

DIE VERWENDUNG DER PRÜFUNGSERGEBNISSE AN GETEILTEN PLEUELSTANGENKOPF-MODELLEN BEI DER DIMENSIONIERUNG

Von

Á. ZSÁRY

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Fakultät für Verkehrswesen, Technische Universität,
Budapest

(Eingegangen am 7. April, 1970)

1. Einführung

Die elementare Festigkeitslehre gibt zur Berechnung von Spannungen einfacher Konstruktionen und von Belastungen entsprechende Formeln an. Handelt es sich jedoch um veränderliche Querschnitte bzw. um Spannungskonzentrationen, so gestaltet sich die Aufgabelösung wesentlich schwieriger. Die theoretische Festigkeitslehre befaßt sich auf dem Gebiet der Elastizität mit der genauen Lösung von Einzelfällen, allgemein sind jedoch keine genauen Lösungen bekannt. Es gibt Näherungsverfahren, mit denen man für die Praxis brauchbare Zusammenhänge erhält, die aber keine Lösung des Problems bieten.

Bei einer zeitgemäßen Dimensionierung muß man jedoch auf irgendeine Weise die Spannungsverhältnisse bestimmen. Gelingt dies mit Hilfe theoretischer Berechnungen nicht, so muß die Lösung auf dem Weg von Spannungsmessungen gesucht werden.

Unter Stangenkopfformen — wie sie bei Maschinen und Konstruktionen sehr oft Verwendung finden — gibt es Fälle, in denen rechnerische Ermittlungen, in Anlehnung an die Kenntnisse der klassischen Festigkeitslehre, lediglich näherungsweise angestellt werden können. Die Bestimmung der entsprechenden Querschnittgestaltung von Stangenköpfen ist im wesentlichen eben von der Spannungsverteilung abhängig. Da die Ermittlung der Spannungsverteilung durch Zusammenhänge, wie sie aus der theoretischen Festigkeitslehre bekannt sind, nicht möglich ist, bedient man sich der Spannungsanalyse auf meßtechnischer Grundlage.

2. Aufgabenstellung der Untersuchungen

Der Zweck der Untersuchungen besteht in der Bestimmung der Spannungsverteilung von verschiedenen Stangenköpfen mit Hilfe der spannungsoptischen Methode sowie in der Feststellung der erforderlichen Bemessungsdaten. Diese Abhandlung befaßt sich nur mit einer gewissen Pleuelstangenform, wie sie bei langsam laufenden Verbrennungsmotoren Verwendung findet.

Dieses Ziel kann man bei gewissen Stangenkopf-Modellen durch Spannungsanalyse mit Hilfe des spannungsoptischen Verfahrens erreichen. Die Aufgabe kann naturgemäß nur unter gewissen Vereinfachungsbedingungen gelöst werden. Allgemein ermöglicht die Spannungsoptik nur die Analyse von Spannungszuständen in der Ebene, daher sind nur Modelle einer Prüfung zugänglich, die zwar unterschiedlich geformt sind, jedoch über die gleiche Plattendicke verfügen. Die derart ermittelten Werte weichen selbstverständlich zu einem gewissen Grade von der Spannungsverteilung der ausgeführten Pleuelstangen ab. Die an Pleuelstangenausführungen ausgebildeten Rippen und Verdickungen dienen im wesentlichen zur Querschnittsverstärkung. Das vereinfachte Modell stellt also den ungünstigeren Fall dar.

Den Gegenstand der Prüfung bildet die Wirkung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Gestalt, vom Einfluß der Schrauben-Klemmkraft von geteilten Pleuelstangenkopf-Modellen.

3. Beschreibung des Prüfverfahrens

Die Prüfungen erfolgten an Hand eines Geräts nach R. V. Baud (Hersteller Firma E. Schildknecht), das im Besitz der Technischen Universität Budapest ist. Das Gerät ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die Prüfeinrichtung ruht auf einer stabilen Stahlkonstruktion, an deren Oberteil eine prismatische Führungsbahn angebracht ist. Verschiebbare Reiter tragen die Lichtquelle 1, Kondensorlinse 2, Polaroidplatten 3 und 5. Am Ende der prismatischen Führungsbahn ist als Verlängerung derselben ein einstellbarer Tisch angeordnet, auf dem sich der Bildschirm 7 befindet.

In der Mitte der optischen Bank befindet sich der Einspannrahmen, an dem die Zugbelastung durch die Gewichte einer doppelarmigen Waage erzeugt wird. Der Einspannrahmen ist auf einen Tisch mit sorgfältig bearbeiteten Nuten montiert. Dieser Tisch kann auch während der Belastung des Modells durch Kraftantrieb (8, 9) gesenkt bzw. nach rechts oder links bewegt werden.

Das mit Hilfe des Prüfgeräts erhaltene Bild wurde photographisch (Photokamera) festgehalten. Im Bild sind zwei verschiedene Kurvenscharen sichtbar. Mit Hilfe der einen Kurvenschar, den Isoklinen, kann man die Trajektorie der Hauptspannungen bestimmen. Mit Hilfe der anderen Kurvenschar, den Isochromaten, kann die Hauptspannungsdifferenz bestimmt werden.

Mit den Messungen ist man in der Lage, an einem beliebigen Punkt des Modells den Wert der Hauptspannungsdifferenz sowie die Richtung der Hauptspannungen zu bestimmen. In beliebigen Punkten errichtete xy -Koordinatensysteme ermöglichen die Bestimmung von σ_x , τ_{xy} und σ_y .

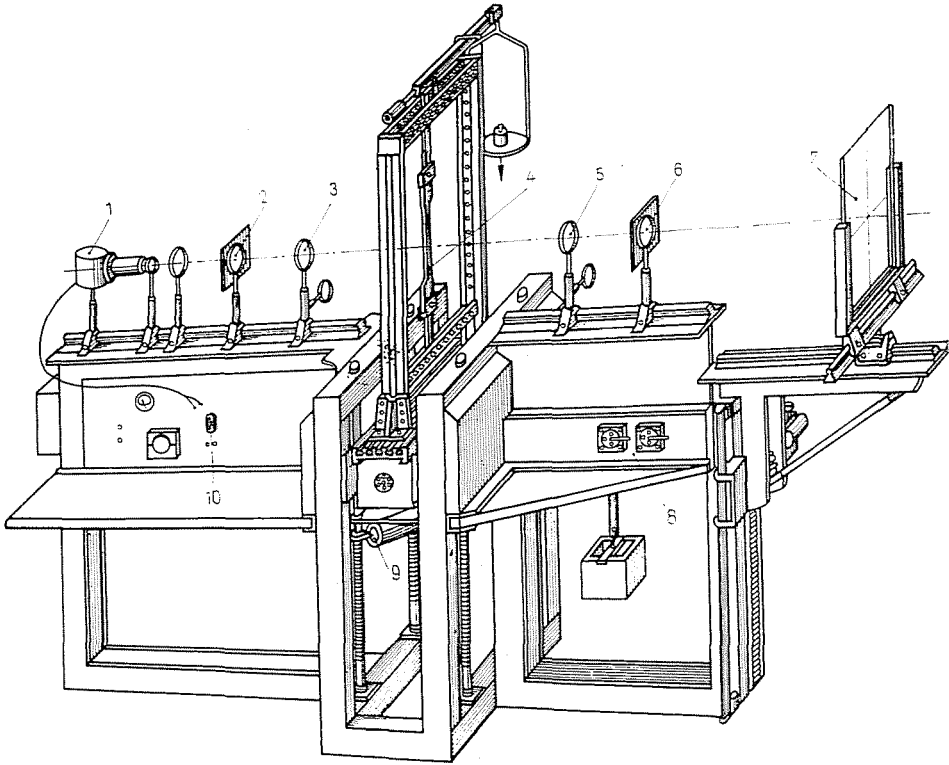


Abb. 1. Schematische Darstellung des spannungsoptischen Prüfgeräts

4. Kunststoffe, die bei der Prüfung verwendet werden

Im Verlauf der Prüfungen gelangten zwei verschiedene Kunststoffarten zur Anwendung. Zur Aufnahme der Isoklinen wurde ein Plexiglasmodell aus Perspex verwendet, zur Aufnahme der Isochromaten ein Modell aus ungesättigtem Polyester (Kennzeichen VP 1527).

Zwecks Bestimmung der Kunststoffeigenschaften wurden Prüfungen auf breiter Basis durchgeführt, als deren Ergebnis folgende Hauptmerkmale registriert wurden:

Perspex-Materialkonstanten:

Zugfestigkeit	$\sigma_B = 850 \text{ kp/cm}^2$
Elastizitätsmodul	$E = 25\,000 \text{ kp/cm}^2$
Spannungsoptische Konstante	$S = 84 \text{ kp/cm, Ordnung}$
Dehnungsoptische Konstante	$D = 298 \text{ Ordnung/cm}$

Infolge seiner geringen optischen Aktivität konnte das Perspex vor teilhaft zur Aufnahme der Isoklinen verwendet werden.

