

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift
" Nainen Kikan "
(Die Verbrennungskraftmaschine)
Band 4, Heft Nr. 36, Juni 1965, Seite 11-17

Verfahren zur Messung der an den Kurbelwellen angreifenden
Kräfte

von: Junichi Arai

Technische Forschungsanstalt der japanischen Marinearbeits-
gemeinschaft

ung ohne Genehmigung
icht gestattet
xemplare nur durch
en Übersetzer

1. Vorwort:

ustav Kraut
rmbrohn
Im Gäble 16

In den Motoren mit hin- und hergehendem Kolben ist die Kurbel-
welle eines der wichtigsten Teile; deshalb sind auch über die
Festigkeit der Kurbelwelle schon zahlreiche Forschungsarbeiten
durchgeführt worden.

Auch der Verfasser hat sein Interesse der Festigkeit der Kurbel-
welle zugewandt; schon seit einer Reihe von Jahren ist er da-
bei, an einem Modell einer einteiligen Kurbelwelle mit einer
Kröpfung den Biegespannungskonzentrationskoeffizienten zu unter-
suchen und nach einem Verfahren zur Berechnung der Spannungen
in mehrfach gekröpften Kurbelwellen zu forschen; er hat in die-
ser Richtung bereits eine Reihe von Forschungsarbeiten durchge-
führt.

Dabei bin ich von dem Gedanken ausgegangen, dass ein Verfahren
zur Berechnung der Spannungen in den mehrfach gekröpften Kurbel-
wellen über die Kenntnis der Spannungen in den mehrfach gela-
gerten Kurbelwellen, wie wir sie bei den praktischen Motoren
haben, ausserordentlich nützlich ist; ich bin bei der Berech-
nung jedoch so vorgegangen, dass ich zunächst einige Annahmen
gemacht habe, und, um mich zu vergewissern, ob diese Annahmen
im einzelnen richtig oder falsch waren, habe ich dann die

Ergebnisse der während des Betriebes an den Kurbelwellen praktischer Motoren vorgenommenen Spannungsmessungen gebraucht.

Berichte über Ergebnisse von während des Betriebes durchgeführten Spannungsmessungen an Kurbelwellen, sind in der Literatur jedoch ausserordentlich spärlich, so dass der Verfasser sich vor die Notwendigkeit gestellt sah, selbst derartige Messungen durchzuführen.

Die Gründe für das spärliche Vorhandensein von Beispielen praktischer Messungen sind darin zu suchen, dass man bei den bisherigen Messungen an Rotationskörpern ausschliesslich auf die Schleifringe angewiesen war. Diese Schleifringe haben jedoch folgende Nachteile:

- a. Man ist bei der Messung auf die Stellen begrenzt, an denen die Schleifringe angebracht werden.
- b. An den Kontaktstellen tritt ein erhebliches Rauschen auf.
- c. Insbesondere dann, wenn die gewöhnlichen, mit Kabeln (Drähten ?) arbeitende dynamische Dehnungsmesser verwendet werden, müssen die Eingangs- und Ausgangsspannungen der Dehnungsmeßbrücken über Schleifringe zugeführt und abgenommen werden, da jedoch die Ausgangsspannung ausserordentlich klein ist, so kann man das S-N-Verhältnis (das Rauschverhältnis für die Signale) nicht ausreichend gross nehmen, was eine Verringerung der Meßgenauigkeit bedeutet.

Was das unter b und c genannte Rauschen anbelangt, so hat man zwar dadurch, dass man für die Bürstenteile Quecksilber verwendet hat, sehr gute Ergebnisse erhalten, da jedoch die mehrfach gekröpften Kurbelwellen in einer Vielzahl von Lagern gelagert sind, so dass man im allgemeinen grosse Schwierigkeiten

hat, die bis zu den Schleifringen führenden Zuleitungskabel herauszuführen, so ist wohl der unter a genannte Nachteil als nahezu ganz verhängnisvoll zu betrachten. An einigen Versuchsmotoren hat man deshalb die Lagerzapfen und die Kurbelzapfen hohl ausgeführt, oder man hat an anderen Versuchsmotoren die Schmierlöcher zum Herausführen der Zuleitungskabel benützt und auf diese Weise die Messungen durchgeführt; ganz allgemein war man jedoch der Ansicht, dass die Messung der Spannungen in den Kurbelwellen nahezu ganz unmöglich sei.

