperatur und der Festigkeit

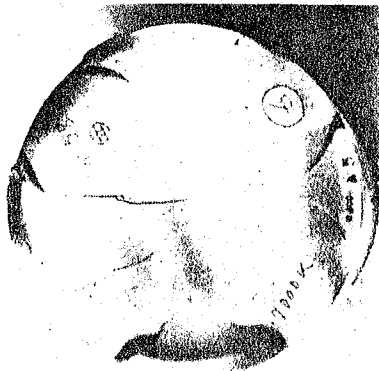
##### 4.1 Die Ermüdungsgrenze bei hohen Temperaturen

Zum Zwecke des Vergleiches zeigen wir in der Tafel 2 eine Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften der eutektischen Legierung Al-12% Si und der übereutektischen Legierung Al-18% Si als Kolbenmaterial. Diese Beispiele stammen von der wohlbekanntesten westdeutschen Firma Mahle.

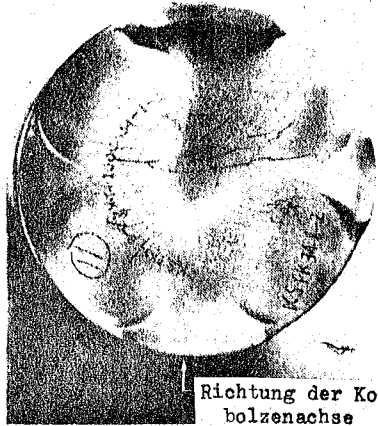
Bei den Aluminiumlegierungen haben wir nicht nur den Nachteil, daß bei hohen Temperaturen die Ermüdungsgrenze außerordentlich stark absinkt<sup>4)</sup>, sondern es wird auch



**Abb. 15** Die Hochtemperaturermüdungsfestigkeit der geschmiedeten (warmgepreßten?) eutektischen Al-Si-Legierung



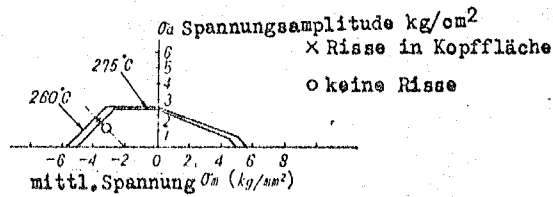
Richtung der Kolbenbolzenachse



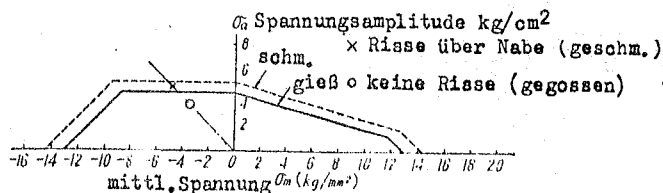
Richtung der Kolbenbolzenachse

**Abb. 16** Die Sprünge und Risse in der oberen Kolbenkopffläche (geschmiedet) (warmgepreßt?)

**Abb. 17** Die Sprünge und Risse in der oberen Kolbenkopffläche (gegossen)



**Abb. 18** Die Spannungen in der oberen Kolbenkopffläche und deren Ermüdungsgrenze



**Abb. 19** Die Spannungen über der Kolbenbolzennabenschulter und die Ermüdungsgrenze

darauf hingewiesen, daß durch die lange Aufrechterhaltung der hohen Temperatur ein Absinken der Ermüdungsgrenze eintritt<sup>5)</sup>.

Es wird angenommen, daß man eine Stufe, bei welcher man die Oberflächenrauigkeit, die Wirkung der Masse und die Defekte in der richtigen Weise bewerten kann, überhaupt nicht erreicht wird.