Zur Aufnahme der Isochromaten mußte das Poliesterharz VP 1527 einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Die Wärmebehandlung besteht im wesentlichen aus drei Teilen:

1. Erhitzung von Raumtemperatur auf 90 °C.
2. Dreistündige Erhaltung der 90 °C-Temperatur.
3. Abkühlung von 90 °C auf 55 °C, Temperatursenkung um 1,5 °C je Stundenintervall. Abkühlung von 55 °C auf Raumtemperatur um 3 °C je Stundenintervall.

Während der Wärmebehandlung befanden sich die Modelle in einer mit dünnflüssigem Instrumentenöl gefüllten Schale auf einer Glasplatte. Es konnte festgestellt werden, daß durch die Wärmebehandlung die bei der Bearbeitung entstandenen inneren Spannungen vollständig eliminiert wurden. Im Hinblick auf das mechanische bzw. optische Kriechen konnte eine wesentliche Verbesserung erzielt werden, obgleich sich die optische Aktivität in geringem Maße verschlechterte.

*Materialkonstanten des Polyesterharzes VP 1527
ohne Wärmebehandlung:*

Zugfestigkeit	$\sigma_B = 500 \text{ kp/cm}^2$
Elastizitätsmodul	$E = 41\,800 \text{ kp/cm}^2$
Spannungsoptische Konstante	$S = 27,5 \text{ kp/cm, Ordnung}$
Dehnungsoptische Konstante	$D = 1\,525 \text{ Ordnung/cm}$

mit Wärmebehandlung:

Zugfestigkeit	$\sigma_B = 520 \text{ kp/cm}^2$
Elastizitätsmodul	$E = 43\,000 \text{ kp/cm}^2$
Spannungsoptische Konstante	$S = 28,9 \text{ kp/cm, Ordnung}$
Dehnungsoptische Konstante	$D = 1\,490 \text{ Ordnung/cm}$

Durch Biegeprüfungen wurden die optischen und mechanischen Eigenschaften des Poliesterharzes VP 1527 an Probestäben ohne und mit Wärmebehandlung geprüft. Aus den Ergebnissen ist die Folgerung zu ziehen, daß bei der Durchleuchtung der Modelle die Belastung langsam eingetragen werden muß und die Messung kann zweckmäßig 5 Minuten nach Auftreten der Belastung begonnen werden. Abb. 2 zeigt die Anordnung des Biegeprüfungsrahmens. Durch die Messungen wurden die Durchbiegung, der Elastizitätsmodul, die

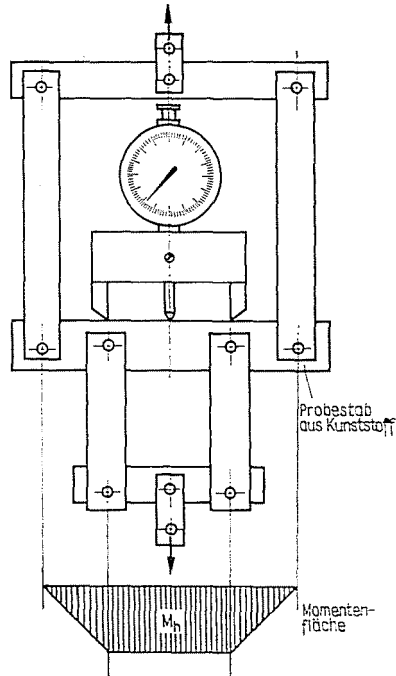


Abb. 2. Biegevorrichtung für Probestäbe

spannungsoptische Konstante in Abhängigkeit von der Zeit festgestellt. Abbildungen 3 und 4 zeigen den Verlauf dieser Kenngrößen. Das Diagramm der Spannungs-Ordnungszahl für den Kunststoff VP 1527 ist in Abb. 5 dargestellt.

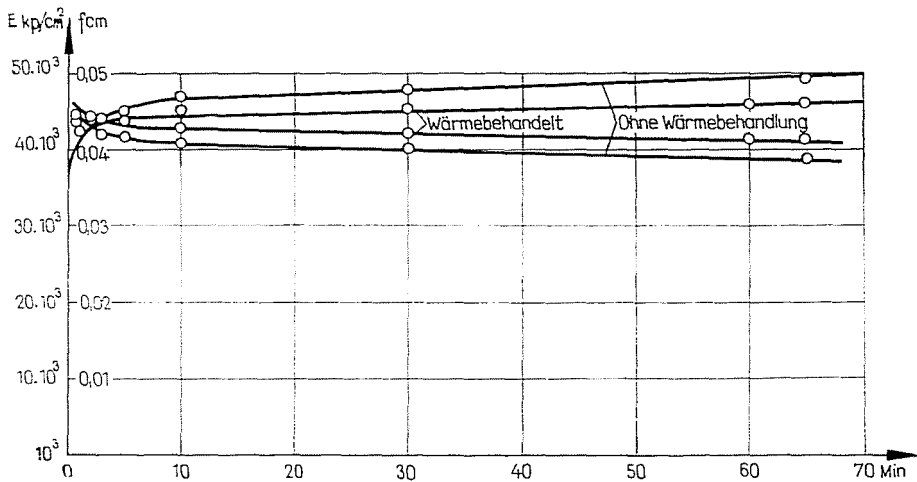


Abb. 3. Änderung der Durchbiegung und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Zeit

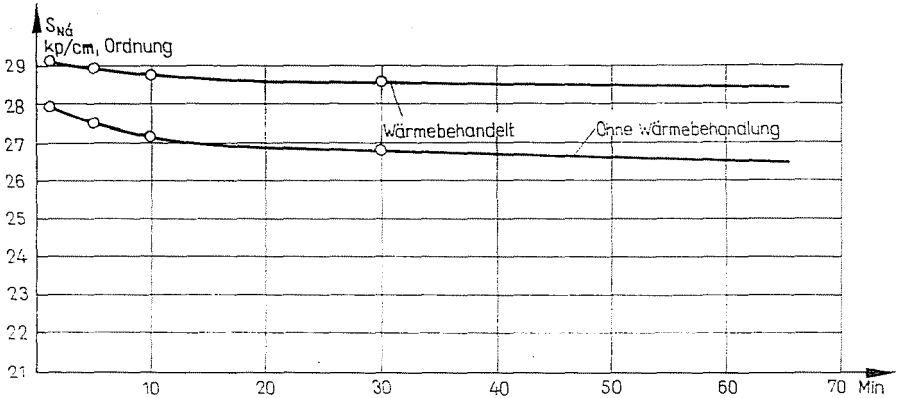


Abb. 4. Änderung des spannungsoptischen Faktors in Abhängigkeit von der Zeit

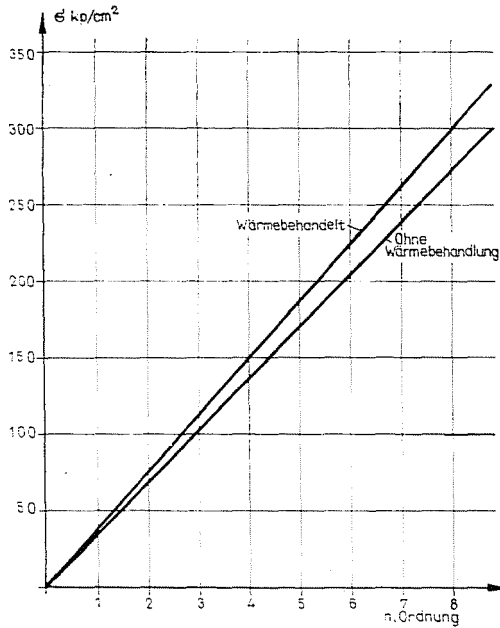


Abb. 5. Spannungs-Ordnungszahl-Diagramm für den Kunststoff VP 1527

5. Die Herstellung der Modelle

Sowohl das Perspex als auch das VP 1527 standen in Plattenform zur Verfügung, weshalb der erste Arbeitsgang in der präzisen Aufzeichnung der Modelle auf die Platten bestand. Sodann wurden die Modelle mit einem Aufmaß von einigen Zehntel Millimetern von Hand ausgesägt und nachgefeilt

und anschließend wurde die Bearbeitung auf einer kleinen Werkzeugmaschine fortgesetzt. Die restlichen Zehntelmillimeter wurden mit einem Daumenfräser abgetragen. Die letzte Phase, in der die Fertigstellung erfolgte, wurde mit Zustellungswerten von Hundertstelmillimetern vorgenommen. Während des Fräsens wurde zur Verminderung der Spannungen als Kühlmittel Öl verwendet.

