

ohne Genehmigung  
gestattet  
kopieren nur durch  
Übersetzer

Gustav Kraut  
armbronn  
Im Gäble 16

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift

"Nainen Kikan" (Die Brennkraftmaschine)

Band 6, Heft Nr.65, November 1967, Seite 11 - 18

Eine Spannungsanalyse des Kolbenkopfes auf  
photoelastischem Wege

von K.Iwamoto  
und M.Ashita

Firma Mitsui Schiffbau K.K.

Die Steigerung der Leistung, wie sie im Laufe der vergangenen Jahre im Motorenbau immer weiter vorwärts getrieben wurde, hat die Notwendigkeit mit sich gebracht, auch den Kolbenkopf noch rationeller zu konstruieren und deshalb ist es heute unerlässlich, daß man sich eine möglichst genaue Kenntnis von den durch den Gasdruck und durch die Verbrennungswärme im Kolbenkopf erzeugten Spannungen, sowie von dem Einfluß der Form des Kolbenkopfes auf die Entstehung dieser Spannungen verschafft.

In der vorliegenden Arbeit soll nun über die Ergebnisse berichtet werden, die wir unter Anwendung des Verfahrens der photoelastischen Spannungsanalyse bei den von uns durchgeführten Untersuchungen dieses Problemes erhalten haben.

Wir haben durch Kombination eines Zylinders und einer kreisrunden Platte den Kolbenkopf als vereinfachtes Modell ausgebildet und die Wirkung der inneren Ausrundungen und Hohlkehlen, sowie für eine Reihe praktischer Kolbenmodelle mit verschiedenen Innenformen den durch diese Formen bedingten Unterschied in der Spannungsverteilung untersucht.

Die Analyse der vom Gasdruck herrührenden Spannungen haben wir mit Hilfe der Spannungseinfrieremethode, und die Analyse der Wärmespannungen durch zweidimensionale Versuche und mit Hilfe des auf der PQ-Sandwich-Methode beruhenden photoelastischen Verfahrens durchgeführt.

Als Ergebnis dieser Spannungsanalyse konnte das Ausmaß der von der Größe des Hohlkehleradius abhängigen Spannungskonzentration und der Festigkeit der Stirnseite des Kolbens, sowie die von den Unterschieden der Form der Kolben in den praktisch laufenden

Stuttgart

Autosammelstelle

Maschinen abhängigen Spannungsverteilung geklärt werden und es konnten durch hypothetische Schlußfolgerung die Werte des Spannungsniveaus des Kolbens in dem praktisch laufenden Motor angegeben werden.

## 1. Vorwort

Die maßgebenden dynamischen Faktoren für die Verteilung der Festigkeit im Kolbenkopf werden durch den Gasdruck, durch die Wärmeausdehnung, durch das Temperaturgefälle und durch die Schwankungen dieser Faktoren mit der Zeit und außerdem durch die Form des Kolbenkopfes selbst dargestellt. Die vom Gasdruck herrührenden Spannungen müssen natürlich während der gesamten Lebenszeit des Kolbens  $10^7$  mal und noch öfter wiederholt werden, andererseits sind es die von der Verbrennungswärme herrührenden Spannungen, welche wegen der häufigen Anlaufens und wieder Stillstehens des Motors, wegen der Drehzahländerungen usw. dauernd schwanken und so immer wieder aufs neue auftreten; deshalb muß zweifellos beim Entwurf einer Kolbenform den unter solchen fortwährend schwankenden Belastungen möglichen Ermüdungsbrüchen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Um das im Kolbenkopf entstehende Spannungsniveau kennenzulernen, hat man zwar außer den Messungen am praktisch laufenden Motor<sup>1)</sup> schon verschiedentlich analytische Lösungen versucht, so ein Ähnlichkeitslösungsverfahren<sup>2)</sup> und ein Matrixverfahren; da für diese Verfahren jedoch verhältnismäßig komplizierte Operationen notwendig sind, findet man in der Literatur bis heute noch keine Berichte über erfolgreiche systematische Forschungsarbeiten in dieser Richtung.

Diese Versuche geben in technischer Hinsicht einige Probleme zu lösen, um jedoch die Probleme im Laboratorium zu untersuchen, hat man versucht, sich der photoelastischen Analyse zu bedienen, und hierüber soll hier berichtet werden. Auch dann, wenn wir, um es mit einem Wort auszudrücken ganz einfach vom Formeffekt sprechen, dann denken wir dabei doch immer an all die einzelnen Formfaktoren, welche für das Spannungsniveau maßgebend sind, nämlich an die Gestaltfestigkeit der gesamten Form, der Kolbenkopfplatte, des Endteiles und der Seitenwände, an die Art und Weise, wie die Belastung aufgenommen wird, an den Querschnittskoeffizienten in der Nähe der Spannungskonzentrationsteile und seinen Ausgleich (balance), an die Diskontinuität der Spannungskonzentrationsteile (Radius, Winkel) usw. Nach dem heutigen Stand der Forschung ist man noch nicht soweit gekommen, daß man alle diese Faktoren insgesamt erfaßt hat, in der vorliegenden Arbeit soll deshalb über eine Analyse berichtet werden, welche sich die Wirkung der Hohlkehlformen im Innern des Kolbens zum Gegenstand gemacht hat und es sollen die verschiedenen in den praktisch laufenden Motoren gegebenen Formen der Kolben im Hinblick auf den in ihnen herrschenden Spannungszustand diskutiert werden.

Die Analyse der vom Gasdruck herrührenden Spannungen haben wir mit Hilfe des sogenannten Spannungseinfrierverfahrens durchgeführt, während wir andererseits die Wärmespannungen durch Versuche am zweidimensionalen Modell, sowie mit Hilfe des sogenannten PQ-Sandwich-Verfahrens durch dreidimensionale photoelastische Erhitzungsversuche untersucht haben.

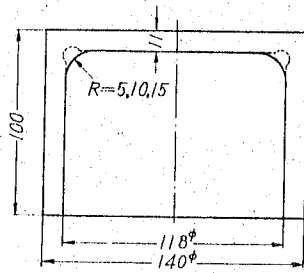


Abb. 1 Das vereinfachte Modell

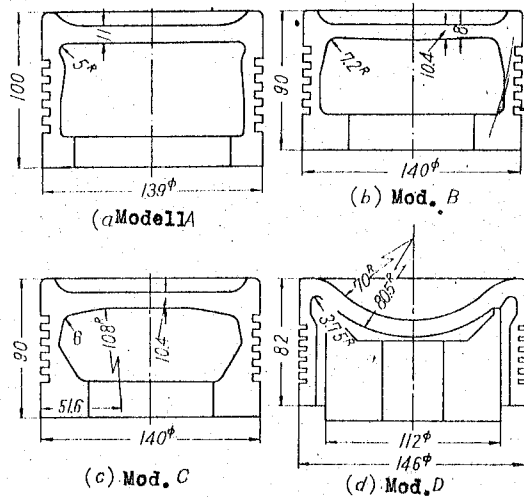


Abb. 2 Die Modelle der im praktischen Motor laufenden Kolben

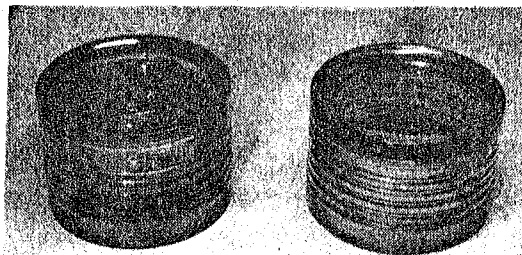


Abb. 3 Die äußere Ansicht der Modelle der im praktischen Motor laufenden Kolben

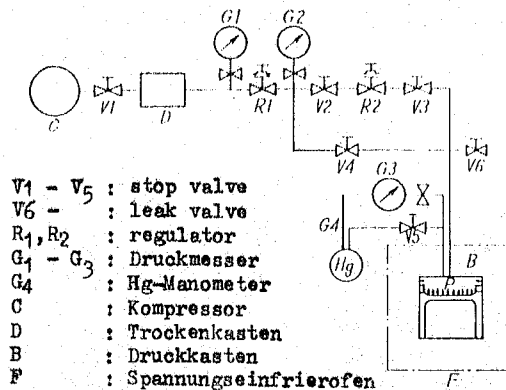


Abb. 4 Schematische Darstellung der Einrichtung zum Einfrieren der vom Gasdruck herrührenden Spannungen