Hand in Hand mit der modernen Elektronik, insbesondere mit der Entwicklung der Halbleiter, ist die Fernmeßtechnik sehr rasch vorwärts geschritten und auch für die dynamische Dehnungsmessung an Rotationskörpern ist man heute dazu übergegangen, drahtlos arbeitende Telemeter zu verwenden.

Die Vorteile derartiger drahtlos arbeitender Telemeter sind folgende:

- a. In der Wahl der Stellen für die Befestigung der Telemeter ist man nahezu unbeschränkt.
- b. Dadurch, dass man ein Frequenzmodulierungsverfahren anwendet, kann man den Einfluss von aussen kommender Störgeräusche nahezu ganz ausschalten.

Die Nachteile der drahtlos arbeitenden Telemeter sind folgende:

- a. Da die Telemeter mit Halbleiter arbeiten, so können sie bei hohen Temperaturen nicht verwendet werden.
- b. Da sich die Gleichgewichtsregler der Dehnungsmeßbrücken an der Seite der Rotationskörper befinden, so ist ein Eichen nach dem Anlauf des Motors schwierig.

Trotz dem unter a genannten Nachteil haben wir in Anbetracht der Tatsache, dass die Unbeschränktheit in der Wahl der Stellen für die Anbringung der Telemeter eine unerlässliche Bedingung für die Durchführung von Spannungsmessungen an Kurbelwellen darstellt, die Telemeter für unsere Messungen angewandt; und wir haben bis heute an einer ganzen Reihe von Motoren die Spannungen in den Kurbelwellen gemessen.

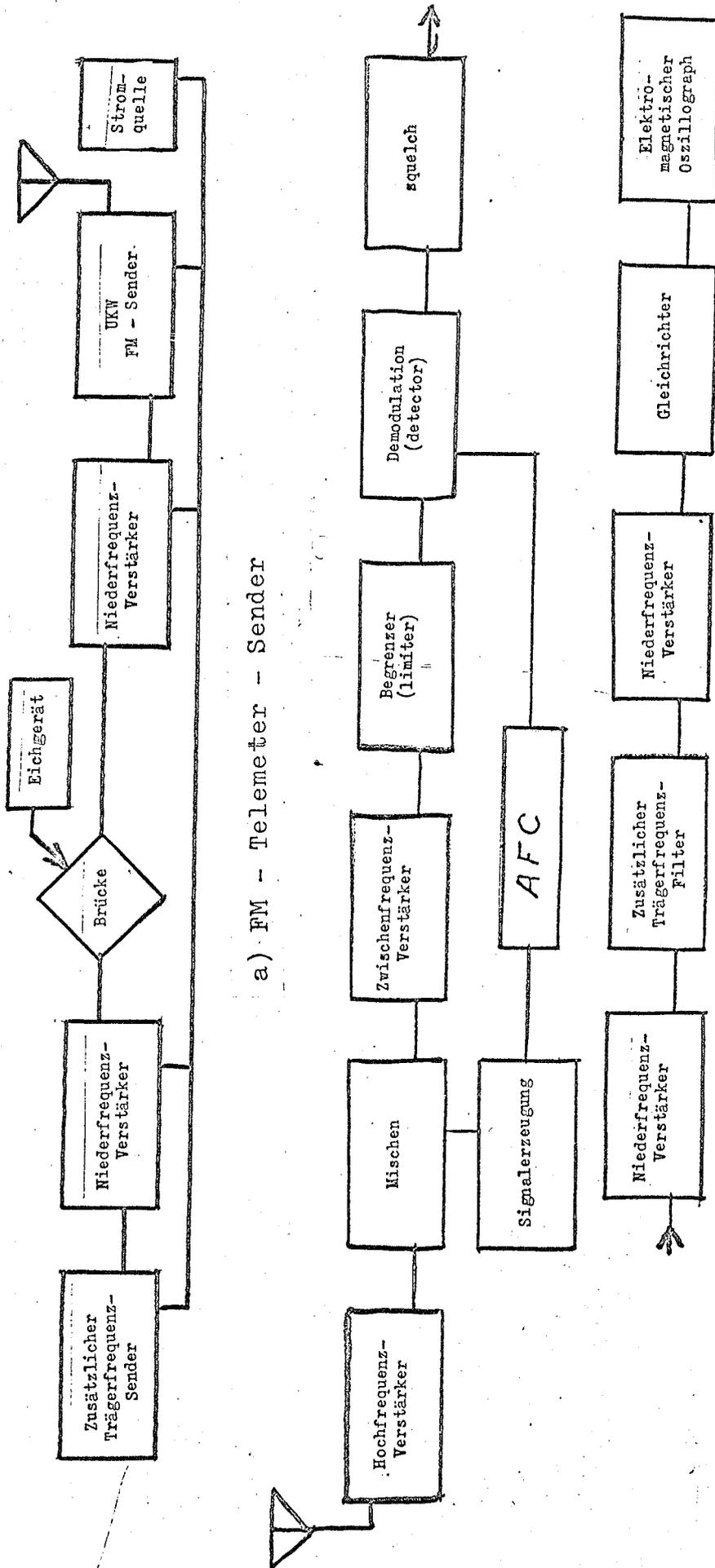
Die Ergebnisse haben gezeigt, dass man bei der Fernmessung der Spannungen in Kurbelwellen eine grosse Genauigkeit bekommt, ich will deshalb hier über dieses Meßverfahren berichten.