6. Einspannvorrichtungen

Der Zweck der Prüfung war die Feststellung der Zug- und Druckbelastungen an Pleuelstangenkopf-Modellen, da die Belastung der Stangenköpfe im wesentlichen aus diesen besteht. Bei der Ausbildung der Einspannvorrichtungen bestand die Hauptaufgabe also darin, die Zug- und Druckbeanspruchungen entsprechend zur Geltung zu bringen, ohne dabei den kritischen Modellteil abzudecken bzw. die Durchleuchtung zu stören. Eine weitere Aufgabe bildete die Berücksichtigung der Schrauben-Klemmkraftwirkungen. Aus diesem Grund mußte eine Klemmvorrichtung entwickelt werden, die sowohl die Durchleuchtung als auch die Einstellung der Belastung gleichzeitig ermöglicht.

6.1. Einspannvorrichtung zur Erzeugung der Druckbelastung

Der Waagebalken kann im Belastungsrahmen des Prüfgeräts lediglich Zugbelastung hervorrufen. Die Druckbelastung wird durch eine Vorrichtung gemäß Abbildung 6 erzeugt, die eine für diesen Zweck gebaute Stangenkonstruktion darstellt. An die senkrechte Stange, die mit dem Waagebalken verbunden ist, paßt sich eine waagrechte Stange an, deren Enden mit je zwei flachen Stahlstücken ausgerüstet sind. Die unteren Enden derselben sind wiederum mit einer waagrechten Stange verbunden. Dadurch ergibt sich ein Gelenkparallelogramm, das sich den ausgeübten Kraftwirkungen entsprechend bewegt. Die beiden Enden der Flachstahlstücke, die sich am oberen Rahmenteil befinden, sind durch Bolzen stabil an den beiden Rahmenseiten befestigt. An der unteren und oberen waagrechten Stange sind gewölbte Flächen verschraubt, in denen sich die Zapfen befinden, die in die Bohrung des Pleuelstangenmodells eingepaßt werden. Damit übt das Gewicht in der Waagschale, mit Hilfe der Zapfen, eine Druckbelastung auf das Modell aus. Bei der Ausbildung der Konstruktion stellte die Erfüllung der Forderung einer möglichst geringen Abdeckung des Modells eine Schwierigkeit dar. Wie aus der Abbildung ersichtlich, bedeckt der Druckrahmen nur den unteren und oberen — unbelasteten — Stangenkopfteil.

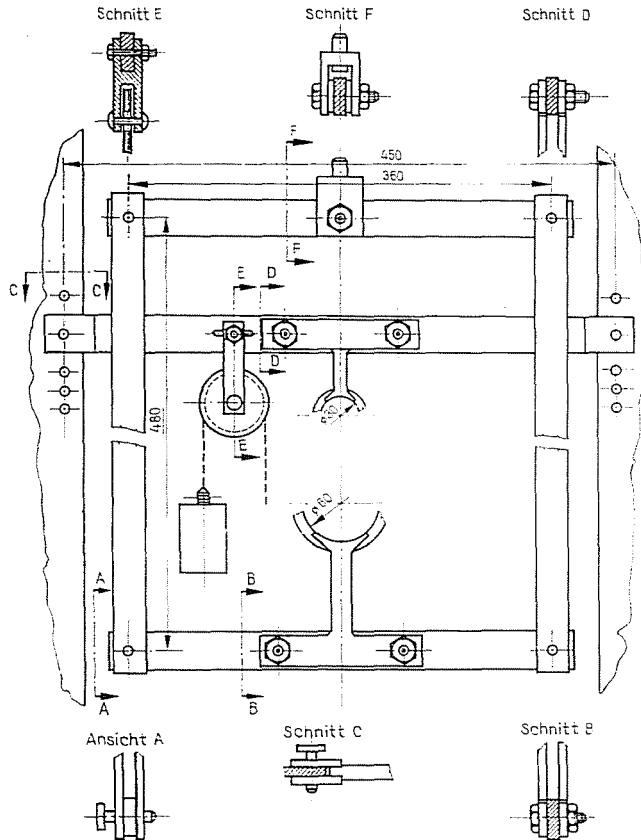


Abb. 6. Druck-Einspannvorrichtung zur Untersuchung von geteilten Stangenkopf-Modellen

6.2. Klemmbügel

Die Klemmung des unteren, geteilten Stangenkopfs erfolgt bei der ausgeführten Pleuelstange durch eine Schraubenverbindung. Beim Modell wird diese Wirkung durch die Anwendung von Klemmbügeln erzeugt (Abb. 7). Bei der Ausführung der Konstruktion waren zwei Gesichtspunkte maßgebend: leichte Einstellbarkeit bzw. Meßbarkeit der Klemmkraft und eine Lösung, die unter den gegebenen Raumverhältnissen eine Modellabdeckung verhindert. Unter den verschiedenen Ausführungsarten wurde ein federnder Dynamometer in Kreisbogenform (halbkreisförmig) gewählt. Die Meßuhr ist im Innenteil des Klemmbügels angeordnet und zeigt beim Spreizen des Bügels die elastische Deformation an. Die Klemmung erfolgt mit Hilfe einer Gewindespindel, die sich am unteren Bügelteil befindet. Auf der Planfläche des Modells liegen Klemmschuhe, die mit dem Bügel in einstellbarer Verbindung stehen und

die Druckbelastung übertragen. Im Hinblick darauf, daß die Anfertigung zweier maßgleicher Bügel nicht möglich ist, mußten die mit einer Meßuhr ausgerüsteten Bügel gesondert geeicht werden. Die Einstellung der Belastung erfolgte an Hand von Eichungsdiagrammen.

Zur Ausschaltung des Eigengewichts befindet sich am Oberteil der Bügel ein Öse, an der mit Hilfe eines Drahtes der Bügel hängend befestigt wird, wodurch eine Hebung seines Eigengewichts erzielt werden kann.

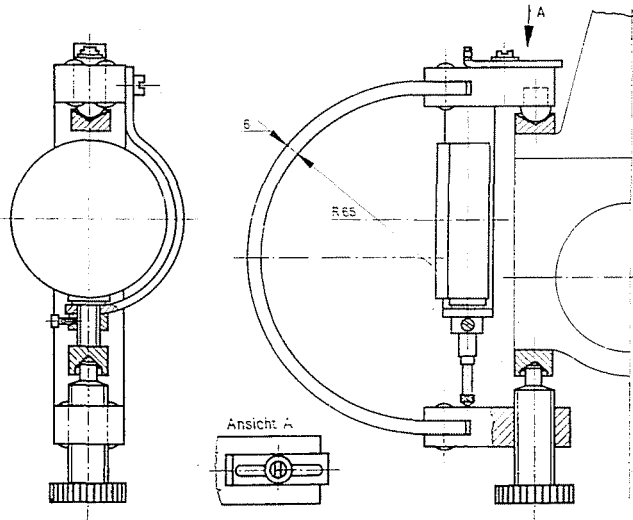


Abb. 7. Klemmbügel für die geteilten Pleuelstangenkopf-Modelle

6.3. Einspannvorrichtung zur Erzeugung der Zugbelastung

Den Hauptgesichtspunkt bei der Ausbildung der Einspannvorrichtung bildete die Gewährleistung einer reinen Zugbelastung des Modells und die Durchleuchtbarkeit sämtlicher kritischer Modellteile. Für die Bohrungen der Pleuelstange sind Zapfen vorgesehen, die über Stahlplatten mit den doppelgelenkigen Zugösen verbunden sind. Dadurch decken die Stahlplatten das Modell nur geringfügig ab und bieten eine Einstellmöglichkeit für die gelenkige Zugvorrichtung. Die Einspannvorrichtung ist in Abbildung 8 veranschaulicht.

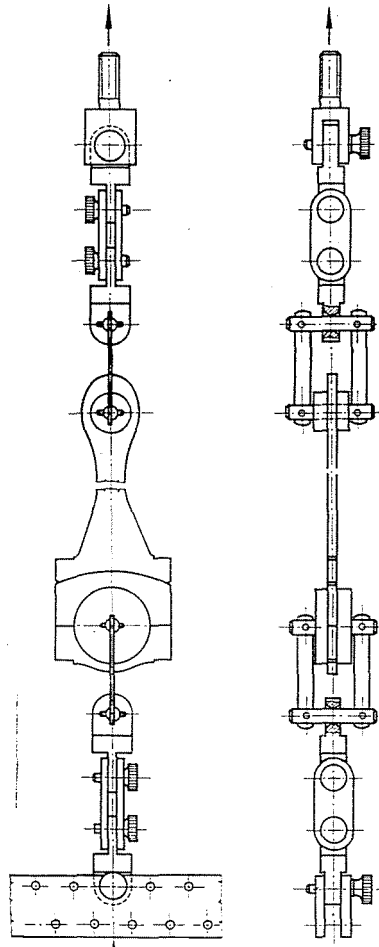


Abb. 8. Zug-Einspannvorrichtung zur Untersuchung von geteilten Stangenkopf-Modellen

7. Untersuchungen von dreiteiligen Pleuelstangen

Im ersten Teil der Untersuchungen werden die Spannungsverhältnisse der dreiteiligen Pleuelstangen behandelt.

