

SPANNUNGSOPTISCHE PRÜFUNGEN AN GESCHLOSSENEN PLEUELSTANGENKÖPFEN I.

Von

A. ZSÁRY

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität, Budapest
(Eingegangen am 29. Februar, 1964)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. VÖRÖS

1. Einführung

Zum Aufgabenkreis des Ingenieurs rechnet man vornehmlich die Inbetriebhaltung vorhandener Einrichtungen, ihre Wartung, die Umgestaltung von Konstruktionen, die Entwicklung und Ausführung von Neukonstruktionen und neuen Maschinen. Unterzieht man die einzelnen Aufgabengebiete einer näheren Betrachtung, so begegnet man überall dem mehr oder minder vordringlich, ja mitunter bestimmend auftretenden Bemessungsproblem. Unter Bemessung will hierbei nicht nur die Bestimmung von Festigkeitsgrößen im engeren Sinne, sondern auch die zweckentsprechende geometrische Gestaltung von Maschinen und Maschinenteilen, die Wahl des Konstruktionsmaterials und der Bearbeitungsmöglichkeiten sowie die Umstände ihres Verhaltens im Betrieb verstanden sein.

Da es sich also stets um komplexe Problemstellungen handelt, kann die Festigkeitsbemessung naturgemäß nur als ein Teil des Ganzen betrachtet werden, obwohl ihre allgemeine Behandlung gesondert erfolgen kann. Es gibt nämlich kaum ein Gebiet, auf welchem sich nicht die Notwendigkeit einer Festigkeitsbemessung gesondert ergeben würde.

Die elementare Festigkeitslehre gibt zur Berechnung von Spannungen einfacher Konstruktionen und Belastungen entsprechende Formeln an. Handelt es sich jedoch um veränderliche Querschnitte, um kompliziertere Gestaltung, bzw. um Spannungskonzentrationen, gestaltet sich die Lösung der Aufgabe 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 zwar Näherungsverfahren, mit denen man bei gewissen Vernachlässigungen brauchbare Zusammenhänge für die technische Praxis erhält, doch erscheint das Problem damit nicht gelöst.

Eine zeitgemäße Dimensionierung muß die Spannungsverhältnisse auf irgendeine Art und Weise bestimmen. Gelingt dies mit Hilfe theoretischer Berechnungen nicht, so erhält man die Lösung durch Spannungsmessungen.

Auch die Dimensionierung der Köpfe von Pleuelstangen, wie sie bei Maschinen und Konstruktionen sehr oft Verwendung finden, gehört zu jenen

Bemessungsaufgaben, bei denen man rechnerische Ermittlungen auf Grund der klassischen Festigkeitslehre lediglich im Näherungsverfahren anstellen kann. Die Bestimmung der richtigen Querschnittsgestalt von Stangenköpfen ist weitgehend eben von der Spannungsverteilung abhängig. Die Größe der Spannungskonzentration wird durch die mehr oder weniger sorgfältige Wahl der einzelnen Querschnittsübergänge bzw. Krümmungsradien bestimmt. Da die Ermittlung der Spannungsverteilung aus Zusammenhängen, wie sie aus der theoretischen Festigkeitslehre bekannt sind, nicht möglich ist, bedient man sich der Spannungsanalyse auf meßtechnischer Grundlage.

2. Aufgabenstellung der Untersuchungen

Die Untersuchungen setzten sich die Bestimmung der Spannungsverteilung bei unterschiedlich ausgebildeten Pleuelstangenköpfen nach der spannungsoptischen Methode, die Feststellung ihrer günstigsten Gestalt sowie die Beurteilung der Zusammenhänge im Hinblick auf eine praktische Bemessung zum Ziel.

Die Aufgabe kann naturgemäß nur unter gewissen Vereinfachungsbedingungen gelöst werden. Allgemein ermöglicht die Spannungsoptik nur die Analyse von Spannungszuständen in der Ebene, weshalb der Prüfung nur Modelle zugänglich sind, die sich zwar in ihrer Form unterscheiden, jedoch die gleiche Plattenstärke haben. Die an solchen Modellen ermittelten Werte weichen selbstverständlich in einem gewissen Grade von der Spannungsverteilung der ausgeführten Pleuelstangen ab. Die an ausgeführten Pleuelstangen ausgebildeten Rippen und Verstärkungen dienen im wesentlichen einer Verstärkung der Querschnitte. Das vereinfachte Modell stellt also den ungünstigsten Fall dar.

Im Hinblick auf die Vielzahl möglicher Pleuelstangenkopfformen, befaßt sich diese Abhandlung nur mit jener, die bei langsam laufenden Verbrennungsmotoren Verwendung findet. Gegenstand der Prüfung bildete die Spannungsverteilung in den großen drei- oder zweiteiligen und in den ungeteilten kleinen Pleuelstangenköpfen. Außer den Auswirkungen der Gestalt auf die Spannungsverteilung wird auch der Einfluß der Schrauben-Klemmkraft und des Spiels zwischen Zapfen und Bohrung geprüft. Im Verlauf der Prüfungen wurde jedes Modell zwei verschiedenen Belastungen, einer Zug- und einer Druckbelastung ausgesetzt, wozu noch eine superponierte Schrauben-Klemmkraft kam. Die Beanspruchung der Stangenköpfe durch Zug- und Druckkräfte stellt die Hauptbelastung während des Betriebs dar. Die Wirkung der Massenkraft auf die Stangenköpfe, die sich aus der Rotationsbewegung ergibt, ist so unbedeutend, daß sie außer acht gelassen werden konnte.

Die vorliegende Abhandlung befaßt sich nur mit den Prüfungen und Prüfungsergebnissen, die sich im Zusammenhang mit den geschlossenen, kleinen Pleuelstangenköpfen ergeben.