## 2. Die vom Gasdruck herrührenden Spannungen

### 2.1 Die Versuchsmodelle und die Versuchsmethodik

Mit dem Ziel, den Einfluß der Hohlkehlformen der Innenflächen des Kolbenkopfes zu klären, haben wir uns der Einfachheit halber den Kolbenkopf als Kombination einer einfachen kreisrunden Platte und eines Kreiszylinders gedacht; den Hohlkehlradius an der Verbindungsstelle der kreisrunden Platte und des Kreiszylinders haben wir geändert und so für eine große Anzahl verschiedener Hohlkehlformen die sogenannten Spannungseinfrierversuche durchgeführt. Die Modelle für unsere Versuche haben wir, wie dies in der Abb.1 dargestellt ist, in verschiedenen Formen und Abmessungen aus einem Epoxyharzblock herausgeschnitten. Als Hohlkehlradien haben wir 5 mm, 10 mm und 15 mm genommen und außerdem haben wir noch die Modelle mit 5 mm Hohlkehlradius, wie dies in der Abbildung durch eine gestrichelte Linie angedeutet ist, hinterschnitten (under cut). Weiterhin haben wir Photoelastikmodelle hergestellt, die zwar stellenweise verschieden, im wesentlichen jedoch den Formen der in praktisch laufenden Motoren vorhandenen verschiedenen Kolben verhältnismäßig ähnlich waren und wir haben mit diesen Modellen die gleichen Versuche durchgeführt. Die Form und die Abmessungen dieser Kolben sind in der Abb.2 dargestellt: Der Kolben A ist nach der Seitenwand hin hinterschnitten (under cut).

Der Kolben B hat eine Hohlkehlkopfplatte mit reduzierter, seitlicher Wandstärke.

Der Kolben C weist eine Versteifung des Endteiles auf und eine Absenkung des Hohlkehlteiles.

Der Kolben D besitzt eine kugelförmige Kopfteilplatte, die Lastaufnahmeteile sind hier auf die Innenseite verlegt.

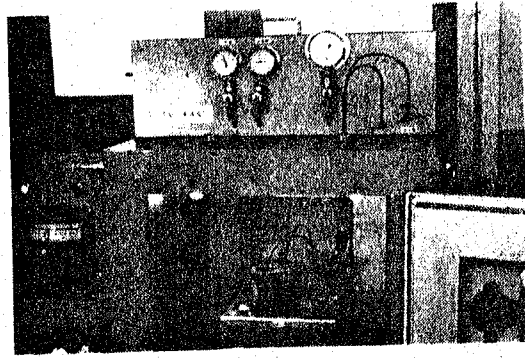
Die Abb.3 zeigt die äußere Ansicht der Modelle.

Auf die obere Fläche der Kopfplatten der in einem Elektro-  
ofen auf  $125-135^{\circ}\text{C}$  erhitzten Modelle haben wir in einer  
eigens für diese Zwecke hergestellten Druckeinrichtung eine  
gleichmäßigen Druck ausgeübt und die dadurch hervorgerufe-  
nen Spannungen, so wie sie waren, in unverändertem Zustand  
bis auf Zimmertemperatur langsam abgekühlt und so einge-  
frozen; in der Hauptspannungsfläche in der Mitte des Model-  
les haben wir 3-5 mm starke Platten in axialer Richtung  
herausgeschnitten und diese in ein kreispolarisiertes Licht  
feld gebracht und dann das Streifenmuster gemessen und  
photographisch aufgenommen. Den Gasdruck haben wir durch-  
weg mit  $0,15 \text{ kg/cm}^2$  genommen. Bei den vereinfachten Modelle  
haben wir den Druck ausschließlich auf die obere Fläche der  
Kolbenkopfplatte ausgeübt, während wir bei den Modellen der  
praktischen Kolben den Druck in Annäherung an den Zustand  
eines praktisch laufenden Motors auch auf die Seitenwand  
bis zu der ersten Kolbenringnute ausgeübt haben.

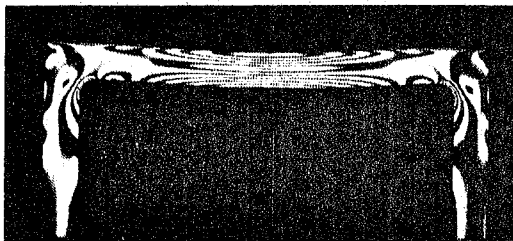
Die Abb.4 zeigt die bei unseren Versuchen verwendete Ein-  
richtung zum Einfrieren der vom Gasdruck herrührenden Span-  
nungen in schematischer Darstellung, während die Abb.5 die  
äußere Ansicht dieser Einrichtung zeigt. Der Bereich der  
angewandten Drücke erstreckte sich von  $0,1 \text{ kg/cm}^2$  bis  
 $3 \text{ kg/cm}^2$ , für die Messung der Drücke bis  $1 \text{ kg/cm}^2$  verwen-  
den wir eine Quecksilbersäule.

## 2.2 Die Versuchsergebnisse, ihre Analyse und ihre Beurteilung

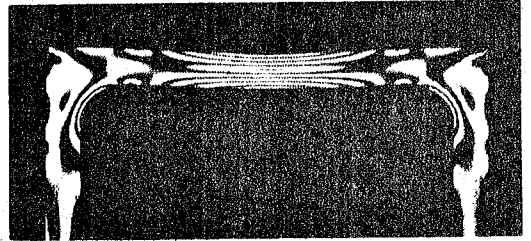
Die Abb.6 zeigt photographische Aufnahmen des Querschnittes  
der Hauptdruckfläche in vereinfachten Kolbenmodellen, die



**Abb. 5** Äußere Ansicht der Einrichtung zum Einfrieren der vom Gasdruck herrührenden Spannungen

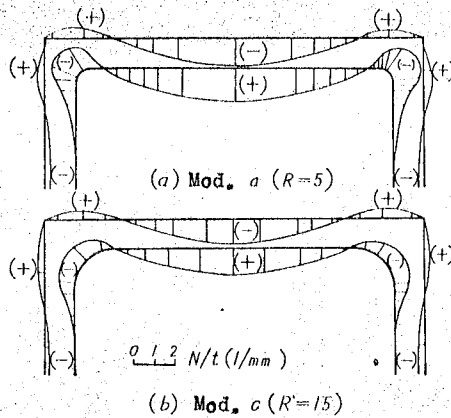


(a) Mod. a (R=5)

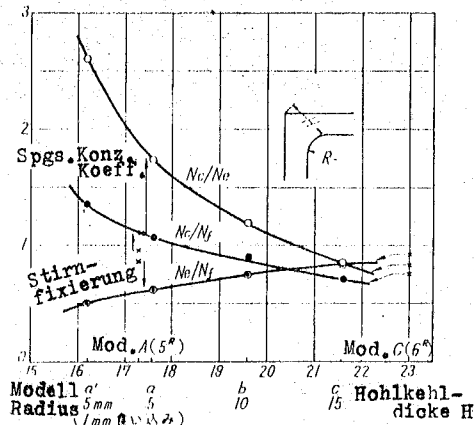


(b) Mod. c (R=15)

**Abb. 6** Die vom Gasdruck herrührende Hauptspannungsdifferenzverteilung (vereinfachtes Modell,  $p = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ )



**Abb. 7** Die vom Gasdruck herrührende periphere Spannungsverteilung in der Hauptspannungsebene (vereinfachtes Modell,  $p = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ ).