Bei langsamlaufenden Dieselmotoren ist es besonders bei V-Anordnung üblich, die Hauptpleuelstange aus drei Teilen zusammensetzen. Der untere große Kopf wird an den Schaft durch Planteilung oder durch Bogenteilung angeschlossen, wobei der Bogenhalbmesser verschiedene Werte haben kann. In den Abbildungen 9 und 10 ist das vereinfachte ebene Modell der Pleuelstange dargestellt, an der die Untersuchungen durchgeführt wurden. In der bogenförmigen Ausführung war der Halbmesser in dem einen Falle gleich $R_1 = 100$ mm, im anderen Falle $R_2 = 125$ mm.

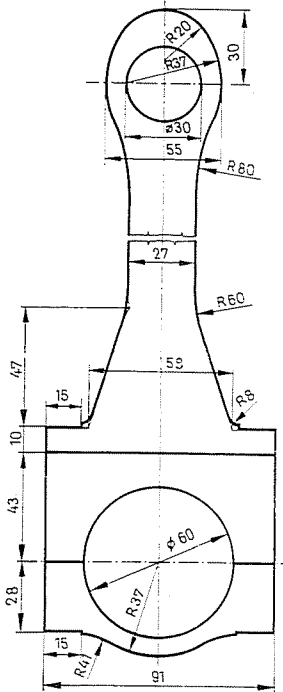


Abb. 9. Plangeteiltes, dreiteiliges Pleuelstangen-Modell

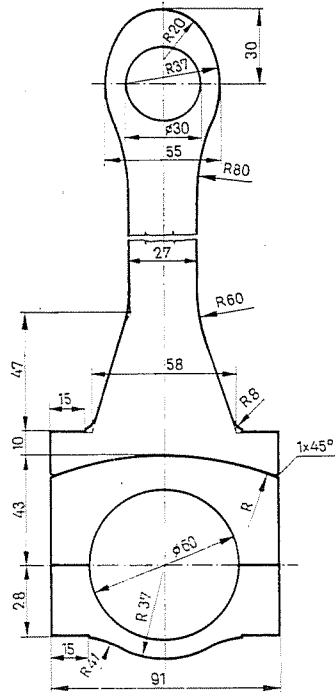


Abb. 10. Dreiteiliges Pleuelstangen-Modell mit bogenförmiger Teilung

Zweck der Untersuchungen war, durch einen Vergleich der drei Modellformen die richtigere Lösung zu finden. Bei den Messungen wurden die Zusammendruckkraftwirkung der Schraube auf den unteren Pleuelstangenkopf, die Folgen eines ungleichen Schraubenaufsitzes sowie bei Bogenteilungen die Spannungsverteilungen zufolge der unterschiedlichen Durchmesser der Auflageflächen untersucht.

Aus der bei der ausgeführten Pleuelstange tatsächlich wirksamen Druckkraft F , der Zugkraft F_t sowie der Zusammenpreßkraft der Schrauben V werden folgende Quotienten bzw. Beziehungen gebildet:

$$\frac{F}{F_t} = 5,5; \quad F_t = 0,182 F$$

$$\frac{F}{V} = 3,0; \quad V = 0,33 F$$

$$\frac{F_t}{V} = 0,57; \quad V = 1,78 \cdot F_t.$$

Unter Berücksichtigung dieser Verhältnisse wurden die Belastungen des Modells festgelegt und die Messungen ausgeführt.

7.1. Druckprüfung

Alle drei Modelle wurden mit der gleichen Belastung beansprucht, wobei der Verlauf der Isochromaten untersucht wurde, der über die Vergleichsspannungsverteilung einen guten Aufschluß gibt. Die Pleuelstange ist mit folgenden Kraftwirkungen belastet: mit der Vorspann-Schraubkraft V und der sich aus dem Verbrennungsdruck ergebenden Druckkraft F .

Bei den Untersuchungen hatten diese folgende Werte:

$V = 0$	$F = 77$ kp	$V/F = 0$
$V = 15$ kp	$F = 77$ kp	$V/F = 0,195$
$V = 25$ kp	$F = 77$ kp	$V/F = 0,325$
$V = 35$ kp	$F = 77$ kp	$V/F = 0,455$

Zwischen der Stangenkopfbohrung und dem Durchmesser der eingebauten Zapfen verblieb in sämtlichen Ausführungen ein Spiel von etwa 0,1 mm, es entsprach einem relativen Spiel von 0,0016.

Aus den aufgenommenen Isochromatenbildern ist festzustellen, daß sich die Behandlung des Lastfalles $V/F = 0,195$ erübrigt, daher wurde dieses Schaubild auch nicht konstruiert, die an den kritischen Stellen auftretenden Spannungen wurden jedoch festgehalten.

Bei der Untersuchung der Isochromatenverteilung ist zu erkennen, daß bei Druckbelastung die Schraubenauflegeflächen sowie die Umgebung der Stangeschaft- und Stangenkopf-Auflegeflächen die kritischen Teile sind. An diesen Stellen ergeben sich bedeutende Druckbelastungen, wobei der Wert

Tabelle I

Belastungen		$V = 0; F = 77$	$V = 15; F = 77$	$V = 25; F = 77$	$V = 35; F = 77$	
Planteilung	1.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	— —	41 20,5	49 24,5	74 37
	2.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	74 37	74 37	74 37	74 37
Bogenförmige Teilung $R = 125$ mm	1.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	— —	49 24,5	57 28,5	74 37
	2.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	45 22,5	49 24,5	52 26	52 26
Bogenförmige Teilung $R = 100$ mm	1.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	— —	49 24,5	57 28,5	74 37
	2.	$\sigma_1 - \sigma_2$ τ_{\max}	45 22,5	49,0 24,5	49 24,5	49 24,5

der den Maschinenteil zerstörenden, maximalen Schubspannung durch die Isochromatenbilder geliefert wird. Die durch die Messungen festgestellten Isochromaten-Werte ($\sigma_1 - \sigma_2$) und die maximale Schubspannung (τ_{max}) sind in kp/cm^2 in der Tabelle I angegeben. Die mit 1 bezeichneten Zeilen der Tabelle

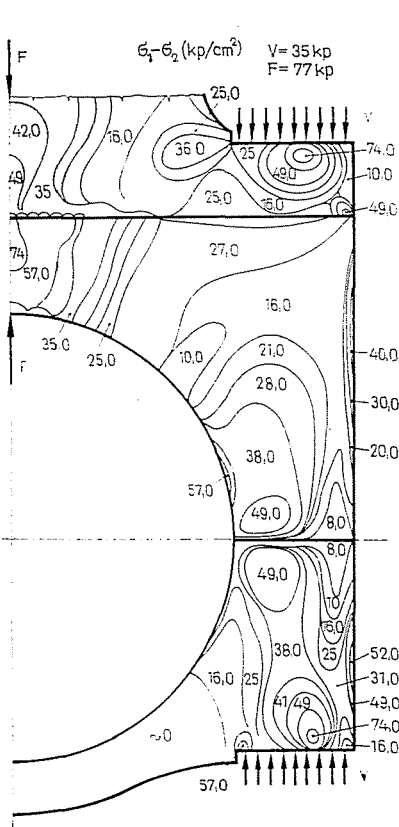


Abb. 11. Isochromatenbild für einen plangeteilten Pleuelstangenkopf bei $V = 35$ kp und $F = 77$ kp

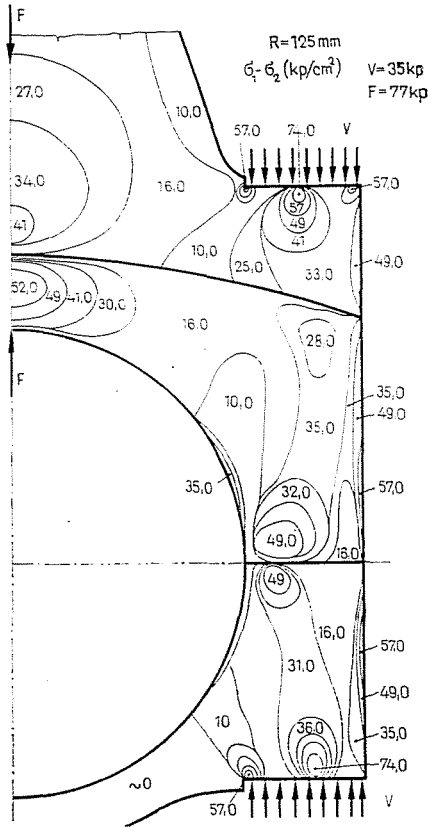


Abb. 12. Isochromatenbild für einen Pleuelstangenkopf mit bogenförmiger Teilung mit dem Halbmesser $R = 125$ mm, bei $V = 35$ kp und $F = 77$ kp

beziehen sich auf die Schrauben-Auflagefläche, die mit 2 bezeichneten auf die Stangenschaft-Auflagefläche.