3. Beschreibung des Prüfverfahrens

Die Prüfungen erfolgten mit einem Gerät nach R. V. Baud (Herstellerwerk E. Schildknecht), das sich im Besitz des Lehrstuhls für Maschinenelemente an der Technischen Universität Budapest befindet. Eine schematische Darstellung des Geräts gibt die Abbildung 1. Die Prüfeinrichtung ruht auf einer stabilen Eisenkonstruktion, an deren Oberteil eine prismatische Führung

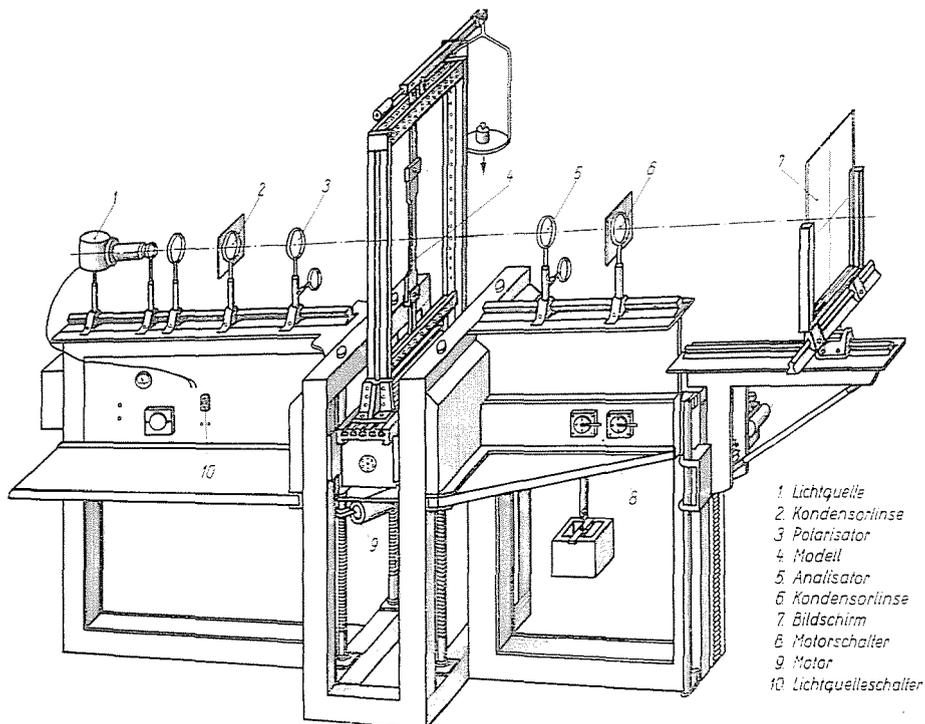


Abb. 1. Spannprüfrahmen der optischen Bank

angebracht ist. Verschiebbare Reiter tragen Lichtquelle 1, Kondensatorlinse 2, Polaroidplatten 3 und 5. Am Ende der prismatischen Führung ist als Verlängerung derselben ein verstellbarer Tisch angeordnet, auf dem sich Bildschirm 7 befindet.

Als punktförmige Lichtquelle dient eine Punktlicht-Glühlampe von 300 W, die von einem eigenen Lüfter gekühlt wird. Auf der optischen Bank sind die beiden Polaroidplatten 3 und 5, daneben die in den Strahlengang ein- und ausschaltbaren Viertelwellenplatten angeordnet. In der Mitte der optischen Bank befindet sich der Einspannrahmen, an welchem die Zugbelastung durch Gewichte einer gleicharmigen Balkenwaage erzeugt wird. Der Einspannrahmen ist auf einen Tisch mit sorgfältig ausgearbeiteten Nuten montiert. Dieser Tisch

kann auch während der Belastung des Modells durch Kraftantrieb 8, 9 gesenkt bzw. nach rechts oder links bewegt werden.

Bei einem Teil der Prüfungen wurden die Messungen mit Streulicht — statt mit Punktlicht — vorgenommen. In diesem Fall mußten auf der Führung ein Lampengehäuse und zwei große Polaroidplatten angebracht werden.

Das vom Prüfgerät entworfene Bild wurde photographisch festgehalten. Im Bild sind zwei verschiedene Kurvenscharen sichtbar. Mit Hilfe der einen Kurvenschar, den Isoklinen, läßt sich die Trajektorie der Hauptspannungen, an der anderen Kurvenschar, den Isochromaten, die Hauptspannungsdifferenz bestimmen.

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

4. Auswertung der Modellausgestaltungen

Die Aufnahme und Fixierung der Hauptspannungs-Unterschiedsverteilung $\sigma_1 - \sigma_2$ der Modell-Isochromaten bildete die wichtigste Messung. Unter gewissen Bedingungen liefern die ermittelten Isochromatenwerte die für die Bemessung unerläßlichen Spannungsspitzen und Vergleichspannungswerte.

Die Ebene der Prüfmodelle kann als Hauptspannungsebene betrachtet werden, so daß die Spannungen σ_1 und σ_2 tatsächlich Hauptspannungen darstellen. Die spannungsoptische Prüfung bezieht sich auf den ebenen Spannungszustand; die an den Pleuelstangenköpfen auftretende Spannung wird also als Spannungszustand in der Ebene betrachtet. Nach der Spannungstheorie von Mohr—Guest errechnet sich die Vergleichspannung aus den entstehenden Hauptspannungen zu

$$\sigma_{\text{red}} = \sigma_1 - \sigma_2$$

wobei jedoch von der größten Hauptspannung der kleinste Wert vorzeigengerecht abzuziehen ist. Das Isochromatenschaubild gibt die Differenz der beiden Hauptspannungen ohne Berücksichtigung des Vorzeichens an.

Der Isochromatenwert des ebenen Spannungszustandes stimmt mit der Vergleichspannung nach Mohr—Guest überein, wenn die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 entgegengesetzte Vorzeichen haben, in allen anderen Fällen ist der Isochromatenwert stets etwas kleiner als jener der Vergleichspannung. Die Isochromaten am Rand des unbelasteten Modells liefern den Wert der Tangentialspannung, da es in diesem Fall nur eine Hauptspannung gibt. Im Inneren des Modells geben sie jedoch einen guten qualitativen Einblick in die reduzierte Spannungsverteilung.