**Abb. 8** Die Änderungen der maximalen vom Gasdruck herrührenden Spannungen im Hohlkehlteil in Abhängigkeit von der Form der Hohlkehle

hieraus gefundenen peripheren Spannungsverteilungen sind in der Abb.7 dargestellt.

Hieraus sehen wir, daß die Spannungsverteilung in der Kolbenkopfplatte eine ganz ähnliche Form besitzt, wie die radial gerichtete Biegespannungsverteilung, welche von einer auf eine an ihrem Umfang fest eingespannte kreisrunde Platte wirkenden gleichmäßig verteilten Last herrührt. Die größte Spannungskonzentration haben wir durchweg an den Hohlkehlteilen der Innenfläche, an den etwas mehr als  $45^\circ$  (zur Achsrichtung) von der Seitenwand entfernten Stelle. Wie man vom Belastungszustand her schließen kann, erzeugt die Biegeverformung, welche die Kolbenkopfplatte durch den Gasdruck erfährt, ein Biegemoment in den Endteilen, da die Seitenwandteile gebunden sind, dadurch werden in den diskontinuierlichen Teilen der Hohlkehlen Spannungskonzentrationen erzeugt.

In der Abb.8 haben wir die Abhängigkeit der Spannungen am Stirnteil des Kolbens und der konzentrierten Spannungen vom Radius der Hohlkehlen dargestellt. Als Abszissenachse haben wir die Hohlkehldicke  $H$  verwendet.

Wir haben also die Biegespannung der Mitte der Kolbenkopfplatte  $N_m/t$ , die Stelle, an welcher die Biegespannung gleich null wird (Entfernung  $D_0$  vom Nullpunkt), sowie die maximale Spannung in der Hohlkehle  $N_c/t$  bestimmt, und ausgehend von diesen Werten haben wir die Spannung im Endteil (im Stirnteil?)  $N_e/t$ , den Grad der Fixierung des Endteiles (Stirnteiles?)  $N_e/N_f$ , sowie die Spannungskonzentrationskoeffizienten  $N_c/N_e$  und  $N_c/N_f$  berechnet. Hierbei haben wir für die Spannungen im Endteil (Stirnteil?) die Kolbenkopfplatte als



kreisrunde Platte von gleichmäßiger Dicke angenommen und wir haben die Biegespannung der Kolbenkopfmittle, sowie ausgehend von der Nullpunktsentfernung die Biegespannung an der dem Modellinnendurchmesser D entsprechenden Stelle, indem wir die Spannungsverteilung als zweidimensionale Kurve annahmen, bestimmt:

$$\frac{N_e}{t} = \frac{N_m}{t} \left\{ \left( \frac{D}{D_0} \right)^2 - 1 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

Der Grad der Fixierung (der festen Einspannung?) des Endteiles wird, wenn wir annehmen, daß in dem Innendurchmesser D der äußere Umfang fixiert ist, durch das Verhältnis  $N_e/N_f$  der Endteilspannung zu der im Endteil entstehenden Biegespannung (die Spannung  $N_f/t$  bei fixiertem Endteil) ausgedrückt.  $N_f/t$  wird aus experimentell erhaltenen Werten durch nachstehende Gleichung gefunden:

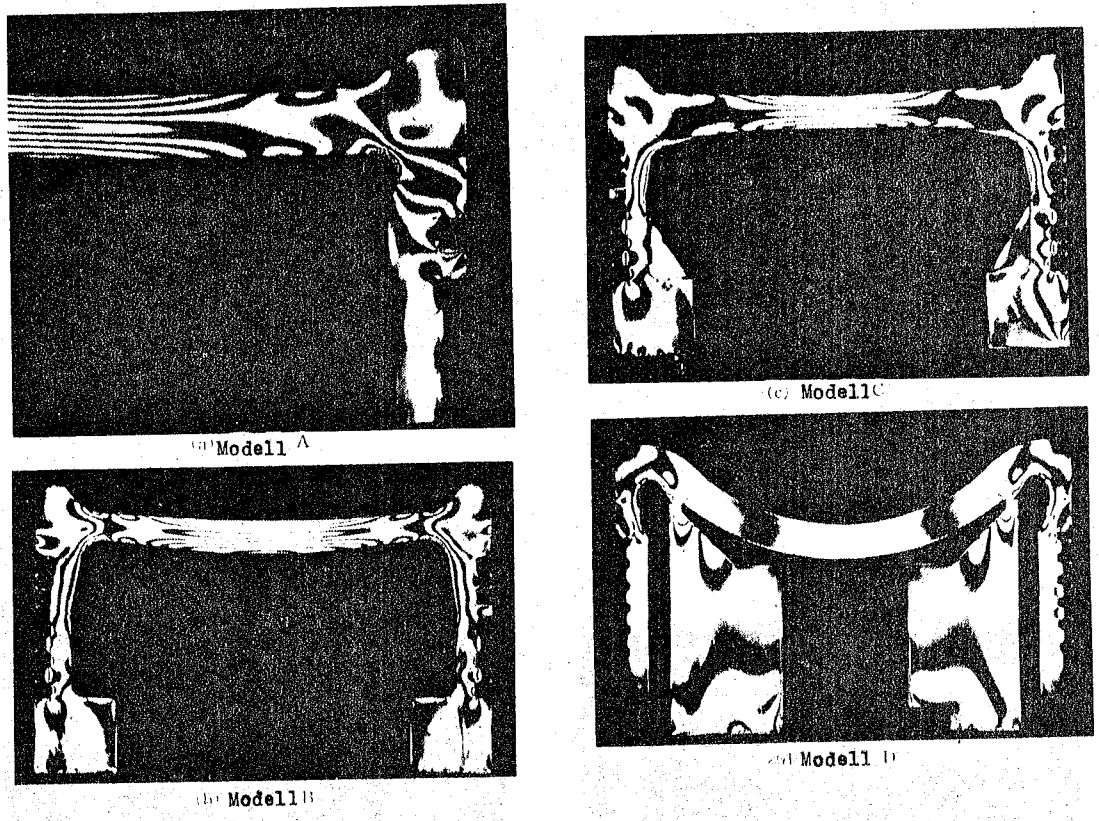
$$\frac{N_f}{t} = \frac{4}{7} \left( \frac{N_e}{t} + \frac{N_m}{t} \right) \dots \dots \dots (2)$$

hierin ist m die Poisson'sche Zahl  $m = 2$ ,  
wir erhalten also

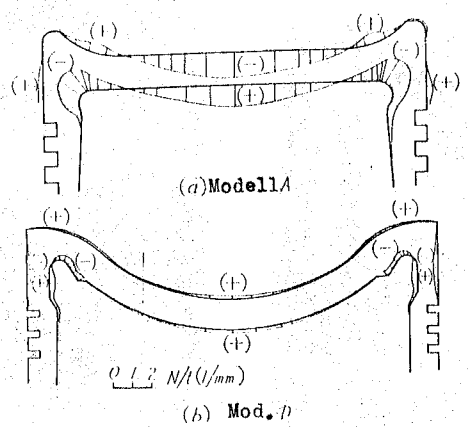
$$\frac{N_e}{N_f} = \frac{(D/D_0)^2 - 1}{7 (D/D_0)^2} \dots \dots \dots (3)$$

Der Spannungskonzentrationskoeffizient wird durch das Verhältnis  $N_c/N_e$  der maximalen Spannung in der Hohlkehle  $N_c/t$  zu der Endteilspannung  $N_e/t$ , sowie durch das Verhältnis  $N_c/N_f$  der maximalen Spannung in der Hohlkehle  $N_c/t$  zu der Spannung bei fixiertem Endteil  $N_f/t$  ausgedrückt.