Um deshalb die bei der praktischen Planung eines Kolbens zulässigen Werte zu bestimmen, ist man gezwungen, die Erfahrung zu Hilfe zu nehmen. Die Verfasser haben nun wiederholt nachgeprüft, inwieweit ein praktisch angewandter Kolben aus der eutektischen Legierung Al-12% Si (JIS-AC8A) ähnlich wie JIS-AC8A bei bestimmten Beanspruchungen und Temperaturen verwendet werden kann. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in der Tafel 3 zusammengestellt, welcher wir die im einzelnen Falle festgestellten Ermüdungsgrenzen entnehmen können. Die in der Abb.3 aufgeführten Zahlenwerte können wir als praktisch anwendbare zulässige Beanspruchungen bezeichnen, der gemessene Kolben hatte hinten und vorne einen Durchmesser von 200 mm. Es kommt jedoch auch vor, daß gegossene Kolben bisweilen erhebliche Gießdefekte aufweisen, bei solchen Defekten, welche auch mit der zerstörungsfreien Materialprüfung nicht einwandfrei festgestellt worden sind und die praktisch im voraus nicht in Erscheinung treten, empfiehlt es sich Zahlenwerte anzunehmen, welche noch sicherer sind als die in der Tafel angegebenen Werte.

Zum Zwecke des Vergleiches haben wir in den Abb.14 und 15 die von verschiedenen andern Forschern erhaltenen Versuchs-

ergebnisse den in unserer Tafel aufgeführten Zahlenwerten gegenübergestellt. Der schraffierte Bereich in diesen Abbildungen stellt den aufgrund der Zahlenwerte der Tafel 3 für die Planung eines Kolbens zulässigen Bereich dar, dabei hat sich ergeben, daß an der unteren Grenze der mit den Prüfproben erhaltenen Werte die Ergebnisse übereinstimmen.

#### 4.2 Einige Beispiele von Kolbendefekten und ihre Betrachtung

Durch praktische Anwendung der in der Tafel 3 zusammengestellten Werte und durch gleichzeitige Betrachtung einiger Beispiele der Kolbenbeschädigung konnten wir eine Bestätigung für die Zahlenwerte der Tafel 3 erhalten.

##### a) Die Risse in der Kolbenkopffläche

Die Abb.16 zeigt die fotografische Tiefenaufnahme (?) der Risse und Spalten, welche in der Kolbenkopffläche eines in einem Vorkammermotor praktisch verwendeten, aus der eutektischen Legierung Al-12% Si gegossenen Kolbens entstanden sind, während die Abb.17 die in einem aus dem gleichen Material gegossenen Kolben von ähnlicher Form entstandenen Risse zeigt. In beiden Fällen handelt es sich um Fahrzeugmotoren, welche bereits 270 000 km gelaufen waren, als man bei ihnen das Auftreten der Risse feststellte. Bei den gegossenen Kolben treten an der Stelle, wo die aus der Vorkammeröffnung kommenden Flammen auf die Kolbenoberfläche auftreffen, ganz feine Risse auf. Bei den gegossenen Kolben sind senkrecht zur Kolbenbolzenachse linienförmige Risse entstanden. In beiden Fällen haben wir das besondere Kennzeichen, daß die senkrecht zur Kolbenbolzenachse verlaufenden Risse ein star-

kes Wachstum (eine starke Zunahme?) aufweisen und daß sie mit fortschreitender Betriebszeit nach und nach tiefer und größer werden. Die winzig kleinen Risse an der Flammeneauf-treffstelle sind eine ganz besondere, den gegossenen Kolben eigene Erscheinung. Von diesem Gesichtspunkt her betrachtet dürfen wir annehmen, daß diese feinen Risse auf Ungleichmäßigkeiten des Materiales beruhen. Deshalb werden bei der Planung eines Kolbens die senkrecht zur Kolbenbolzenachse verlaufenden linienförmigen Risse problematisch. Das eingangs beschriebene, in der Abb.2 dargestellte, mit Hilfe von Spannungslack erhaltene Rißmodellmuster stimmt mit diesen linienförmigen Rissen voll und ganz überein. Die Kolbenkopflattentemperatur des Kolbens, bei welchem diese Risse entstanden sind, war verhältnismäßig hoch, sie betrug im Betrieb bei Nennlast  $275^{\circ}\text{C}$ . Die mechanischen Spannungen in der Kolbenkopffläche dieses Kolbens haben bei der Messung  $-3,45 \text{ kg/mm}^2$  ergeben. Bei der Änderung der Form, bei welcher man nachher die Spannungen in der Kolbenkopffläche auf  $-2,7 \text{ kg/mm}^2$  absenken konnte, war die genannte Art der Risse, obwohl die Temperatur der Kolbenkopffläche nahezu garnicht geändert wurde, war diese Art von Rissen vollständig verschwunden. Die Entstehung dieser Risse läßt sich aufgrund der Tafel 3 wie folgt erklären:

Wir haben mit Hilfe der Tafel 3 das Diagramm der Ermüdungsgrenze bei einer Kolbenkopftemperatur von  $275^{\circ}\text{C}$  aufgestellt und in dieses Diagramm haben wir die Spannungswerte eingetragen und dann den jeweiligen Grad der Sicherheit untersucht. Die Abb.18 zeigt diese Untersuchung. Wir



haben sodann die Temperaturdifferenz zwischen der Kolbenkopffläche und der rückwärtigen Fläche, sowie die Bündelung (?) des Kolbenkörpers (?) berücksichtigt und nach dem Verfahren von Eichelberg und Fitzgeorge<sup>6)</sup> die festzulegende Wärmespannung rechnerisch bestimmt, wir erhielten dabei für die obere Kolbenkopffläche den Wert von  $-2 \text{ kg/mm}^2$  (Druckspannung). Da die mechanischen Spannungen des Risse aufweisenden Kolbens  $-3,45 \text{ kg/mm}^2$  betragen, so war die mittlere Spannung  $\sigma_m = -1.73 \text{ kg/mm}^2$  und die Spannungsamplitude betrug  $\sigma_a = \pm 1.73 \text{ kg/mm}^2$ ; wenn wir hierzu auch noch die Wärmespannung hinzuzählen, dann erhalten wir  $\sigma = -(1.73+2) \pm 1.73 \text{ kg/mm}^2$ . Diesen Zahlenwert haben wir in die Abb.18 als x eingetragen. Andererseits haben wir das Beispiel eines Kolbens, an dem sich keine Risse gebildet hatten, als O eingetragen. In dem sich zwischen diesen beiden Beispielen befindenden Zwischenraum liegt die Ermüdungsgrenze, und so ist es durchaus verständlich, daß man durch Reduzierung der mechanischen Spannungen die Entstehung von Rissen ausschalten konnte. Dabei muß man jedoch berücksichtigen, daß die sich einstellenden Wärmespannungswerte außerordentlich hoch sind und als eine Beschränkung der Ermüdungsgrenze angesehen werden. Wenn man andererseits die Temperatur der oberen Kolbenkopffläche, wie dies in der Abb.18 zu sehen ist, etwa bis auf  $260^\circ\text{C}$ , also um ungefähr  $15^\circ\text{C}$  absenkt, dann kann man sich auch vorstellen, daß die Ermüdungsgrenze angehoben wird und daß das x in den zulässigen Bereich hineinfällt. Hierbei finden wir zwischen den mechanischen Spannungen und der Temperatur des Kolbens einen äquivalenten Zusammenhang.