Auf Grund dieser Überlegungen können die Modellausgestaltungen anhand der Isochromatenbilder verglichen und ausgewertet werden.

Die bei der Modellprüfung ermittelten Spannungswerte können auf die ausgeführten Maschinenteil auftretenden Spannungen umgerechnet werden.

Die Pleuelstangenköpfe können als mehrfach zusammenhängende Gebilde angesehen werden, deren Kräfte in Stangenrichtung, bezogen auf den Umfang, nicht im Gleichgewicht sind. Die Poissonsche Zahl für Stahl unterscheidet sich kaum von jener für Kunststoffe, so daß man die Spannungsverteilung an den Modellen den Spannungsverteilungen an den Maschinenteilen ähnlich setzen kann.

Für die in den Maschinenteilen entstehenden Spannungen gilt der Formel

$$\sigma = \sigma_m \frac{P}{P_m} \frac{b_m}{b} \frac{l_m}{l},$$

in der

σ_m = die im Modell entstehende Spannung.

P_m = die das Modell belastende Kraft,

b_m = die Stärke (Dicke) des Modells,

P = die den Maschinenteil belastende Kraft,

b = die Stärke (Dicke) des Maschinenteils,

$\frac{l_m}{l}$ = das Verhältnis der linearen Abmessungen von Modell und Maschinenteil, d.h. der Maßstab des Modells.

Man ist also in der Lage, die am Modell erhaltenen Resultate auf den ausgeführten oder auszuführenden Maschinenteil umzurechnen.

5. Die bei den Prüfungen verwendeten Kunststoffe

Bei den Prüfungen gelangten zwei verschiedene Kunststoffarten zur Anwendung. Zur Aufnahme der Isoklinen wurde ein 6 mm dickes Plexiglasmodell aus Perspex zur Aufnahme der Isochromaten ein Modell aus 8 mm dickem ungesättigtem Polyester (VP 1527) verwendet.

Zur Bestimmung der Kunststoffeigenschaften wurden Prüfungen durchgeführt, als deren Ergebnis folgende wichtigeren Kennwerte registriert werden konnten:

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 vorteilhaft zur Aufnahme der Isoklinen verwendet werden.

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

1. Erhitzung von Raumtemperatur auf 90° C in etwa 2—3 Stunden,
2. Dreistündiges Konstanthalten der Temperatur von 90° C,
3. Abkühlung von 90° C auf 55° C, Temperatursenkung um stündlich 1,5° C. Abkühlung von 55° C auf Raumtemperatur um 3° C je Stunde.

Während der Temperaturbehandlung befanden sich die Modelle in einer mit dünnflüssigem Instrumentenöl gefüllten Schale auf einer Glasplatte. Es konnte festgestellt werden, daß die Wärmebehandlung die inneren Spannungen, die bei der Bearbeitung entstanden waren, vollständig behoben hatte. Auch bezüglich des mechanischen bzw. optischen Kriechens konnte eine wesentliche Verbesserung erzielt werden, obgleich sich die optische Aktivität in geringem Maße verschlechterte.

Materialkonstanten des Polyesterharzes VP 1527

Vor der 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 $D = 1525 \text{ Ordnung/cm}$.

Nach der Wärmebehandlung :

Zugfestigkeit $\sigma = 520 \text{ kp/cm}^2$,

Elastizitätsmodul $E = 43\,000 \text{ kp/cm}^2$,

Spannungsoptische Konstante $S = 28.9 \text{ kp/cm}$, Ordnung,

Dehnungsoptische Konstante $D = 1490 \text{ Ordnung/cm}$.

Für Zwecke der Auswertung wurden die Zusammenhänge der Spannungs-Ordnungszahl bestimmt, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind. Nach Beendigung der Wärmebehandlung konnte am Probestab ein gewisser Empfindlichkeitsschwund festgestellt werden. Dies ergab sich aus dem höheren Spannungsbedarf bei höherer Ordnungszahl.

Nach Beendigung des Biegeversuchs wurde das optische und mechanische Kriechen des Polyesterharzes VP 1527 untersucht, und zwar am wärmebehandelten und am ungehandelten Prüfkörper. Den prinzipiellen Aufbau des Biegebelastungsrahmens zeigt Abbildung 3. Im Verlauf der Prüfungen stellten wir die Biegung, den Elastizitätsmodul, den spannungsoptischen Faktor bzw. deren zeitabhängigen Änderung fest. Die Abbildungen 4 und 5 veranschaulichen die Änderungen dieser Kenngrößen. Mit den Untersuchungen können folgende Schlüsse gezogen werden: Während der Durchleuchtung der

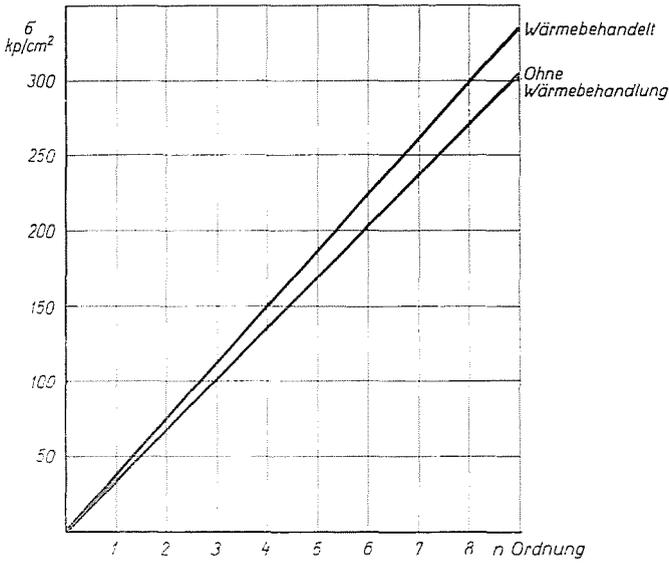


Abb. 2. Zusammenhang der Spannungs-Ordnungszahl bei Polyesterharz VP 1527

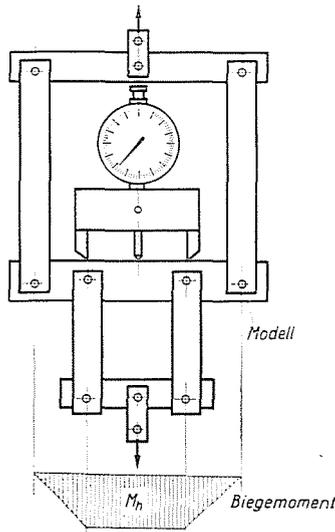


Abb. 3. Biegebelastungsrahmen

Modelle muß die Belastung langsam erfolgen. Zweckmäßig beginnt man mit den Messungen 5 Minuten nach erfolgter Belastung, nach Ablauf einer halben Stunde müssen die Modelle jedoch entlastet werden. Nach einer gewissen Ruhezeit können die Modelle wieder belastet werden, sofern der Meßvorgang dies erfordert.