Beispielshalber werden die Isochromatenbilder der einzelnen Pleuelstangenausführungen in Abb. 11, für Planteilung in Abb. 12 und 13 für Bogenteilungen mit Halbmessern $R = 125$ mm bzw. $R = 100$ mm bei einer Belastung von $V = 35$ kp und $F = 77$ kp gezeigt.

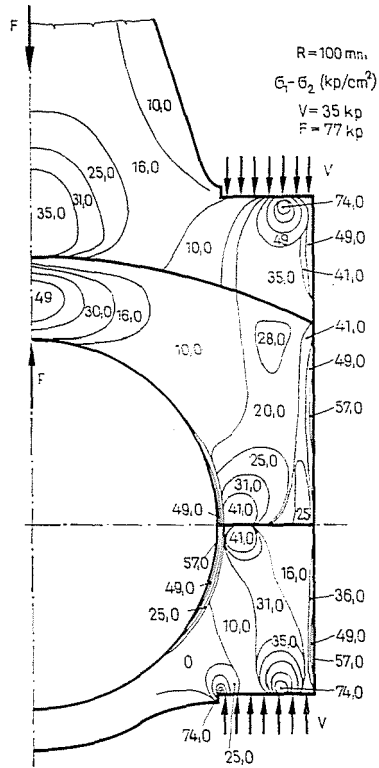


Abb. 13. Isochromatenbild für einen Pleuelstangenkopf mit bogenförmiger Teilung mit dem Halbmesser $R = 100$ mm, bei $V = 35$ kp und $F = 77$ kp

7.2. Zugprüfung

Die Beanspruchung von Pleuelstangenschaft und -kopf ist unter Zugbelastung ungünstiger als unter Druck, die Zugkraft ist hingegen beträchtlich kleiner als die Druckbelastung. Durch die Schraubenvorspannung wird die Spannungsverteilung in gewissem Maße verändert. Daher erschien es zweckmäßig, die Untersuchungen auf mehrere Lastfälle auszudehnen. Die Isochromatenbilder wurden für folgende Wertpaare, bestehend aus der Massenkraft entsprechenden Zugkraft F_t und der Schraubenvorspannkraft V , ermittelt:

$V = 0$	$F_t = 22$ kp	
$V = 35$ kp	$F_t = 0$	
$V = 25$ kp	$F_t = 13$ kp	$V = 1,92 F_t$
$V = 25$ kp	$F_t = 22$ kp	$V = 1,14 F_t$
$V = 35$ kp	$F_t = 44$ kp	$V = 0,795 F_t$
$V = 35$ kp	$F_t = 66$ kp	$V = 0,53 F_t$

Bei den hergestellten langsamlaufenden Motoren ist die Kraft F_t mit rund 20% der aus dem Verbrennungsdruck herrührenden Kraft F anzusetzen, während die Schraubenvorspannung $V = 1,8 F_t$ beträgt. Die Vorspannung wurde also mit einem verhältnismäßig hohen Wert festgelegt.

Die kritischen Stellen der im Stangenkopf unter Zugbelastung entstehenden Spannungsverteilung sind die Ecke der Schraubenaufgabe fläche am Stangenschaft, die durch die Zugkraft auf Biegung beansprucht wird, sowie der untere Deckel des Stangenkopfes, der gleichfalls der Biegung ausgesetzt ist.

Bei der Bemessung des geteilten Pleuelstangenkopfes ist es üblich, den Querschnitt I—I des oberen Endes auf Biegung und Zug (Abb. 14) aufgrund der untenstehenden Formel zu prüfen:

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_z = \frac{F_t l_2}{2W_1} + \frac{F_t \sin \alpha}{2A} \quad (1)$$

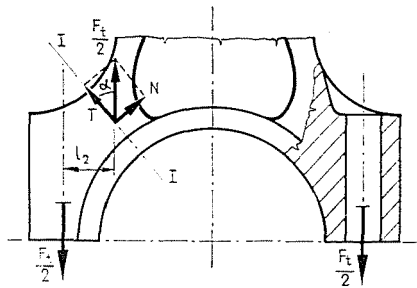


Abb. 14. Bemessungsskizze des oberen Teils des geteilten Pleuelstangenkopfes

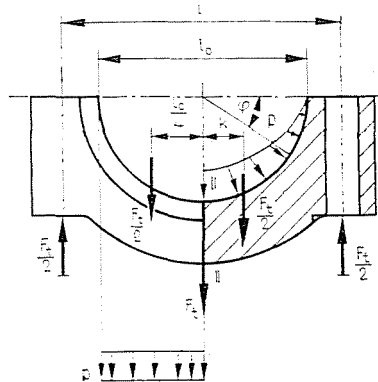


Abb. 15. Bemessungsskizze des unteren Teils des geteilten Pleuelstangenkopfes

Bei der Bemessung des Pleuelstangendeckels wird vorausgesetzt, daß der Kurbelzapfen als gleichmäßig verteilte Last im Deckelinneren aufliegt. Querschnitt II—II wird auf Biegung geprüft (Abb. 15):

$$M = \frac{F_t}{2} \left(\frac{l}{2} - \frac{d}{4} \right) = W_{II} \sigma. \quad (2)$$

Bei der Messung kann auf dem Zapfenumfang eine gleichmäßig veränderliche Druckverteilung angenommen werden, wodurch sich die tatsächlichen Verhältnisse besser annähern lassen (rechte Seite der Abb. 15). In diesem Falle ist das Moment:

$$M = \frac{F_t}{2} \left(\frac{l}{2} - k \right), \text{ mit } k \cong 0,4r. \quad (3)$$

Wird bei der Ecke der Schraubenauflagefläche des Pleuelstangenschaftes der biegebeanspruchte Querschnitt festgestellt, läßt sich die Biegespannung der Ränder als die von eingespannten Trägern ermitteln. Aus den Messungen ist auch die in den Ecken auftretende Spannung festzustellen und damit kann der Formfaktor definiert werden, der bei der Dimensionierung benutzt wird. Tabelle II enthält den einzelnen Lastfällen entsprechend die Spannungsspitzenwerte in den Ecken, die berechnete Nennspannung und den darauf bezüglichen Formfaktor für die drei Pleuelstangentypen.

Tabelle II

Typen		$F_t = 0$ $l' = 25$	$F_t = 13$ $l' = 25$	$F_t = 22$ $l' = 0$	$F_t = 22$ $l' = 25$	$F_t = 44$ $l' = 35$	$F_t = 66$ $l' = 35$
Planteilung	σ_{\max}	57	57	112	112	188	340
	σ_n	—	35	60	60	119	178
	α_k	—	1,63	1,87	1,87	1,58	1,91
Bogenförmige Teilung $R = 125 \text{ mm}$	σ_{\max}	16	30	50	50	90	180
	σ_n	—	19	32,0	32,0	64,0	95,0
	α_k	—	1,58	1,56	1,56	1,41	2,0
Bogenförmige Teilung $R = 100 \text{ mm}$	σ_{\max}	16	30	50	50	90	180
	σ_n	—	19	52	32	64	95
	α_k	—	1,58	1,56	1,56	1,41	2,0

Bei den hergestellten langsamlaufenden Motoren ist die Kraft F_t mit rund 20% der aus dem Verbrennungsdruck herrührenden Kraft F anzusetzen, während die Schraubenvorspannung $V = 1,8 F_t$ beträgt. Die Vorspannung wurde also mit einem verhältnismäßig hohen Wert festgelegt.

Die kritischen Stellen der im Stangenkopf unter Zugbelastung entstehenden Spannungsverteilung sind die Ecke der Schraubenauflagefläche am Stangenschaft, die durch die Zugkraft auf Biegung beansprucht wird, sowie der untere Deckel des Stangenkopfes, der gleichfalls der Biegung ausgesetzt ist.