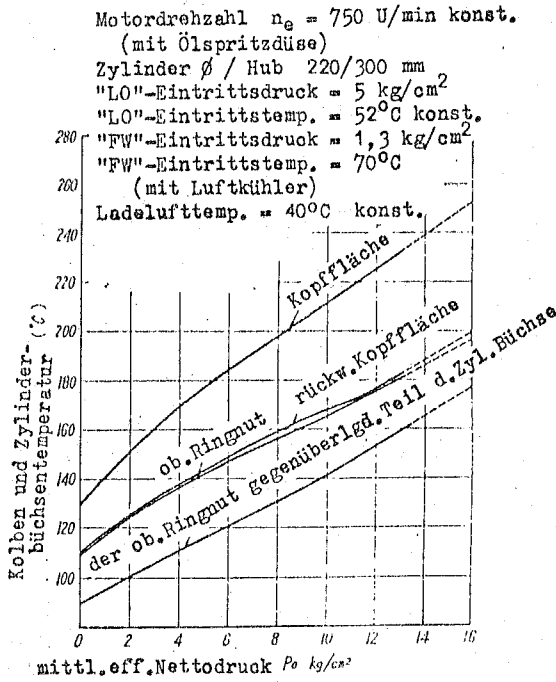


Abb.20 Die Temperatur des verstärkten Kolbens

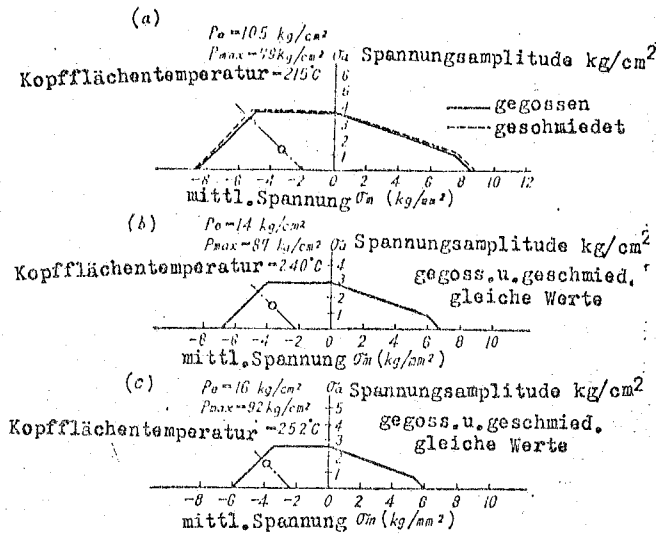


Abb.21 Die Spannungen in der oberen Kolbenkopffläche und die Ermüdungsgrenze beim verstärkten Kolben

b) Die Risse über der Kolbenbolzennabenschulter

In der Abb.19 sehen wir ein Beispiel der Untersuchung der Beschädigungen des Kolbens mit bezug auf den sich über der Kolbenbolzennabenschulter befindenden Teil. Wir haben die Erfahrung gemacht, daß während der Lebensdauerprüfung eines versuchsweise hergestellten gegossenen Kolbens über der Kolbenbolzennabenschulter Risse aufgetreten sind. Die Temperatur in diesem Teil des Kolbens über der Kolbenbolzennabenschulter betrug, wie man sich überzeugt hat,  $175^{\circ}\text{C}$ . In der Abbildung haben wir für das Beispiel, bei dem wir den Teil über der Nabenschulter verstärkt und damit die Rißbildung ausgeschaltet hatten, mit einem O und das Beispiel, bei welchem erfahrungsgemäß die Risse auftraten, mit einem X eingetragen.

In diesem Fall haben wir die Tatsache, daß, wenn man selbst bei gleicher Kolbenform einen gegossenen Kolben anwendet, Risse auftreten, durch eine punktierte Linie gekennzeichnet, für diese Tatsache haben wir auch eine Bestätigung erhalten.

5. Die Untersuchung des Leistungsbereiches für die Anwendung der einteiligen Aluminiumlegierungskolben

Wir haben die Frage untersucht, bis zu welchen Leistungsbereichen die Kolben mit 220 mm Durchmesser angewandt werden können; da wir uns bemüht haben, den verfügbaren Raum für eine verstärkte Motorleistung (?) zu untersuchen, so wollen wir hiervon ein Beispiel anführen. Wir wollen versuchen herauszufinden, in welchem Leistungsbereich wir den in der Abb.9 dargestellten Kolben zulassen können. Um nun diese Möglichkeiten zu untersuchen,

haben wir in der Abb.9 auf der Abszissenachse den maximalen Druck im Zylinder abgetragen und damit den Zusammenhang zwischen diesem maximalen Druck im Zylinder einerseits und dem mittleren effektiven Nettodruck und den mechanischen Spannungen andererseits aufgezeigt. In der Abb.20 haben wir die Temperatur in der oberen Kolbenkopffläche, in der rückwärtigen Kolbenkopffläche und in der Kolbenringnut des obersten Kolbenringes bei diesem Kolben ebenfalls in Abhängigkeit vom mittleren effektiven Nettodruck aufgezeichnet. Die vollausgezogene Linie gibt den Bereich der praktisch ausgeführten Messungen an, während die punktierte Linie den geschätzten Bereich angibt. Der verwendete Motor ist in diesem Diagramm angegeben.

Die Abb.21 und 22 zeigen die Ergebnisse, welche wir bei der Untersuchung der Ermüdungsgrenze erhalten haben und die wir unter Verwendung der Abb.9 und 20, sowie unter Anwendung der Tafel 3 aufgezeichnet haben. In beiden Fällen können wir, wenn wir uns nach diesen Diagrammen richten, innerhalb des Bereiches der Ermüdungsgrenze bei hohen Temperaturen einteilige Aluminiumlegierungskolben einfacher Konstruktion für einen mittleren effektiven Nettodruck von  $16 \text{ kg/cm}^2$  ohne weiteres verwenden.