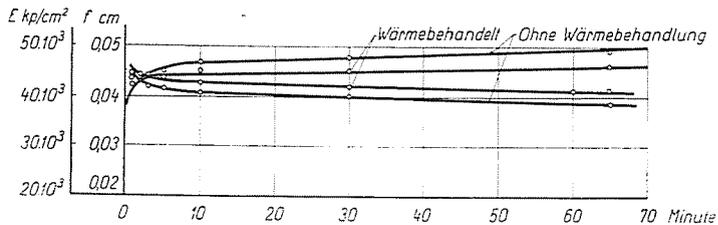


Abb. 4. Zeitabhängige Änderung der Biegebelastung und des Elastizitätsmoduls

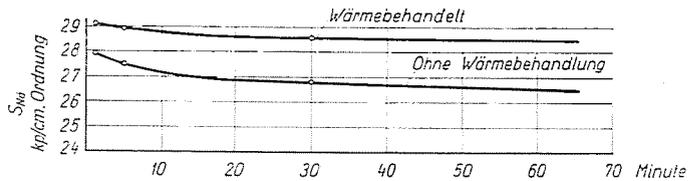


Abb. 5. Zeitabhängige Änderung der spannungsoptischen Konstante

6. Die Bearbeitung des Modellmaterials

Sowohl Perspex als auch 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 einer Fertigungszugabe von einigen Zehntelmillimetern von Hand ausgesägt und nachgefeilt, worauf anschließend die Bearbeitung auf einer kleinen Werkzeugmaschine folgte. Es handelte sich hierbei um eine kleine, auf den Tisch montierbare Universalmaschine für die Feinbearbeitung. Die restlichen Zehntelmillimeter wurden mit einem Daumenfräser abgetragen, die Zustellung betrug jeweils 0,1 mm. Die letzte Phase, in der die Fertigbearbeitung erfolgte, wurde mit Zustellungswerten von Hundertstelmillimetern vorgenommen. Während des Fräsens wurde als Kühlmittel Öl verwendet, um die Spannungen zu vermindern.

7. Einspannvorrichtungen

Der Zweck der Prüfungen war die Feststellung der Zug- und Druckbelastungen an Pleuelstangenköpfen, da die Belastung der Stangenköpfe im wesentlichen aus solchen besteht. Bei der Ausbildung der Einspannvorrichtungen bestand die Hauptaufgabe also darin, die Zug- und Druckbeanspruchung 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 bei geteilten Stangenköpfen. Aus diesem Grunde mußte eine Klemmvorrichtung ent-

wickelt werden, die weder die Durchleuchtung, noch die Einstellung der Belastung störte. Die Einspannvorrichtung hatte folgenden konstruktiven Aufbau:

7.1 Einspannvorrichtung zur Erzeugung der Druckbelastung

Der Waagebalken kann im Belastungsrahmen des Prüfgeräts lediglich eine Zugbelastung hervorrufen, weshalb zur Erzeugung der Druckbelastung eine Vorrichtung gemäß Abbildung 6 eigens konstruiert werden mußte. Die

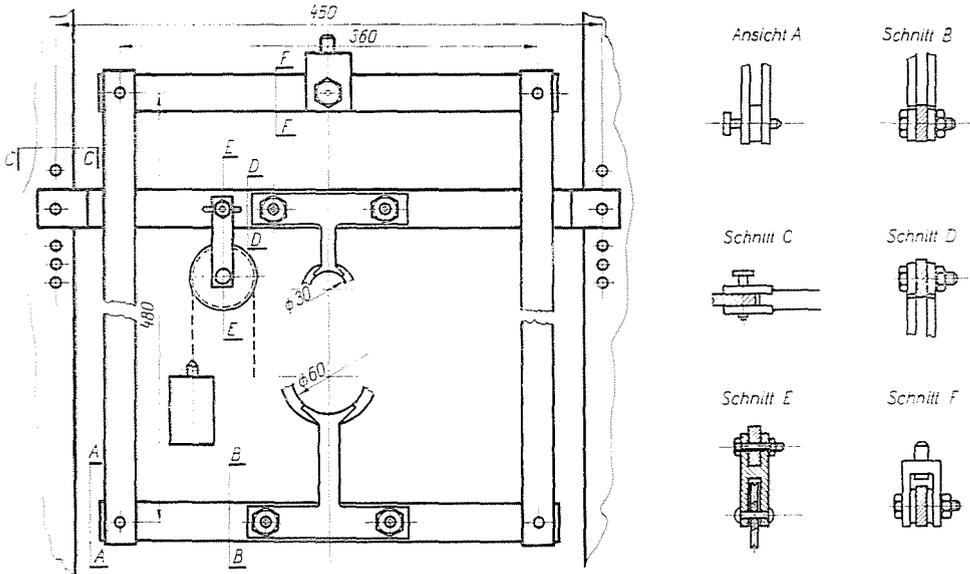


Abb. 6. Pleuelstangen-Spannvorrichtung für Druckbelastungen

senkrechte Stange, die mit dem Waagebalken verbunden ist, schließt sich an eine waagrechte Stange an, deren Enden mit je zwei flachen Stahlstücken versehen sind. Die unteren Enden derselben sind wieder mit einer waagrechten Stange verbunden. Dadurch ergibt sich ein Gelenkparallelogramm, welches 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 die untere und obere waagrechte Stange sind gewölbte Flächen angeschraubt, in denen sich jene Zapfen befinden, die in die Bohrung des Pleuelstangenmodells eingreifen. Damit übt das Gewicht in der Waagschale über die Zapfen eine Druckbelastung auf das Modell aus. Ein Problem bei der Ausbildung der Konstruktion stellte die Erfüllung der Forderung einer möglichst geringen Verdeckung des Modells dar. Wie aus der Abbildung ersichtlich, verdeckt der Druckrahmen nur den unteren und den oberen — unbelasteten — Stangenkopfteil.