Der Spannungskonzentrationskoeffizient nimmt mit zunehmender Hohlkehlteildicke monoton ab, während der Endteilfixierungsgrad monoton zunimmt. Wenn der Hohlkehlteil hinter-schnitten (under cut) ist, wirkt sich auch dann, wenn wir den gleichen Hohlkehlradius haben, die Abnahme des Querschnittsflächenkoeffizienten aus. Somit bewirkt zwar die Abnahme der Dicke des Hohlkehlteiles eine Abnahme der Spannung im Endteil, die von der Zunahme der Diskontinuität



**Abb. 9** Die vom Gasdruck herrührende Hauptspannungsdifferenzverteilung (Modelle der Kolben praktisch laufender Motoren,  $p = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ )



**Abb. 10** Die vom Gasdruck herrührende periphere Spannungsverteilung in der Hauptspannungsebene (Modelle von Kolben praktisch laufender Motoren,  $p = 0.15 \text{ kg/cm}^2$ )

bzw. von der Abnahme des Querschnittsflächenkoeffizienten herrührende Zunahme der Spannungskonzentration jedoch wird außerordentlich groß und die konzentrierten Spannungen werden höher.

Wir haben sodann für unsere Versuchsmodelle die gleiche Analyse durchgeführt. Die Abb.9 zeigt die photographische Aufnahme der Streifenmuster, während die Abb.10 Beispiele der aus diesen photographischen Aufnahmen gefundenen peripheren Spannungsverteilung zeigt.

Das Verfahren der Abstützung gegenüber dem Gasdruck, die Form als Ganzes und die von der Form der Hohlkehle herrührenden Unterschiede in der Spannungsverteilung sind aus den Abbildungen 9 und 10 deutlich zu erkennen; durch die tragende Form des Inneren des Kolbenkopfes wird das gesamte Spannungsniveau des Kolbenkopfes ganz wesentlich verringert, die an der Innenfläche der Seitenwände des Kolbens konzentrierten Spannungen sind kennzeichnenderweise Zugspannungen. Bei den Kolben mit ebener Kolbenkopfplatte haben wir eine große Ähnlichkeit mit unserem vereinfachten Modell und wir haben eine Spannungsverteilung, welche den Biegespannungen einer gleich verteilte Lasten aufnehmenden, an ihrem äußeren Umfangsrand fixierten kreisrunden Platte nahe kommt, wenn die Kolbenkopfplatte die Form einer Kugelfläche hat, dann sind die in der Kolbenkopfplatte entstehenden Biegespannungen äußerst klein, und wir können den Schluß ziehen, daß wir hier einen Spannungszustand haben, welcher den Zugkräften einer inneren Druck aufnehmenden Kugelhaut ähnlich ist. Die Stelle der Spannungskonzentration im Hohlkehlradiusteil liegt bei dem Modell B, welches auf der Seite der Kopfplatte dünn ist, mehr in der Kopfplatte, während

sie bei dem Modell C, welches auf der Seite der Seitenwand dünner ist, mehr in der Seitenwand liegt, es hat den Anschein, daß sich hier in der Hauptsache der jeweilige Querschnittsflächenkoeffizient auswirkt. Die konzentrierten Spannungen sind offenbar bei dem Modell A, welches einen kleinen Hohlkehlradius und einen kleinen Hohlkehlwinkel besitzt, etwas größer.

Bei den Modellen A und C, deren Kopfplatten verhältnismäßig eben sind, haben wir im wesentlichen die gleichen Verhältnisse, wie bei unserem vereinfachten Modell, und wir haben deshalb für die Bestimmung des Spannungskonzentrationskoeffizienten und des Grades der Endteillfixierung (Stirnteillfixierung?) die Abb. 8 herangezogen (durch X gekennzeichnet).

Bei den Modellen der Kolben praktisch laufender Motoren wirkt sich der Hohlkehlradius nicht allzu sehr auf die Endteilsteilsteifigkeit (Stirnteilsteilsteifigkeit?) aus und da der am äußeren Umfang vorstehende Teil die Steifigkeit des Endteiles erhöht, so können wir hier einen ganz erheblichen Unterschied gegenüber unserem vereinfachten Modell beobachten. Man merkt deutlich, daß durchweg der Grad der Endteillfixierung (Stirnteillfixierung?) außerordentlich hoch ist.

Der Wert der vom Gasdruck herrührenden praktisch angreifenden Spannungen bei einem Kolben im praktisch laufenden Motor kann durch Schlußfolgerung aus den Ergebnissen unserer Versuche ermittelt werden: Die Gleichung für die Beziehung zwischen den Spannungen am Modell und der praktisch angreifenden Spannung ist durch die nachstehende Gleichung gegeben:

$$\sigma_q = \frac{N}{at} \cdot \frac{p_m}{p} \dots \dots \dots (4)$$

Hierin sind

- N: die Ordnungszahl der Streifenmuster
- t: die Dicke der abgeschnittenen Scheiben (mm)
- $\alpha$ : die photoelastische Empfindlichkeit (mm/kg)
- $p_\alpha$ : die praktisch angreifende Spannung (kg/cm<sup>2</sup>)
- p: die Modellspannung (kg/cm<sup>2</sup>).

So wird beispielsweise beim Modell A eine maximale Konzentrationsspannung von  $\sigma_g = -17.0 \text{ kg/mm}^2$  erzeugt.

Wenn wir andererseits die Berechnung für die Endteilspannung (Stirnteilspannung?) einer eine gleichmäßig verteilte Last aufnehmenden, an ihrem äußeren Umfang fixierten kreisrunden Platte durchführen und diese Spannung unter Benützung des Verhältnisses  $N_c/N_f$  der Abb.8 bestimmen, erhalten wir die nachstehende Gleichung:

$$\sigma_g = \sigma_{ra} \cdot N_c/N_f = -\frac{3\beta \left(\frac{D}{2}\right)^2}{4d^2} \cdot \frac{N_c}{N_f} \dots (5)$$

Wenn wir d als Dicke der Kopfplatte nehmen, bekommen wir  $\sigma_g = -15.7 \text{ kg/mm}^2$ .

### 3. Die von der Verbrennungswärme herrührenden Spannungen

#### 3.1 Die Versuchsmodelle und die Versuchsmethodik

In der gleichen Weise wie bei den Gasdruckversuchen haben wir zunächst den Kolbenkopf durch die Kombination einer kreisrunden Platte und eines Kreiszyllinders ersetzt, und für eine Reihe von Modellen mit jeweils verschiedenem Hohlkehlradius haben wir die Untersuchung der Thermophotoelastizität durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen haben wir sowohl zweidimensionale Entsprechungsversuche (Äquivalenzversuche?), wie auch dreidimensionale Versuche in Angriff genommen. Die Form und die Abmessungen des für die zweidimensionalen Versuche verwendeten Modelles waren, wie wir an der Querschnittsfläche der Abb.1 sehen können, genau die-

selben wie im Falle des Gasdruckversuchsmodelles; beim dreidimensionalen Versuchsmodell ist diese Sache ganz ähnlich. Dabei hat man, wie dies die Abb.11 zeigt, die der Analyse zu unterwerfende Querschnittsfläche zwischen Polarisationslichtplatten P und Viertelwellenlängenplatten Q eingesetzt. Weiterhin hat man mit zweidimensionalen Modelle und dreidimensionalen Modellen, deren Form eine verhältnismäßig große Ähnlichkeit mit der Form eines im praktischen Motor laufenden Kolbens hatten, Versuche durchgeführt. Die Abb.12 zeigt die Form und die Abmessungen dreidimensionaler Modelle. Beim Befestigen eines Beutels für eine Kältemischung hat man die am äußeren Umfang vorstehenden Teile weggenommen und die obere Fläche des Kolbens eben gemacht.