Bei der Bemessung des geteilten Pleuelstangenkopfes ist es üblich, den Querschnitt I—I des oberen Endes auf Biegung und Zug (Abb. 14) aufgrund der untenstehenden Formel zu prüfen:

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_z = \frac{F_t l_2}{2W_1} + \frac{F_t \sin \alpha}{2A} \quad (1)$$

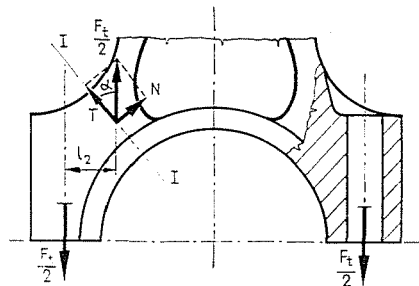


Abb. 14. Bemessungsskizze des oberen Teils des geteilten Pleuelstangenkopfes

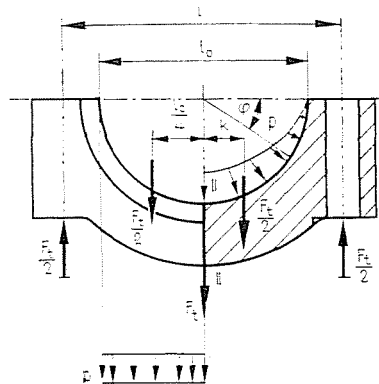


Abb. 15. Bemessungsskizze des unteren Teils des geteilten Pleuelstangenkopfes

Bei der Bemessung des Pleuelstangendeckels wird vorausgesetzt, daß der Kurbelzapfen als gleichmäßig verteilte Last im Deckelinneren aufliegt. Querschnitt II—II wird auf Biegung geprüft (Abb. 15):

$$M = \frac{F_t}{2} \left(\frac{l}{2} - \frac{d}{4} \right) = W_{II} \sigma. \quad (2)$$

Bei der Messung kann auf dem Zapfenumfang eine gleichmäßig veränderliche Druckverteilung angenommen werden, wodurch sich die tatsächlichen Verhältnisse besser annähern lassen (rechte Seite der Abb. 15). In diesem Falle ist das Moment:

$$M = \frac{F_t}{2} \left(\frac{l}{2} - k \right), \text{ mit } k \cong 0,4r. \quad (3)$$

Wird bei der Ecke der Schraubenauflagefläche des Pleuelstangenschaftes der biegebeanspruchte Querschnitt festgestellt, läßt sich die Biegespannung der Ränder als die von eingespannten Trägern ermitteln. Aus den Messungen ist auch die in den Ecken auftretende Spannung festzustellen und damit kann der Formfaktor definiert werden, der bei der Dimensionierung benutzt wird. Tabelle II enthält den einzelnen Lastfällen entsprechend die Spannungsspitzenwerte in den Ecken, die berechnete Nennspannung und den darauf bezüglichen Formfaktor für die drei Pleuelstangentypen.

Tabelle II

Typen		$F_t = 0$ $V = 25$	$F_t = 13$ $V = 25$	$F_t = 22$ $V = 0$	$F_t = 22$ $V = 25$	$F_t = 44$ $V = 35$	$F_t = 66$ $V = 35$
Planteilung	σ_{\max}	57	57	112	112	188	340
	σ_n	—	35	60	60	119	178
	α_k	—	1,63	1,87	1,87	1,58	1,91
Bogenförmige Teilung $R = 125 \text{ mm}$	σ_{\max}	16	30	50	50	90	180
	σ_n	—	19	32,0	32,0	64,0	95,0
	α_k	—	1,58	1,56	1,56	1,41	2,0
Bogenförmige Teilung $R = 100 \text{ mm}$	σ_{\max}	16	30	50	50	90	180
	σ_n	—	19	52	32	64	95
	α_k	—	1,58	1,56	1,56	1,41	2,0

Die Veränderung im Werte des Formfaktors ist durch die Tatsache begründet, daß sich die Vorspannkraft ändert und die Auflage der beiden Flächen zufolge der elastischen Verformung verändert wird.

Zur Berechnung der im Mittelquerschnitt des Pleuelstangendeckels auftretenden Spannung benutzt man üblicherweise die Momentbeziehungen 2

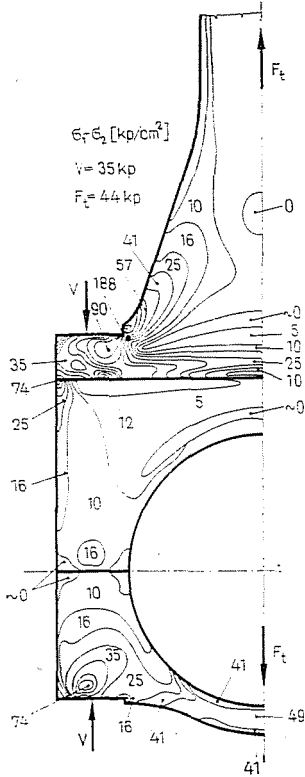


Abb. 16. Isochromatenbild für einen plangeteilten Pleuelstangenkopf bei $V = 35$ kp und $F_t = 44$ kp

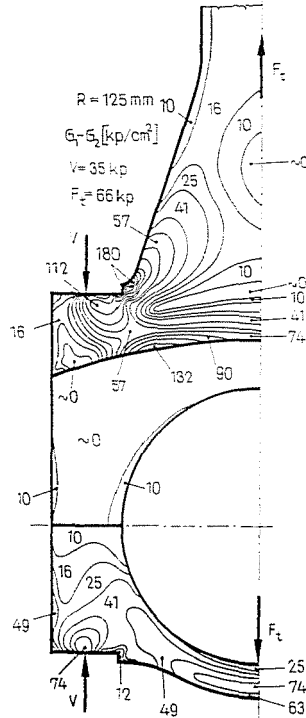


Abb. 17. Isochromatenbild für einen bogenförmig geteilten Pleuelstangenkopf bei $V = 35$ kp $F_t = 66$ kp

und 3. Gleichzeitig wird durch das Isochromatenbild die Zugspannung in der Randfaser angegeben. In Tabelle III sind die gemessenen und berechneten Spannungen für die drei Pleuelstangentypen zusammengefaßt.

Die berechnete Spannung weicht in bedeutendem Maße von dem Meßwert ab, was sich dadurch erklären läßt, daß der Deckel verhältnismäßig sehr dünn ist und eine elastische Formänderung erleidet, wobei er sich auf den mit einem kleinen Spiel eingesetzten Zapfen abstützt, die Biegung also tatsächlich unter anderen Verhältnissen erfolgt.

Beispielshalber ist in den Abbildungen 16 und 17 die Isochromatenverteilung für Pleuelstangen mit Planteilung bzw. bogenförmiger Teilung gezeigt.

Tabelle III

Typen		$F_I = 0$ $V = 35$	$F_I = 13$ $V = 25$	$F_I = 22$ $V = 0$	$F_I = 22$ $V = 25$	$F_I = 44$ $V = 35$	$F_I = 66$ $V = 35$
Planteilung	gemessen	5	16	25	25	41	60
	Formel 2	—	218	370	370	740	1110
	Formel 3	—	248	420	420	840	1260
Bogenförmige Teilung $R = 125$ mm	gemessen	5	16	16	16	49	63
	Formel 2	—	218	370	370	740	1110
	Formel 3	—	248	420	420	840	1260
Bogenförmige Teilung $R = 100$ mm	gemessen	5	16	16	16	49	63
	Formel 2	—	218	370	370	740	1110
	Formel 3	—	248	420	420	840	1260

7.3. Auswertung der Meßergebnisse

Die Untersuchungen der drei Pleuelstangenausführungen sollten entscheiden, welche von diesen aus der Sicht der Spannungsverteilung günstiger sei. Weiterhin konnten auch die Spannungsspitzenwerte der einzelnen Querschnitte geprüft werden. Aus den beschriebenen Untersuchungen lassen sich folgende Folgerungen ziehen und für die Bemessung folgende Feststellungen machen:

a) Die Druckverteilung ist bei der Auflage von Schaft und Stangenkopf im Falle einer Planteilung konzentrierter als bei bogenförmiger Teilung. Die unterschiedlichen Auflagehalbmesser ($R = 100$ und $R = 125$ mm) bringen in der Isochromatenverteilung fast keinen Unterschied.

b) Der durch die Druckwirkung der Schraube entstehende, höchste Isochromatenwert, der der größten Schubspannung proportional ist, war in allen drei Ausführungen gleich. Dieselbe Beobachtung wurde auch bei der Zugprüfung gemacht.

c) Die unter Drucklastwirkung in der Auflagefläche von Stangenschaft und -kopf auftretende Spannungsverteilung wird durch die Druckwirkung der Schraube nicht wesentlich verändert.

d) Durch eine Zugbelastung wird im Stangenkopf-Querschnitt eine ungünstigere Spannungsverteilung hervorgerufen als durch Druckbelastung. Die Beanspruchung des Randes am unteren Ende des Stangenschaftes bei der Auflage der Schraube ist im Falle der plangeteilten Pleuelstange bedeutend größer als im Falle der bogenförmig geteilten (Tabelle II). Bei der Bemessung ist dieser Querschnitt in jedem Falle zu überprüfen. Zur Überprüfung kann man sich der Formfaktoren in der Tafel bedienen, wobei unter Berücksichtigung der geometrischen Ähnlichkeit und des Lastfalles interpoliert wird. Die Untersuchungen zeigen, daß die Größe der in diesem kritischen Querschnitt auftretenden Spannung — in der Voraussetzung eines richtigen Einbaues und einer geeigneten Bearbeitung — durch die Schraubenvorspannkraft nicht wesentlich beeinflusst wird.