Bei der Herstellung des Belastungsrahmens wurde besondere Sorgfalt auf gemeinsame Bearbeitung der einzelnen Stangen und Bohrungen sowie darauf gelegt, daß die gewölbten Flächen die Zapfen gemeinsam aufnehmen bzw. tragen. Die Verbindungszapfen der ganzen Konstruktion passen mit

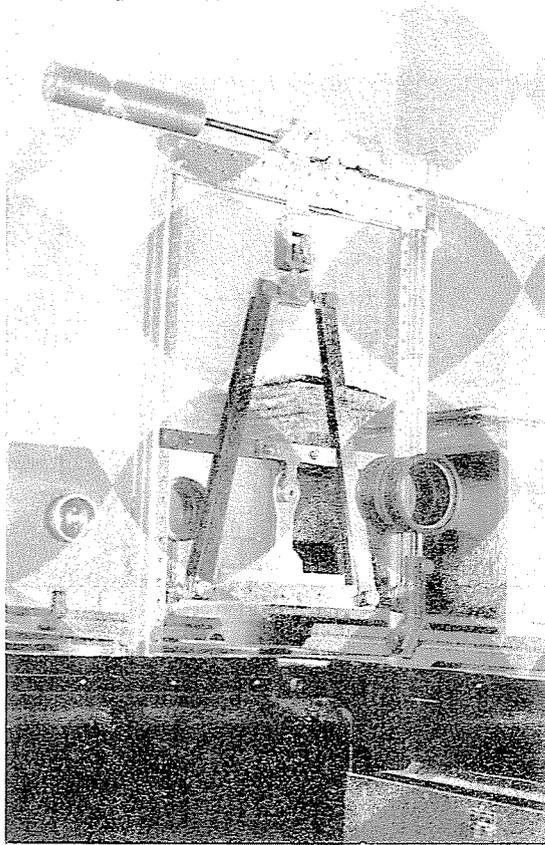


Abb. 7. Pleuelstangen-Spannvorrichtung für Druckbelastungen der kleinen Köpfe

geringem Spiel in die Bohrungen: die Ebene des Geräts steht zusammen mit dem Modell senkrecht im Strahlengang.

Bei jenen Modellen, an denen nur der obere, geschlossene Kopf geprüft wurde, gelangte eine etwas veränderte — der Modellausbildung besser angepaßte — Spannvorrichtung zur Anwendung. Dadurch, daß Modelle dieser Art unten eine waagrecht aufliegende Sohle besitzen, verfügt das untere Gestänge des gelenkparallelogrammartigen Rahmens über eine waagrechte Auflagefläche. Auf diese stützt sich die Sohle des Modells ab. Abbildung 7 zeigt eine Aufnahme des im Rahmen befestigten Modells.

7.2 Klemmbügel

Der untere, geteilte Stangenkopf wird bei der ausgeführten Pleuelstange durch eine Schraubenverbindung zusammengeklemmt. Beim Modell wird diese Wirkung durch Klemmbügel hervorgerufen (Abb. 8). Bei der Ausführung der Bügel waren zwei Gesichtspunkte maßgebend: leichte Einstellbarkeit bzw. Meßbarkeit der Klemmkraft, und eine Konstruktion, die unter den gegebenen Raumverhältnissen eine Modellverdeckung verhindert. Unter den verschiedenen Ausführungsarten wurde ein halbkreisförmiges federndes Dyanometer gewählt. Die Meßuhr ist im inneren Teil des Klemmbügels angeordnet und zeigt beim Spreizen des Bügels die elastische Verformung an. Das Festklemmen

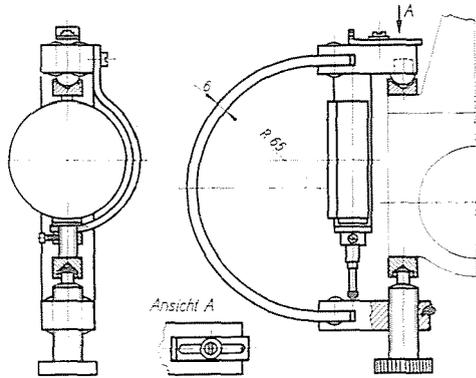


Abb. 8. Klemmbügel zum geteilten Pleuelstangenkopf

erfolgt mit Hilfe einer Gewindespindel, die sich am unteren Bügelteil befindet. Auf der Druckfläche 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 Meßuhren ausgerüsteten Bügel gesondert geeicht werden. Die Einstellung der Belastung erfolgte anhand von Eichungsdiagrammen.

Zur Ausschaltung der Wirkung des Eigengewichts befindet sich am Oberteil der Bügel eine Öse, durch die der Bügel an einen Draht aufgehängt wird, wodurch die Wirkung seines Eigengewichts aufgehoben werden kann.