Bei unseren zweidimensionalen Versuchen haben wir das Modell in ein Feld kreispolarisierten Lichtes gebracht und den der oberen Fläche der Kolbenkopfplatte entsprechenden Teil mit flüssigem Stickstoff ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) gleichmäßig abgekühlt.

Als Verfahren der Analyse der dreidimensionalen Wärmespannungen mit Hilfe der Photoelastizität (dreidimensionales Thermophotoelastikverfahren) hat man das Verfahren mit zerstreutem Licht, sowie das bei unseren Versuchen benützte PQ-Sandwich-Verfahren angewandt. In der Zukunft ist zwar auch die Anwendung des mit zerstreutem Licht arbeitenden Verfahrens zu erwarten, nach dem heutigen Stand der Versuchstechnik jedoch ist für eine Spannungsanalyse des mittleren Querschnittes des Kolbenkopfes das PQ-Sandwich-Verfahren eine sich auf verhältnismäßig leichte Weise anbietende Möglichkeit, von der man deshalb auch Gebrauch gemacht hat.

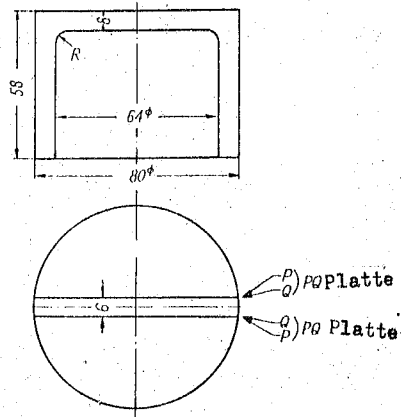


Abb. 11 Dreidimensionales, thermophotoelastisches Versuchsmodell (vereinfachtes Modell)

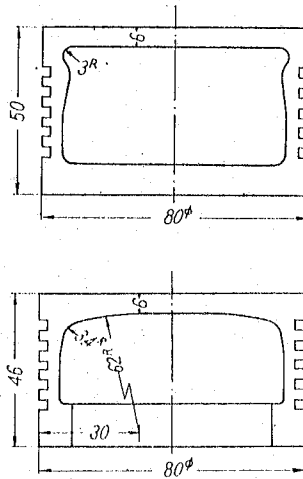


Abb. 12 Dreidimensionales, thermophotoelastisches Versuchsmodell (Modell eines im praktischen Motor laufenden Kolbens)

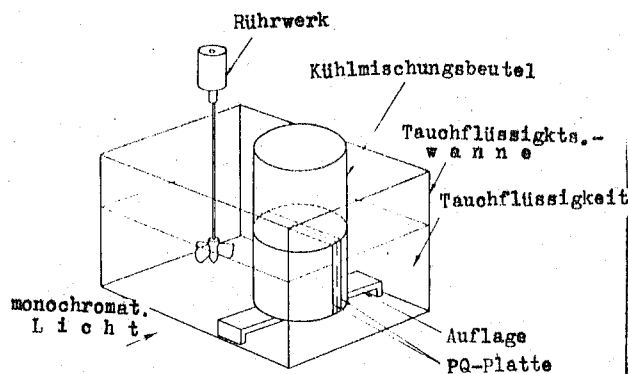


Abb. 13 Aufbau eines dreidimensionalen thermophotoelastischen Versuches

Dieses PQ-Sandwich-Verfahren besteht darin, daß man auf beiden Seiten einer die zu analysierende Querschnittsfläche enthaltenden, 3-10 mm dicken Photoelastikprobenscheibe eine Polarisationsplatte und eine Viertelwellenlängenplatte einsetzt und so das optische System eines kreispolarisierten Lichtfeldes bildet; den so vorbereiteten Kolben nimmt man dann als Versuchsmodell.

Bei einem im wirklichen Motor arbeitenden Kolben wird die Kolbenkopfplatte erhitzt, bei einer auf dieser Erhitzung beruhenden Versuchsmethodik jedoch kann man die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen, der Natur des für das Modell verwendeten Materiales entsprechend, nicht über  $50^{\circ}\text{C}$  hinaus nehmen, was natürlich für eine Analyse höchst unbefriedigend ist; man hat deshalb angenommen, daß die Temperaturverteilung gerade umgekehrt ist wie im Falle der Erwärmung und hat deshalb ein Verfahren angewandt, bei welchem die obere Fläche der Kolbenkopfplatte durch Äthanol + Trockeneispulver ( $-78^{\circ}\text{C}$ ) gekühlt wird.

Wie die Abb.13 zeigt, haben wir das Modell in eine Flüssigkeit gebracht, die den gleichen Brechungsindex besitzt wie das Epoxyharz. Während der Versuche haben wir sowohl die Eintauchflüssigkeit (Tränkungsflüssigkeit?), wie auch die Kühlmischung tüchtig umgerührt. Wir haben es außerdem so eingerichtet, daß die Kühlmischung dauernd auf einer konstanten Temperatur gehalten wurde.

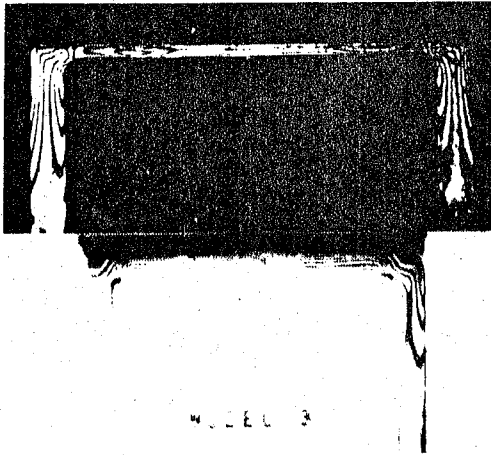
Nachdem die Kühlmischung eingegeben war, machten wir ungefähr 5 Minuten hindurch alle paar Sekunden (alle 5-6 Sekunden) eine photographische Aufnahme und verfolgten auf diese Weise die Änderung der Spannungsverteilung.



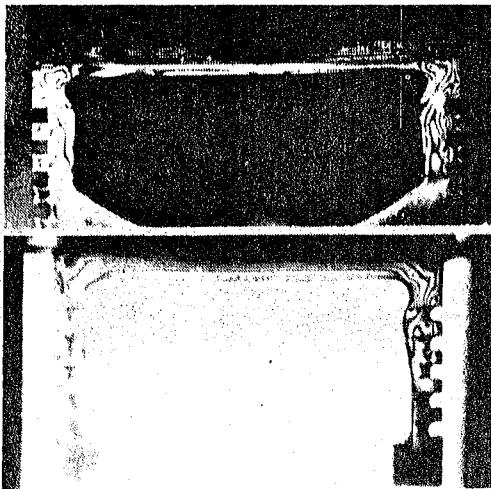
### 3.2 Die Versuchsergebnisse, ihre Analyse und ihre Beurteilung

In der Abb.14 haben wir Beispiele der Spannungsverteilung ungefähr 1 Minute nach dem Beginn der Kühlung durch Streifenmuster aufnehmen dargestellt. Wenn wir die Spannungsverteilung bei einem zweidimensionalen Modell mit derjenigen eines dreidimensionalen Modelles vergleichen, dann stellen wir fest, daß nach Ablauf einer Zeit in der angegebenen Größenordnung die Form der Spannungsverteilung ganz ähnlich ist. Die größten konzentrierten Spannungen sind durchweg in dem Hohlkehlradiusteil entstanden. Wenn wir die Änderung dieser konzentrierten Spannung mit der Zeit verfolgen, dann stellen wir fest, daß, wie dies die Abb.15 und 16 zeigen, bei den zweidimensionalen Versuchen die nach der Seite der Seitenwand hin konzentrierten Spannungen ungefähr 30 Sekunden nach dem Beginn der Kühlung abzufallen beginnen und dann im weiteren Verlauf der Zeit ganz schnell abnehmen, während bei den dreidimensionalen Versuchen ungefähr eine Minute nach dem Beginn der Kühlung eine ganz leichte Abnahme einsetzt und darnach die Abnahme nur ganz langsam weiter geht. Dieser Unterschied läßt sich wie folgt erklären: Bei den zweidimensionalen Versuchen kühlen die Verdampfungsgase des die Kühlmischung darstellenden flüssigen Stickstoffes den äußeren Umfang des Modelles, und die Temperaturdifferenz in der Richtung der Kopfplattendicke nimmt ab, während bei den dreidimensionalen Versuchen das Modell in eine Eintauchflüssigkeit (Tränkungsflüssigkeit?) von großem Volumen eingesetzt worden ist und sich deshalb leicht in einem stationären Zustand halten läßt.