e) Nach den Untersuchungen entsteht in der Schraubenauflagefläche des Stangenschaftdeckels — unter Berücksichtigung der verschiedensten Lastfälle — keine Spannungsspitze. Ist die Dicke des Deckels im Verhältnis zum Zapfendurchmesser dem untersuchten Modell entsprechend ($s/d = 7/61 = 0,117$), erübrigt sich die Kontrollrechnung des Eckquerschnitts.

f) Es ist üblich, den mittleren Querschnitt des Deckels rechnerisch zu überprüfen. Bei der Prüfung der einschlägigen Tabelle III ist zwischen den berechneten und den gemessenen Spannungswerten ein wesentlicher Unterschied festzustellen. Im Falle des untersuchten geometrischen Verhältnisses liegt der Deckel hügelartig auf dem Zapfen auf und verhält sich nicht als ein steifer, sondern als ein elastischer Bauteil. Anhand der Untersuchungen läßt sich also feststellen, daß bei langsamlaufenden Motoren, wo die Massenkraft größenordnungsmäßig unterhalb der Druckbelastung bleibt, eine derartige dünne, elastische Ausführungsart gerechtfertigt sei.

g) Bei der Untersuchung der Stangenkopfausführung wurde auch die Schraubenzusammendrückkraft verändert. Dabei läßt sich feststellen, bis zu welchem Wert es zweckmäßig sei, die Schraubendruckwirkung zu erhöhen. Das kann am Falle der Druckbelastung verfolgt werden. Wird eine zunehmende Preßkraft eingetragen, so nähern sich die maximalen Schubspannungen einander, die bei der Auflagefläche der Schraube und der Auflagefläche des Stangenschaftes entstehen (Tabelle I). Als obere Grenze kann der Fall betrachtet werden, wo die Spannungswerte an den beiden Stellen gleich ausfallen. Da die bogenförmige Ausführung mehrere Vorteile hat, scheint es zweckmäßig zu sein, die Frage an solchen Modellen zu untersuchen. Nach der Tafel erfolgt die Übereinstimmung für bogenförmig geteilte Stangen bei $V = 25$ kp und $F = 77$ kp. Bei einer weiteren Erhöhung der Vorspannung ($V = 35$ kp, $F = 77$ kp) treten aus diesem Grunde viel größere Spannungen auf als unter Wirkung der als nützlich betrachteten Druckkraft. Es scheint also zweckmäßig, die Schraubenvorspannung $V = 0,33 F$ als oberen Grenzwert zu betrachten, wobei es selbstverständlich richtiger ist, einen kleineren Wert zu benutzen.

Es ist richtiger, die Sicherheit gegen Lockern der Schraube nicht durch ein kräftiges Anziehen der Schraube bis zur besagten oberen Grenze erreichen zu wollen, sondern bewährte Schraubensicherungen zu verwenden.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, daß die plangeteilte Pleuelstange eine bei Druckbelastung wenig, bei Zugbelastung in bedeutendem Maße ungünstigere Spannungsverteilung aufweist als bogenförmig geteilte Stangen. Durch die Änderung des Bogenhalbmessers innerhalb solcher Grenzen wird die Spannungsverteilung nicht beeinflußt.

8. Untersuchung der zweiseitigen Pleuelstange

Da der dreiteilige Stangenkopf nicht zu den allgemein verbreiteten Ausführungen gehört, schien es zweckmäßig zu sein, auch einen zweiseitigen Stangenkopf üblicher Ausführung mit annähernd denselben Abmessungen wie das obige Modell zu prüfen, um zu sehen, inwiefern die vorigen Feststellungen für die zweiseitigen Stangenköpfe als gültig angesehen werden dürfen.

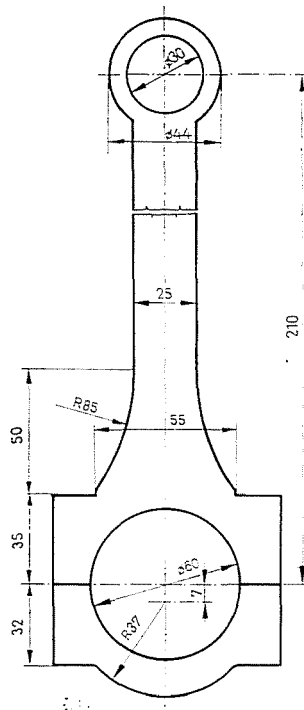


Abb. 18. Zweiseitiges Pleuelstangen-Modell

Die Einspannvorrichtungen für Zug- und Druckprüfungen waren dieselben wie bei der vorigen Untersuchung. Das Spiel zwischen Zapfenbohrung und Zapfen betrug 0,1 mm, wie im vorigen. Die geprüfte Pleuelstange ist in Abb. 18 dargestellt.

Die kurz zusammengefaßten Untersuchungsergebnisse sind wie folgt:

8.1. Druckprüfung

Auch hier wurden die Untersuchungen bei verschiedenen Belastungen durchgeführt. Diese waren wie folgt:

$V = 0$	$F = 77 \text{ kp}$	
$V = 15 \text{ kp}$	$F = 77 \text{ kp}$	$V = 0,195 F$
$V = 25 \text{ kp}$	$F = 77 \text{ kp}$	$V = 0,325 F$
$V = 35 \text{ kp}$	$F = 77 \text{ kp}$	$V = 0,455 F$

Wie bei den dreiteiligen Stangenköpfen waren auch hier die Schraubenaufflächen und die Auflagefläche des Stangenschaftes auf dem Zapfen die kritischen Teile. Aufgrund der Messungen wurden an diesen Stellen die Isochroma-

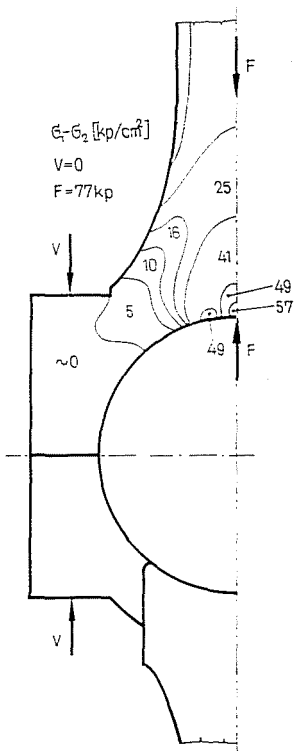


Abb. 19. Isochromatenbild für einen zweiteiligen Pleuelstangenkopf bei $V = 0$ und $F = 77 \text{ kp}$

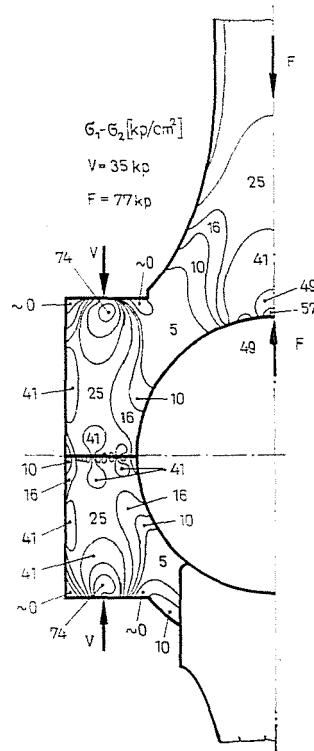


Abb. 20. Isochromatenbild für einen zweiteiligen Pleuelstangenkopf bei $V = 35 \text{ kp}$ und $F = 77 \text{ kp}$

Tabelle IV

Belastungen		$V = 0$ $F = 77$	$V = 15$ $F = 77$	$V = 25$ $F = 77$	$V = 35$ $F = 77$
Schraubenauf- fläche	$\sigma_1 - \sigma_2$	—	45	57	74
	τ_{\max}	—	22,5	28,5	37
Stangenschaft- auflagefläche	$\sigma_1 - \sigma_2$	57	57	57	57
	τ_{\max}	28,5	28,5	28,5	28,5

tenwerte ermittelt und die aus diesen errechneten maximalen Schubspannungswerte sind in Tabelle IV zusammengestellt.

Die Isochromatenverteilung für $V = 0$ und $F = 77$ kp ist in Abb. 19, für $V = 35$ und $F = 77$ kp in Abb. 20 gezeigt.