7.3 Einspannvorrichtung zur Erzeugung der Zugbelastung

Den Hauptgesichtspunkt bei der Ausgestaltung der Einspannvorrichtung bildete die Gewährleistung einer reinen Zugbelastung des Modells und die Durchleuchtbarkeit sämtlicher kritischer Modellteile. In die Bohrungen der Pleuelstange wurden Stahlzapfen eingesetzt, die mit den doppelgelenkigen Zugösen durch Stahlplatten verbunden sind. Dadurch verdecken die Stahl-

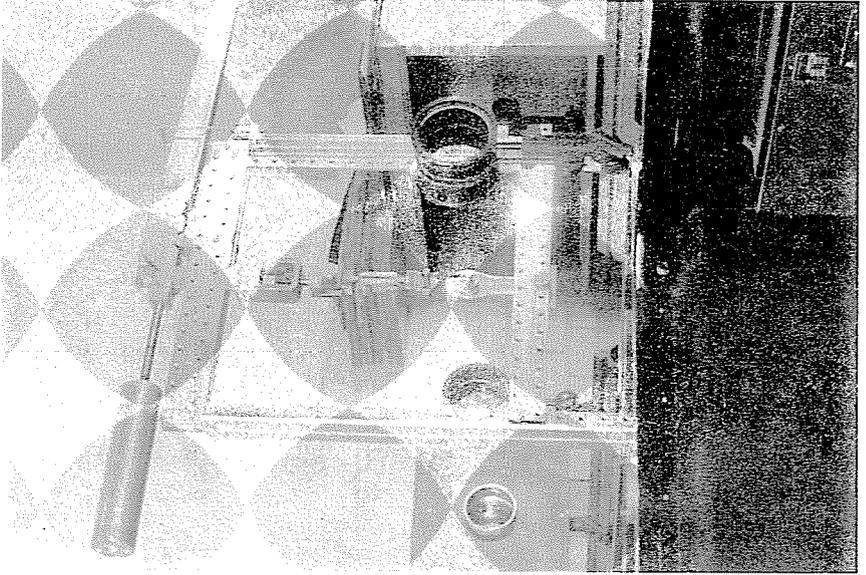


Abb. 10. Pleuelstangen-Spannvorrichtung für Zugbelastung der kleinen Köpfe

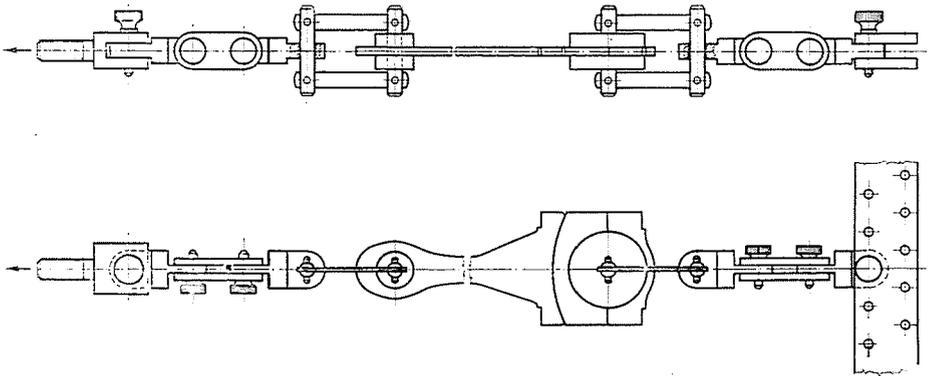


Abb. 9. Pleuelstangen-Spannvorrichtung für Zugbelastungen

platten das Modell nur geringfügig. Sie bieten eine Einstellmöglichkeit für die gelenkige Zugvorrichtung. Die Einspannvorrichtung veranschaulicht Abbildung 9.

Die Klemmbügel müssen selbstverständlich auch während der Zugbelastung angebracht werden, da die Schraubenklemmen auch in diesem Fall funktionieren müssen.

Die einfachen Modelle können durch Bohrungen im Sohlenteil mit dem unteren Rahmenstück verbunden werden, wodurch sie zur Aufnahme der Zugbelastung geeignet gemacht werden. Bohrungen im Sohlenteil der Modelle können auf den Pleuelstangenkopf keinen störenden Einfluß ausüben. Abbildung 10 veranschaulicht das im Spanrahmen befestigte Modell.

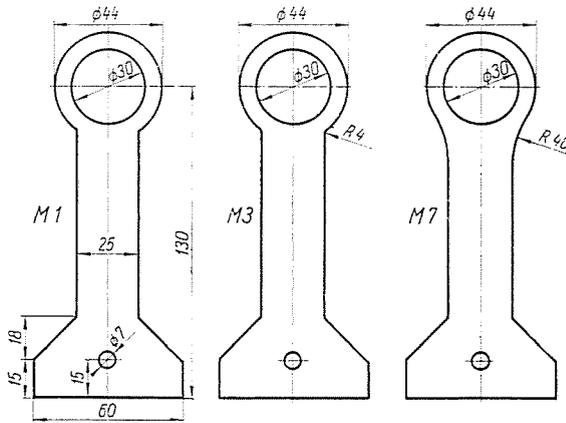


Abb. 11. Modelle geschlossener Pleuelstangenköpfe

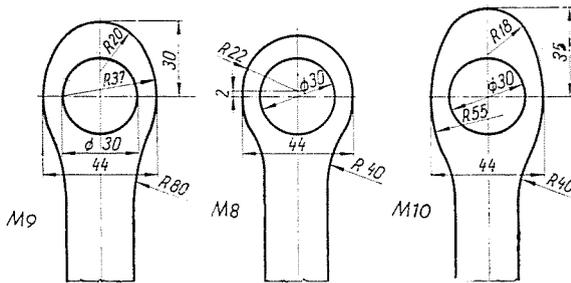


Abb. 12. Modelle geschlossener Pleuelstangenköpfe

8. Die Prüfungsumstände

Einen der am stärksten beanspruchten Teile der Pleuelstange bildet der kleine, geschlossene Kopf, in welchem der Kolbenzapfen sitzt. Die Größe

der Spannung, die durch die Belastung entsteht, hängt wesentlich von dem Spiel zwischen Zapfen und Bohrung sowie von der geometrischen Gestalt des Stangenkopfes ab.