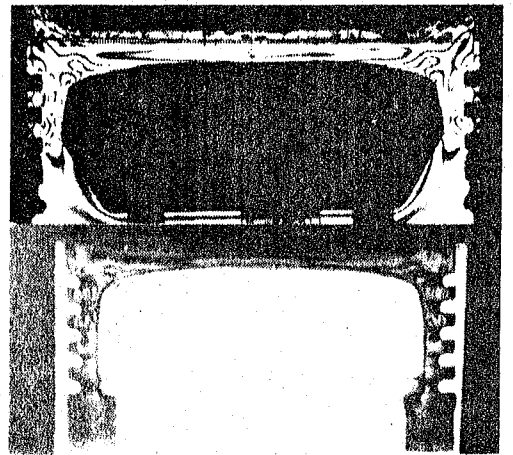
Die Änderung der Temperaturverteilung mit der Zeit in der



(a) vereinfachtes Modell

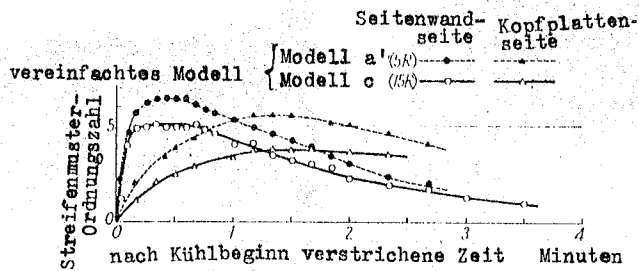


(b) prakt. Kolbenmodell A



(b) prakt. Kolbenmodell C

**Abb. 14** Die Spannungsverteilung bei Abkühlung der oberen Fläche der Kolbenkopfplatte (1 Minute nach Beginn der Kühlung)  
oben: zweidimensionaler Versuch  
unten: dreidimensionaler Versuch



**Abb. 15** Die Änderung der konzentrierten Spannungen in einem zweidimensionalen Modell mit der Zeit  
Kühlmittel: flüssiger Stickstoff

Richtung der Kopfplattenecke bei einem zweidimensionalen Modell ist aus der Abb.17 zu ersehen, wo wir für einen Balken (?) von 25 mm Breite und 6 mm Dicke praktische Messungen durchgeführt und aufgezeichnet haben. Wir haben dafür gesorgt, daß wir am äußeren Umfang die gleichen Bedingungen hatten, wie bei unseren zweidimensionalen Versuchen, und wir haben einen dünnen Kupferkonstantendraht eingebaut und mit diesem die Messungen durchgeführt. Die in der gleichen Abbildung gestrichelt eingezeichneten Kurven sind die theoretischen Werte, die man unter der Annahme einer halbunendlichen Platte erhalten hat.

Die Temperatur einer halbunendlichen Platte, für welche bei  $t > 0$  die Stirnflächentemperatur  $V_0$  konstant ist, wird mit bezug auf die Zeit  $t$  durch nachstehende Gleichung ausgedrückt<sup>3)</sup>:

$$v = \frac{1}{2} V_0 e^{-x\sqrt{v}/\kappa} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} - \sqrt{vt} \right] + \frac{1}{2} V_0 e^{x\sqrt{v}/\kappa} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + \sqrt{vt} \right] \dots (6)$$

hierin ist  $v = H\rho/c\rho\omega$ ,  $\kappa = \frac{K}{\rho c}$

- H: der Wärmeübertragungskoeffizient =  $6 \cdot 10^{-4} \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
- p: die Wärmeübertragungslänge = 2 cm
- c: die spezifische Wärme =  $0.27 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$
- $\rho$ : die Dichte =  $1.24 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$
- $\omega$ : die Querschnittsfläche (Plattenlänge x Einheitsbreite) =  $0,6 \text{ cm}^2$
- K: der Grad der Wärmeübertragung =  $1.50 \times 10^{-3} \text{ kcal/cm} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
- $\kappa$ : der Wärmediffusionskoeffizient =  $4.5 \text{ cm}^2/\text{h}$
- $\gamma$ : 6.0

Aus der gleichen Abbildung können wir entnehmen, daß die Differenz zwischen der inneren Temperatur und der äußeren Temperatur mit der Zeit abnimmt, und daß je weiter eine Stelle von der gekühlten Fläche entfernt ist, der dort gemessene Wert umso stärker von dem berechneten Wert verschieden ist.

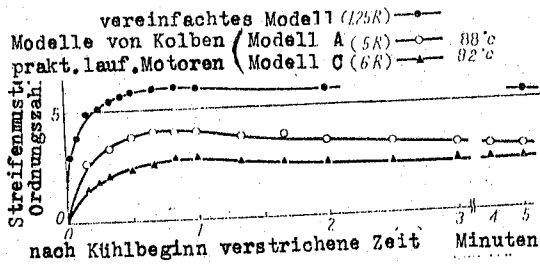


Abb.16 Die Änderung der maximalen konzentrierten Wärmespannungen in einem dreidimensionalen Modell mit der Zeit  
 Kühlmischung: Trockeneispulver + Äthanol

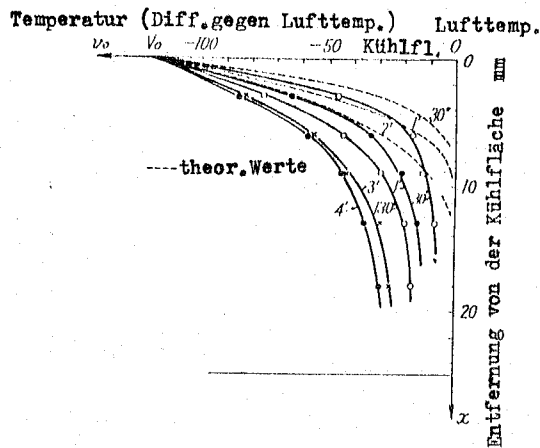


Abb.17 Die Änderung der Temperaturverteilung mit der Zeit (zweidimensional)  
 Kühlmittel: flüssiger Stickstoff

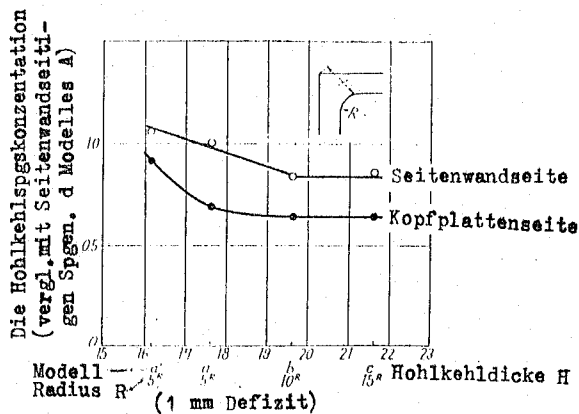


Abb.18 Die Änderung der im Hohlkehlteil konzentrierten Wärmespannungen in Abhängigkeit von der Form der Hohlkehle (zweidimensionale Versuche)

Die maximale Übergangsspannung der in der Hohlkehle konzentrierten Spannungen ist je nach der Form der Hohlkehle verschieden. Diese Verschiedenheit haben wir in der Abb.18 dargestellt.