Beim Vergleich zwischen den Abb.21 und 22 können wir darauf hinweisen, daß bei allen mechanischen Belastungen oder Wärmebelastungen, aber außerdem auch im Falle einer Steigerung dieser Belastungen die Stelle, in welcher zuerst die Ermüdungsgrenze erreicht wird, die obere Kolbenkopffläche, und nicht die Kolbenbolzennabe ist. Wirksame Mittel, um diese Probleme zu lösen, sind eine Steigerung

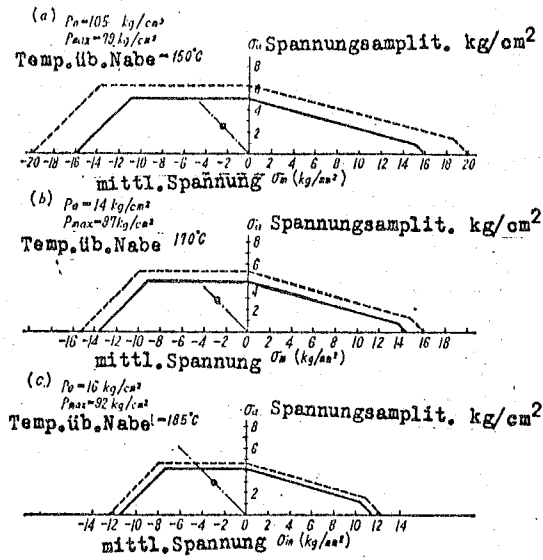


Abb. 22 Die Spannungen über der Kolbenbolzennabenschulter und die Ermüdungsgrenze beim verstärkten Kolben

der Festigkeit durch Kühlung bzw. Wärmedämmung, sowie eine Verbesserung der Hochtemperaturfestigkeit der Kolbenkopflattenoberfläche.

Man kann durchaus verstehen, daß die Belastungsbereiche, in denen man die einfachen einteiligen Aluminiumlegierungskolben dank einer geeigneten Formgebung verwenden kann, ganz und gar nicht niedrig sind.

#### 6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit haben wir im Hinblick auf die Planung eines Kolbens darzulegen versucht, in welcher Weise die mechanischen Belastungen und die Wärmebelastungen in die Planung des Kolbens eingeführt werden sollen, und wie man sich die Festigkeit des Kolbens bei hohen Temperaturen zu denken hat. Auch bei den Kolben ganz einfacher Form sind hinsichtlich der Form tiefgreifende Überlegungen notwendig, und wenn man richtig konstruiert, dann kann man erreichen, daß der Kolben sehr hohen Belastungen gewachsen ist.

Die Verfasser sind glücklich, wenn es ihnen gelungen ist, aufzuzeigen, welche Punkte berücksichtigt werden müssen, um zu einer sicheren Planung zu kommen und in welcher Weise eine zukünftige Forschung auf diesem Gebiet vorwärts getrieben werden muß.

Literaturhinweise

- 1) W.D.Bensinger u.A.Meier: Konstruktionsbücher 6, 1961,  
10, Springer-Verlag.
- 2) Suwa u.a.: Schnellberichte der Eisenbahntechn.Forschungs-  
anstalt, 64-65 (März 1964).
- 3) W.Pflaum: Sonderabdruck aus Jahrbuch d.Schiffbautechn.  
Gesellschaft, 54, Bd. 1960.
- 4) Maeda u.a.: Kawasaki-Techn.Berichte, Bd.24, Heft Nr.1,  
1964, S.74-85.
- 5) Ito u.a.: Zeitschrift d.Jap.Ges.für Mechanik, Bd.67,  
Heft Nr.544 (Mai 1964), S.738.
- 6) D.Fitzgeorge: Paper at the meeting of "The North-East  
Coast Inst.of Engl. & Shipbuilders", 11,  
2, 1955.
- 7) Fukai u.a.: Sumitomo-Leichtmetall-Techn.Berichte, Heft  
Nr.10, 1963, S.273.