Im Verlauf der Messungen wurden zehn verschiedene Modelle geprüft. Aus den Abbildungen 11 und 12 ist die Ausgestaltung der einzelnen Stangenkopfe ersichtlich. Die Form der Modelle M 1—M 7 tragen im wesentlichen den gleichen Charakter, lediglich die Übergangsradien an Kopf und Schaft sind verschieden. Die Krümmungsradien betragen bei den einzelnen Modellen

M 1 R = 0	M 5 R = 15 mm
M 2 R = 2 mm	M 6 R = 30 mm
M 3 R = 4 mm	M 7 R = 40 mm
M 4 R = 7 mm	

Als Merkmal der Modelle M 8—M 10 ist ihre Abweichung von der Kreisform zu erwähnen. Sie besitzen einen Umriss, der sich aus mehreren Krümmungsradien zusammensetzt. Die äußere Kontur verläuft nicht konzentrisch um die Bohrung. Dadurch wuchs die Kopfabmessung in der senkrechten Symmetrieachse an, und der Querschnitt 0—0 blieb in der waagrechten Symmetrieachse unveränderlich. Die kritische Querschnittabmessung, und der Stangenschaftsquerschnitt war bei jedem Modell gleich, der Vergleich der verschiedenen Modelle konnte also leicht vorgenommen werden. Die Dicke der Modelle betrug in jedem Fall 8 mm.

Das Spiel zwischen Stangenkopfbohrung und Zapfen wurde so geändert, daß die Modellbohrung konstant gehalten und Stahlzapfen mit verschiedenen Durchmessern verwendet wurden. Jedes einzelne Modell wurde mit sechs verschiedenen Zapfen, also sechs unterschiedlichen Spielwerten geprüft. In einem Fall betrug das Spiel Null, in den übrigen Fällen schwankte es zwischen 0 und 2,4 mm.

Die wichtigsten Ergebnisse der Druck- und Zugprüfungen sind im folgenden zusammengefaßt.

9. Drückprüfungen

Jedes einzelne Modell wurde gleichförmig mit einem Druck von 181,5 kp belastet. Die Isochromaten mit ihren Spannungswerten sind in kp/cm^2 beispielsweise für das Modell M 7 in den Abbildungen 13, 14 und 15 dargestellt. Mit der Erhöhung des Zapfenspiels verdichten sich die Isochromaten an den druckschlüssigen Stellen von Zapfen und Bohrung sichtlich, und das Modell erleidet mehr und mehr eine einer Punktbelastung entsprechende Beanspruchung. Dies zeigt sich auch daran, daß die gleichmäßige Spannungsverteilung im Pleuelstangenschaft unterhalb des Belastungspunktes beginnt, u. zw. bei erhöhtem Spiel in wachsender Entfernung von diesem.

Abbildung 16 zeigt die größte von σ_1 und σ_2 gerechnete Schubspannung (τ_{max}) bei Modell M 7 in Abhängigkeit vom Zapfenspiel unterhalb des Belastungspunktes sowie die größte Tangentialspannung (σ_{max}), die an der äußeren Faser am Übergang zwischen Stangenkopf und Stangenschaft entsteht.

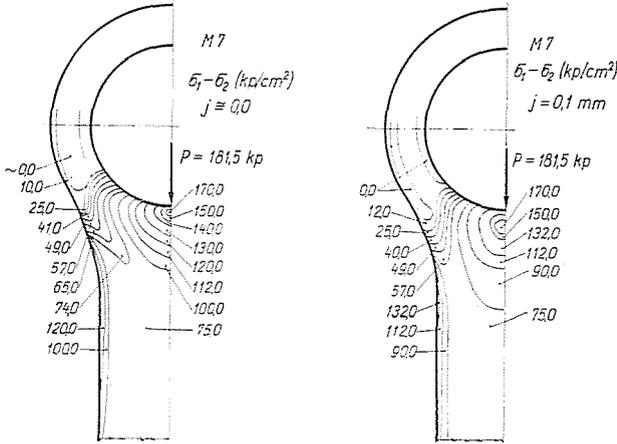


Abb. 13. Isochromaten-Schaubilder des geschlossenen Stangenkopfmodells M 7. Zapfenspiel: a) $j = 0$, b) $j = 0,1$ mm

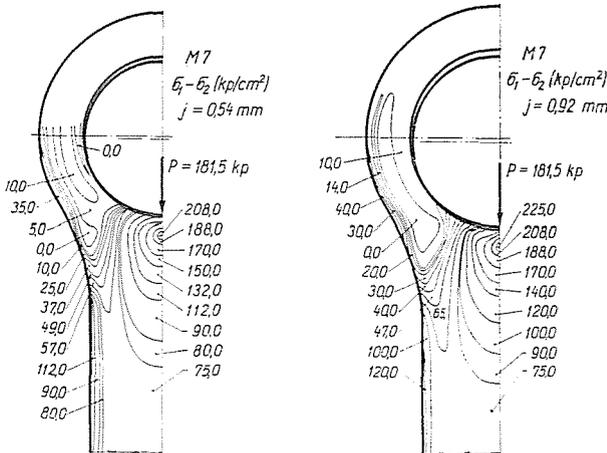


Abb. 14. Isochromaten-Schaubilder des geschlossenen Stangenkopfmodells M 7. Zapfenspiel: a) $j = 0,54$ mm, b) $j = 0,92$ mm

Nach Ermittlung der Spannungswerte an den zehn aufgezählten Modellen wurden die Schaubilder 17, 18 und 19 aufgetragen. Aus diesen lassen sich folgende Folgerungen ziehen:

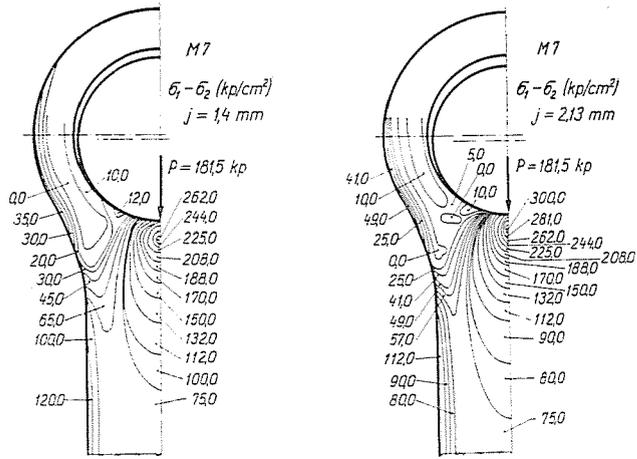


Abb. 15. Isochromaten-Schaubilder des geschlossenen Stangenkopfmodells M 7. Zapfenspiel: a) $j = 1,4$ mm, b) $j = 2,13$ mm