Wir sehen aus dieser Abbildung, daß bei einem Radius, der über ein gewisses Maß hinausgeht, nahezu überhaupt keine Änderung mehr eintritt, und es wird angenommen, daß die von der Zunahme der Endteilsteifigkeit herrührende Zunahme des Endteilbiegemomentes einer durch die Zunahme des Radius bedingten Abnahme der Spannungskonzentration entgegenwirkt.

Wir haben versucht, die Spannungsverteilung in der Richtung der Kolbenkopflattendicke zu finden, unsere Ergebnisse haben wir in der Abb.19 dargestellt. Es sind dies die Ergebnisse der zweidimensionalen Versuche mit dem Modell A; wir haben die Spannungsverteilung in einem nicht eingespannten Balken berechnet und durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Über den von uns gemessenen Zeitablauf sind die Unterschiede zwischen den gemessenen Werten und den für den nicht eingespannten Balken berechneten Werten außerordentlich groß. Die Temperaturverteilung aufgrund der Berechnung ergibt, wie wir dies aus der Abb.20 ersehen können, eine lineare Verteilung von konstantem Gefälle:

$$\sigma_x = \sigma_{x_1} + \sigma_{x_2} + \sigma_{x_3} = -\beta ET + \frac{1}{2c} \int_{-c}^c \beta ET^2 dy + \frac{3y}{2c^3} \int_{-c}^c \beta ET y dy \quad \dots (7)$$

$\beta$ : linearer Ausdehnungskoeffizient

Wenn wir in der Gl.(7)  
 $T = T_c(y-d)/c-d \quad (d \leq y \leq c) \dots \dots \dots (8)$

setzen, dann erhalten wir

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x_1} &= -\beta ET_c \frac{y-d}{c-d} \quad (d \leq y \leq c) \\ \sigma_{x_2} &= \beta ET_c \frac{c-d}{4c} \\ \sigma_{x_3} &= \beta ET_c \frac{y(c-d)(2c+d)}{4c^3} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

Somit sind die Werte von  $\sigma_x$  an den Stellen  $y=c$ ,  $y=-c$  und  $y=d$ , an denen  $\sigma_x$  ein Maximum oder ein Minimum wird, für den Temperaturbereich, d.h. also für die Stelle  $d$  (?), durch folgende Gleichungen gegeben

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xc} &= -\frac{\beta ET_c}{4}(1+2\gamma+\gamma^2) \\ \sigma_{x-c} &= -\frac{\beta ET_c}{4}(1-\gamma^2) \\ \sigma_{xd} &= -\frac{\beta ET_c}{4}(-1-\gamma+\gamma^2+\gamma^3) \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

Hierin ist  $\gamma=d/c$ . Die Änderung der Biegespgg. in Abhängigkeit von  $d/c$  wird durch nachst. Gleichg. ausgedrückt:  
 $(\sigma_{x3})_{y=c} = -\frac{\beta ET_c}{4}(-2+\gamma+\gamma^2) \dots\dots(11)$

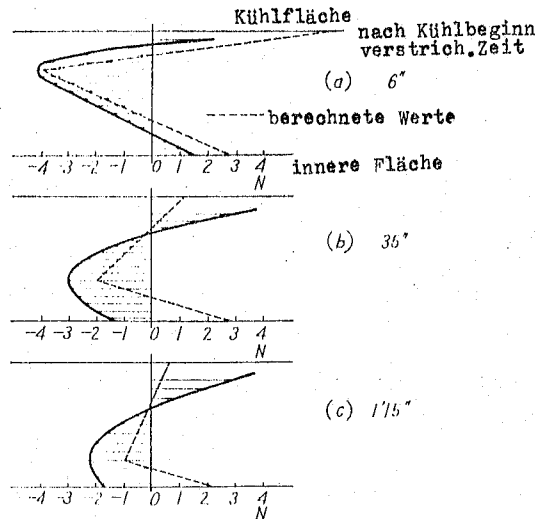
Wir haben also bei  $d = -c/2$  ein Maximum.

Die Unterschiede zwischen den praktisch gemessenen Werten und den berechneten Werten dürfte dadurch zu erklären sein, daß außer der Verschiebung von der Temperaturverteilungsgeraden weg der Einfluß der Zurückdrängung an beiden Enden sehr groß ist, daß praktisch das im Kolbenkopf erzeugte Biegemoment durch die Endteile zurückgedrängt wird und äußerst klein ist.

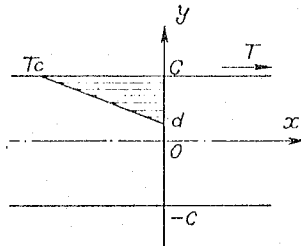
Um die Möglichkeit zu gewinnen, durch Schlußfolgerung auf das in dem Kolben eines praktisch laufenden Motors entstehende Wärmespannungsniveau zu schließen, dürfte es wohl verschiedene Beweisführungen geben, wenn man jedoch die hypothetische Annahme macht, daß die Spannungsverteilung im Kolben eines praktisch laufenden Motors ähnlich derjenigen in unseren Modellen ist, dann sind die Spannungen in einem Kolben eines praktisch laufenden Motors durch die nachstehende Gleichung gegeben:

$$\sigma_t = \frac{N}{at} \cdot \frac{\beta_a}{\beta} \cdot \frac{E_a}{E} \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta T} \dots\dots(12)$$

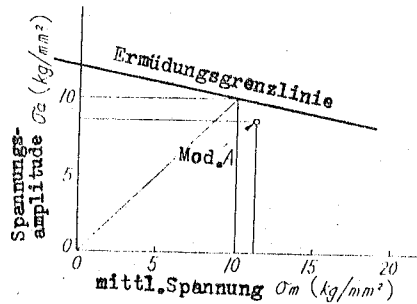
( $a$  ist eine Konstante, die sich auf den Kolben des prakt. Motors bezieht)



**Abb.19** Die Spannungsverteilung in der Richtung der Dicke in der mittleren Querschnittsfläche der Kolbenkopfplatte (Modell A, zweidimensional)



**Abb.20** Die Näherung der Temperaturverteilung



**Abb.21** Das Diagramm der Ermüdungsgrenze und das Spannungsniveau (Modell A)

Tafel 1

Die Unterschiede der thermischen Bedingungen beim Modell und beim Kolben des praktisch laufenden Motors

	Modell	prakt. Kolben
<b>M a t e r i a l</b>	Epoxy-Harz	Cr-Mo Gußstahl
Stirnfl. Temperatur	etwa const.	schwankt
Wärmeausdehnungs-Koeffizient $\alpha$ (Kcal/cm <sup>3</sup> ·h·°C)	$1.50 \times 10^{-6}$	0.4
Dichte: $\rho$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$1.24 \times 10^{-3}$	$7.85 \times 10^{-3}$
spez. Wärme C (Kcal/kg·°C)	0.27	0.11
Wärmediff. Zahl $\kappa$ (cm <sup>2</sup> /h)	4.5	460
Linear. Ausdehnungs-Koeffizient $\beta$ (1/°C)	$6.5 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
Elast. Modul E (kg/mm <sup>2</sup> )	$3 \times 10^3$	$2 \times 10^4$

Wenn wir beispielsweise aus der Abb.16 das Modell A herausgreifen, und wenn wir der Sicherheit halber die maximale Übergangsspannung von den konzentrierten Spannungen nehmen, dann erhalten wir  $\sigma_t = 19.7 \text{ kg/mm}^2$ , wobei wir die nachstehenden Zahlenwerte in unsere Berechnung eingesetzt haben

$$\left\{ \begin{array}{lll} N=4.0 & \alpha=0.95 \text{ mm/kg} & t=6.0 \text{ mm} \\ \beta_a=12 \times 10^{-6} \text{ l/}^\circ\text{C} & \beta=6.5 \times 10^{-5} \text{ l/}^\circ\text{C} & \\ E_a=2 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^2 & E=3 \times 10^2 \text{ kg/mm}^2 & \\ \Delta T_a=200^\circ\text{C} & \Delta T=88^\circ\text{C} & \end{array} \right.$$

Die Hauptunterschiede im Hinblick auf die thermischen Bedingungen beim Modell und beim Kolben des praktisch laufenden Motors sind in der Tafel 1 zusammengestellt.