8.2. Zugprüfung

Bei den Zugprüfungen wurden dieselben Gesichtspunkte wie für die dreiteiligen Stangenköpfe berücksichtigt. Die eingetragenen Belastungen waren:

$V = 25$ kp	$F_t = 13$ kp	$V = 1,92 F_t$
$V = 25$ kp	$F_t = 22$ kp	$V = 1,14 F_t$
$V = 35$ kp	$F_t = 11$ kp	$V = 3,16 F_t$
$V = 35$ kp	$F_t = 44$ kp	$V = 0,795 F_t$
$V = 35$ kp	$F_t = 66$ kp	$V = 0,53 F_t$

Bei der Untersuchung der Isochromatenbilder sind als kritische Stellen die Ecke bei der Schraubenaufgabe und der mittlere Querschnitt des Deckels zu verzeichnen.

Als Beispiel wird in Abb. 21 die Isochromatenverteilung bei $V = 35$ kp und $F_t = 66$ kp gezeigt.

Zur Ermittlung der in der Ecke der Schraubenaufgabe des Stangenschaftes auftretenden Spannung ist es üblich, die Beziehung 1 heranzuziehen, wobei sich der andere Eckenquerschnitt am Deckel auf ähnliche Weise berechnen läßt. Die gemessenen Spannungen werden auf die so bestimmte Nennspannung bezogen und auf diese Weise kann ein Formfaktorwert bestimmt werden.

Die Kontrollrechnung des Deckels wird aufgrund der Formeln 2 und 3 durchgeführt und mit der gemessenen Spannung verglichen.

Die obigen Daten sind für verschiedene Lastfälle in Tabelle V zusammengestellt.

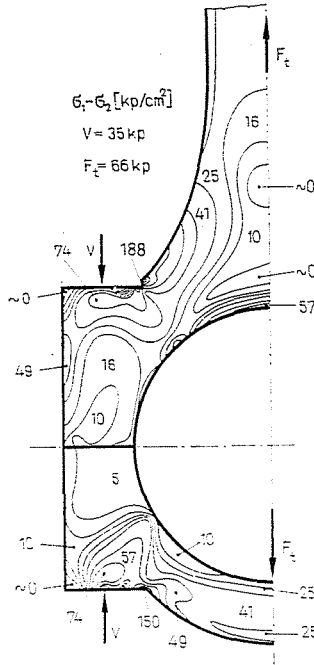


Abb. 21. Isochromatenbild für einen zweiteiligen Pleuelstangenkopf bei $V = 35$ kp und $F_t = 66$ kp

Tabelle V

Belastungen		$F_t = 11$ $V = 35$	$F_t = 13$ $V = 35$	$F_t = 22$ $V = 25$	$F_t = 44$ $V = 35$	$F_t = 66$ $V = 35$
Stangenschaft- ecke	σ_{max}	35	40	63	125	188
	σ_n	21	25	43	85	128
	α_k	1,66	1,6	1,61	1,47	1,47
Deckelecke	σ_{max}	12	16	41	90	150
	σ_n	44	52	88	176	264
	α_k	0,27	0,308	0,465	0,51	0,57
Mittelquer- schnitt des Deckels	gemessen	12	10	12	25	41
	Formel 2	46,5	55,0	92,0	185,0	277,0
	Formel 3	53,0	63,0	105,0	211,0	317,0

8.3. Auswertung der Meßergebnisse

Aufgrund der beschriebenen Untersuchungen kann die Spannungsverteilung im Pleuelstangenkopf ausgewertet und mit der dreiteiligen Stangenkopfausführung verglichen werden. Die wichtigeren Feststellungen, die auch bei der praktischen Konstruktion benutzt werden können, sind wie folgt:

a) Die größte Schubspannung bzw. Isochromatenordnungszahl in der Umgebung der Schraubenauflagefläche stimmt bei gleicher Belastung im wesentlichen mit den für den dreiteiligen Stangenkopf ermittelten Werten überein.

b) Die in der Umgebung der Zapfenauflagefläche des Stangenschaftes auftretende, größte Schubspannung hat im wesentlichen den gleichen Wert wie bei Stangenköpfen mit bogenförmiger Teilung.

c) Unter Zugbelastung entstehen in den Ecken der Schraubenaufgabefläche bedeutende Spannungsspitzen. Der bei dem Pleuelstangenschaft ermittelte Formfaktor schwankt um $\alpha_k \cong 1,5$ im Mittel; bei der Kontrollberechnung der Pleuelstange ist dieser Querschnitt unbedingt zu überprüfen.

Im Gegensatz zu den bei dem dreiteiligen Pleuelstangendeckel gemachten Erfahrungen, treten hier auch in den Ecken der Deckelschrauben-Aufgabefläche Spannungsspitzen auf. Bei dem Vergleich mit den Angaben in Tabelle V findet man, daß tatsächlich geringere Spannungen entstehen, als die mit Hilfe des vereinfachten Rechenverfahrens ermittelten. Der Grund dafür ist, daß bei der vereinfachten Rechnung die Gleichung Biegung für Einzelkräfte angeschrieben wurde, während sich in Wirklichkeit der Deckel auf den Zapfel aufstützt und somit seine Beanspruchung günstiger ist.

d) Bei der Gestaltung des Deckels wurde von den Dickenverhältnissen des dreiteiligen Stangenkopfes abgewichen (dort ist $s/d = 0,117$); bei dem zweiteiligen Stangenkopf war dieses Verhältnis $s/d = 14/60 = 0,234$. Bei der Untersuchung dieses Stangenkopfes kann diese Deckeldicke nicht mehr als elastischer Bügel aufgefaßt werden, wie im Falle des Deckels bei dem dreiteiligen Stangenkopf. Demzufolge weichen die berechneten und die gemessenen Spannungswerte bereits nicht so stark voneinander ab. Durch diese erhöhte Deckeldicke werden jedenfalls die Spannungsspitzen in den Deckelecken herbeigeführt. Wird von der Anwendung eines elastischen Bügels abgesehen, ist also in jedem Falle die Ecke zu überprüfen.

e) Wird die durch die Schraubenzusammendrückkraft herbeigeführte Spannungsverteilung anhand von Tabelle IV untersucht, erkennt man, daß bei $V = 0,385 F$ der gleiche Isochromaten-Spitzenwert bei der Auflagefläche des Stangenkopfes und in der Umgebung der Schraubenaufgabefläche entsteht. Dasselbe Ergebnis wurde auch für den dreiteiligen Stangenkopf erhalten. Es erscheint also bei keiner der Ausführungen zweckmäßig, die Vorspannkraft über diesen Wert zu erhöhen.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Feststellungen ist aus der Sicht der Spannungsverteilung in der dreiteiligen Ausführung der obere Teil des Stangenkopfes weniger günstig, während die Deckelausbildung bei dem zweiteiligen Stangenkopf ungünstiger erscheint. Auf dieser Grundlage und unter Anwendung der Faktorwerte in den Tabellen lassen sich für die Bemessung die Berechnungen bei einer besseren Annäherung der tatsächlichen Spannungswerte durchführen.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der uns zur Verfügung stehenden Festigkeitslehre können wir bei den Pleuelstangenköpfen nur näherungsweise Berechnungen anstellen, deshalb ermitteln wir die Festigkeitsanalyse auf meßtechnische Weise mit Hilfe der Spannungsoptik, unter vereinfachten Bedingungen.

Die Abhandlung befaßt sich mit der Spannungsverteilung der Pleuelstangen von Verbrennungsmotoren mit mittlerer Drehzahl. Sie bestimmt den Ort und das Maß der Spannungsspitzen auf eine Art, die auch bei den Konstruktionen verwendbar ist. Sie vergleicht die Spannungsverhältnisse von zwei- und dreiteiligen Stangenköpfen.

Literatur

1. NEUBER, H.: Kerbspannungslehre. Springer-Verlag 1958.
2. BOLEK, A., JANATKA, J.: Části strojů IV. Prag, 1956.
3. HÄRTING, W.: Spannungsoptik im Motorbau. Automobil-Industrie, Mai 1959.
4. WOLF, H.: Spannungsoptik. Springer-Verlag 1961.
5. RAAB, W.: Sonderprobleme bei spannungsoptischen Untersuchungen von Maschinenteilen. Dissertation, Darmstadt 1961.
6. Poljarisazionno-optitscheski metod issledowanija naprjasheni. Trudy konferenzi 13—21 fewralja 1958. Leningrad 1960.
7. GRISKOWA, N. P.: Optitscheski metod opredelnija, naprjasheni w detaljach maschin. Kiew, 1953.
8. TRNKA, J.: Napjatost ojice se sikmo delenou hlavou. Strojirenství 12, 899—905 (1962).
9. TEEPE, W.: Beitrag zur spannungsoptischen Untersuchung von Schalen. Dissertation 1961.
10. THAMM, F.: Ermittlung der Vergleichsspannung anhand einer spannungsoptischen Untersuchung. Dissertation, Budapest 1961.

Árpád ZSÁRY, Budapest IX., Kinizsi u. 1—7. Ungarn