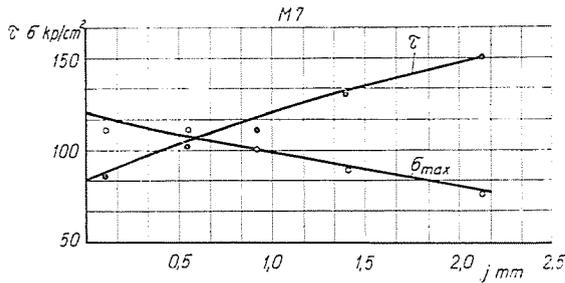


Abb. 16. Größte Schubspannungsänderung unterhalb des Kraftangriffspunktes und größte Tangentialspannungsänderung an den Übergangsrundungen von Modell M 7 in Abhängigkeit vom Zapfenspiel

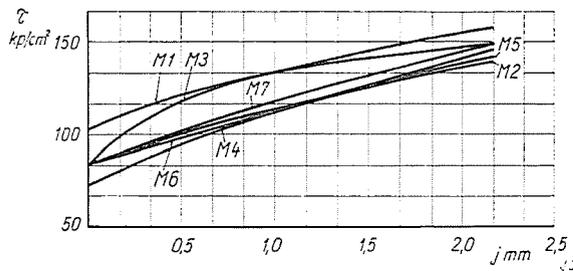


Abb. 17. Größte Schubspannungsänderung unterhalb des Kraftangriffspunktes bei den Modellen M 1—M 7 als Funktion des Zapfenspiels

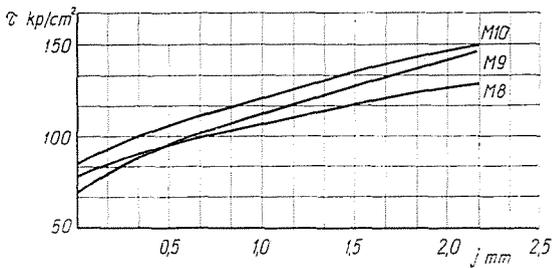


Abb. 18. Größte Schubspannungsänderung unterhalb des Kraftangriffspunktes bei den Modellen M 8—M 10, in Abhängigkeit vom Zapfenspiel

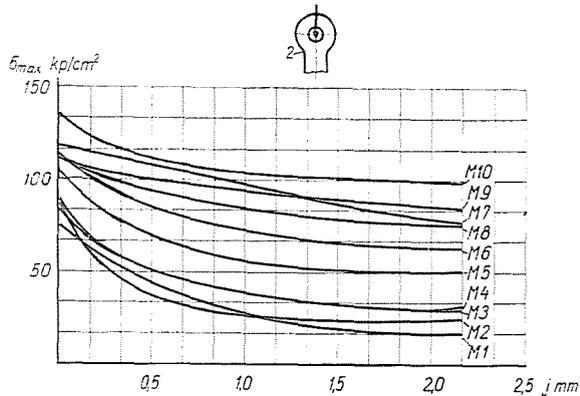


Abb. 19. Größte Tangentialspannungsänderung an den Übergangsrundungen der Modelle M 1—M 10, als Funktion des Zapfenspiels

a) Die größte Spannung entsteht nicht an der Oberfläche — wie dies für ähnliche Belastungen auch in der Fachliteratur bestätigt wird —, sondern im Inneren des Modells.

b) Der Wert der größten Schubspannung, die in der Belastungsenkrechten entsteht, erhöht sich mit wachsendem Zapfenspiel.

c) Bei Druckbelastung bildet sich die gleichmäßige Druckspannung bzw. der unveränderte Isochromatenordnungswert im Stangenschaft-Querschnitt längs der Senkrechten des Stangenkopfes erst in einem gewissen Abstand L vom Kraftangriffspunkt aus. Interessant ist die Tatsache, daß der Abstand L bei größeren Zapfenspielen bei sämtlichen Modellen im wesentlichen gleich ist. Bei kleinem Zapfenspiel, also bei wachsenden Übergangsradien, wie z. B. bei den Modellen M 5—M 10, weist L eine Tendenz zur Abnahme auf.

d) Betrachtet man die an den einzelnen Modellen festgestellten Schubspannungswerte τ_{max} , so kann festgestellt werden, daß sie sich bei gleichem Zapfenspiel größtmäßig nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Auch die Spannungsstelle von τ_{max} bleibt bei den geprüften Ausführungen im

wesentlichen gleich. Mit dem Blick auf die Tatsache, daß die geprüften Modelle vereinfachte Kopien der häufigsten praktischen Ausführungsformen darstellen, ist die Feststellung wichtig, daß die maximale Schubspannung durch die Stangenkopfform druckspannungsmäßig nicht beeinflußt wird. Der Faktor, der sie beeinflußt, ist das Zapfenspiel.

e) Der größte Tangentialspannungswert an den Übergangsrundungen sinkt mit wachsendem Zapfenspiel.

f) Bei Prüfung der größten Tangentialspannung an den Übergangsrundungen konnte festgestellt werden, daß an den Modellen M 1—M 7 bei einem gewissen Zapfenspiel mit wachsenden Krümmungsradien eine Spannungserhöhung eintritt. Das gleiche wurde bei den Modellen M 8—M 10 festgestellt.

Auf Grund obiger Feststellungen erübrigt es sich, bei Druckbelastungen die Spannungswerte an den Übergangsquerschnitten zu ermitteln oder einen Formfaktor zu bestimmen, weil hier keine wesentliche Spannungsspitze entsteht.

Árpád ZSÁRY, Budapest XI. Műegyetem rkp. 3. Ungarn.