Da also der Wärmediffusionskoeffizient ungefähr um das 100fache verschieden ist, so werden ganz einfach schon aufgrund der Verschiedenheit des Materiales die Erscheinungen im Modell rein zeitlich gegenüber denen im Kolben des praktisch laufenden Motors ganz wesentlich vergrößert werden.

Zum Schluß wollen wir noch aufgrund des hypothetisch vermuteten Spannungsniveaus die Festigkeit eines Kolbenkopfes beim praktisch laufenden Motor auf einfache Weise betrachten.

Es hat zwar den Anschein, daß es über den Mechanismus der Entstehung von Rissen im Kolbenkopf verschiedene theoretische Meinungen gibt, wir wollen jedoch hier der Einfachheit halber annehmen, daß sich ausschließlich die vom Gasdruck herrührenden Spannungen wiederholen, und daß die Wärmespannungen lediglich zu einer Erhöhung der mittleren Spannungen beitragen; wenn wir von dieser Annahme ausgehen, dann sind die mittleren Spannungen und die Spannungsamplitude durch nachstehende Gleichung gegeben:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_m = \sigma_t + \sigma_g / 2 \\ \sigma_a = \sigma_g / 2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (13)$$



Wenn wir der Sicherheit halber die maximale Konzentrations-  
spannung in Betracht ziehen, dann erhalten wir beispielswei-  
se im Falle des Modelles A die nachstehenden Werte:

$$\sigma_m = 11.2 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{und} \quad \sigma_a = 8.5 \text{ kg/mm}^2$$

Wenn wir andererseits als Materialfestigkeit die Hochtempe-  
raturdrehbiegedauerfestigkeit des Cr-Mo-Gußstahles zugrunde  
legen und von dieser ausgehend hypothetisch auf die Dauer-  
festigkeit des Kolbens im praktisch laufenden Motor schlie-  
ßen, dann ist die Doppelschwingfestigkeit (?) durch nach-  
stehende Gleichung gegeben:

$$\sigma_{wa} = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{S \cdot \beta} \sigma_{wb} \dots\dots\dots (14)$$

Hierin sind

- $\eta_1$ : ein Materialkoeffizient
- $\eta_2$ : ein die Auswirkung der Abmessungen zum Ausdruck bringender Koeffizient
- $\eta_3$ : ein die Auswirkung der Feinstbearbeitung zum Ausdruck bringender Koeffizient
- S : ein summarischer Sicherheitskoeffizient, bei welchem die Schwankungen der einzelnen Werte berücksichtigt sind
- $\beta$  : die Kerbzahl
- $\sigma_{wb}$ : die Drehbiegeermüdungsgrenze eines Normalprüfmusters

Aus den Ergebnissen der bei 300°C durchgeführten Hochtempe-  
raturdrehbiegedauerfestigkeitsprüfungen erhalten wir  $\sigma_{wb} =$   
21.7 kg/mm<sup>2</sup>, indem wir also die einzelnen Werte in geeigne-  
ter Weise wählen, erhalten wir  $\sigma_{wa} = 12.0 \text{ kg/mm}^2$ .

Die Biegeermüdungsgrenze einer einseitig schwingenden Ebene  
können wir durch die nachstehende auf statistischem Wege  
gefundene Gleichung hypothetisch bestimmen<sup>4)</sup>:

$$\sigma_{up} = 1.66 \sigma_{wb} \dots\dots\dots (15)$$

Wenn wir aus dieser Gleichung (15), da  $\sigma_{up} = 20 \text{ kg/mm}^2$  ist,  
zu diesem Ermüdungsgrenzendiagramm das zuerst gefundene  
Spannungsniveau hinzufügen, dann erkennen wir, wie dies die

Abb.21 zeigt, ganz deutlich, daß wir uns bei diesem Beispiele auf der Seite der Sicherheit befinden.

#### 4. Zusammenfassung

Die auf dem Gasdruck und auf der Verbrennungswärme beruhenden, im Kolbenkopf entstehenden Spannungen sind durch Photoelastikmodellversuche analytisch geklärt worden, und über die Ergebnisse dieser Analyse wird in der vorliegenden Arbeit berichtet. Für ein durch Kombination einer kreisrunden Platte und eines Kreiszylinders hergestelltes, vereinfachtes Modell ist die Wirkung der Hohlkehlförmigkeit der Innenfläche des Kolbens untersucht worden und die verschiedenen Formen der gekrümmten Innenfläche hat man an Modellen von Kolben praktisch laufender Motoren untersucht und die sich dabei ergebenden Unterschiede verglichen.

Die Analyse der vom Gasdruck herrührenden Spannungen haben wir mit Hilfe des Spannungseinfrierverfahrens durchgeführt, während wir uns bei der Analyse der Wärmespannungen zweidimensionaler Versuche, sowie thermophotoelastischer Versuche nach dem PQ-Sandwich-Verfahren bedient haben.

Als Ergebnis dieser Versuche wurde die Größe der Endteilsteifigkeit und die durch die Größe des Hohlkehlradius bedingte Spannungskonzentration, sowie der durch die Unterschiede der Form der im praktischen Motor laufenden Kolben bedingte Unterschied im Spannungszustand geklärt, außerdem wurde durch Schlußfolgerung der Wert des Spannungsniveaus beim praktisch laufenden Kolben ermittelt.

Über ein Verfahren, um den Wärmespannungszustand der im praktischen Motor laufenden Kolben laboratoriumsmäßig zu

reproduzieren, sind, da die sich auf dem Unterschied in den Wärmebedingungen beziehenden Forschungsarbeiten ungenügend sind, den Ergebnissen der Messungen am praktisch laufenden Motor entsprechende Untersuchungen in Aussicht genommen; was die Genauigkeit der Versuchsergebnisse anbelangt, so werden noch die Ergebnisse der nach einem Matrix-Verfahren durchgeführten Analyse abgewartet und es sind dann entsprechende Untersuchungen beabsichtigt.

Über den Entstehungsmechanismus der wichtigsten Risse unter Berücksichtigung der Festigkeit des Kolbenkopfes gibt es zwar verschiedene wissenschaftliche Dissertationen, wir halten dies jedoch für eine Frage, die ohne weiteres aufgrund der Ergebnisse praktischer Messungen der Änderung von Temperatur und Spannungszustand geklärt wird.

Die Wirkung der Form ist in dem vorliegenden Bericht zwar nur ganz bruchstückweise gestreift worden, zur Zeit werden jedoch in einem weiten Bereich systematische Untersuchungen über die einzelnen Formfaktoren durchgeführt, und sobald sich in der nächsten Zukunft eine Gelegenheit gibt, hoffen wir, hierüber berichten zu können.

Zum Schluß unserer Arbeit wollen wir nicht versäumen, allen Herren, die uns dabei unterstützt haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

#### Literaturhinweise

- 1) SR-100-Forschungsberichte (1967)
- 2) Iwaki: Berichte der Jap.Maschineningenieurgesellschaft Nr.162 (Oktober 1966, 44.Jahresversammlung: Werkstoffmechanik).
- 3) H.S.Carslaw & J.C.Jaeger: Conduction of heat in Solids
- 4) Kawada: Die Ermüdung der Metalle und die Konstruktion.