2. Das FM-Spannungstelemeter

Wir haben für unsere Messungen die von der Fa. AG. Primo vertriebenen FM-Spannungstelemeter verwendet, deren Konstruktion im Folgenden kurz erklärt werden soll:

Das FM-Spannungstelemeter besteht, wie die Abbildung 1 zeigt, aus einem Geberteil und einem Empfängerteil. In dem an dem Rotationskörper befestigten Geberteil werden die von einem zusätzlichen Trägerwellengeber erzeugten Niederfrequenzwellen von 2-4 kHz zunächst einmal verstärkt und auf die Dehnungsmeßbrücke gegeben; der zur Dehnung proportionale Ausgang der Dehnungsmeßbrücke wird entnommen, durch einen Dehnungsverstärker verstärkt, sodann in einen FM-Geber von ungefähr 40 MHz hineingegeben und dort in elektrische FM-Wellen umgeformt. Hierbei werden Halbleiter im höchsten Ausmaße verwendet.

Im Empfängerteil werden die genannten elektrischen FM-Wellen verstärkt und sodann, zum Zwecke der Ausschaltung des Einflusses von Störgeräuschen oder Änderungen der elektrischen Wellen



a) FM - Telemeter - Sender

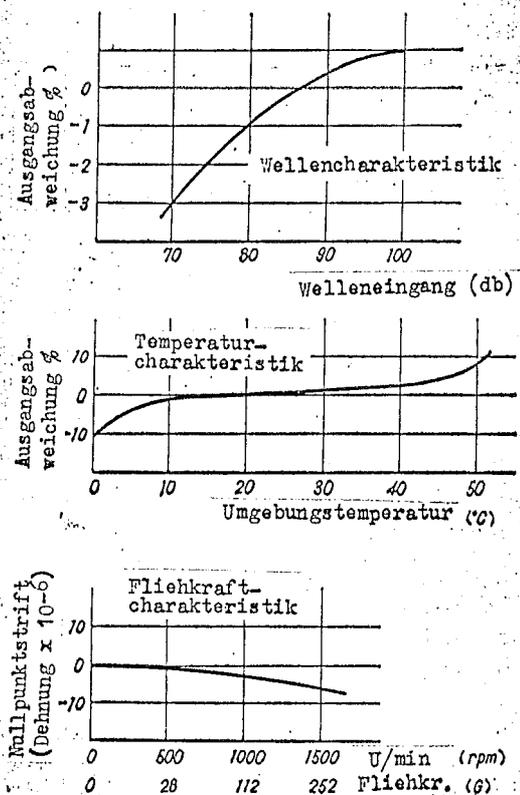
b) FM - Telemeter - Empfänger

Abbildung 1. Blockschema des FM - Telemeters

während der Drehbewegung über einen amplituden Begrenzer (limiter) geleitet und auf eine konstante Amplitude gebracht; danach werden sie demoduliert (detect) und auf die Form der Dehnungssignale korrigiert, nachdem man sie erneut verstärkt hat, werden sie in ein Aufzeichnungsinstrument gegeben und dort aufgezeichnet.

Beim Telemeter werden die zusätzlichen Trägerwellen-erzeuger der Sendeteile (Geberteile?) mit verschiedenen Frequenzen vorgesehen; diese verschiedenen Frequenzen werden dann zu den jeweils verschiedenen Dehnungsmessern, beispielsweise zu den Dehnungsmessern in den 3 Richtungen des Koordinatensystems, oder zu den für die Messung der Torsionsspannungen oder der Biegespannungen usw. bestimmten Dehnungsmessern gegeben, und die so erhaltene Vielzahl von Dehnungssignalen wird einer einzigen elektrischen FM-Welle aufgeladen und gesendet. Auf der Empfängerseite werden dann die demodulierten (detected) Dehnungssignale durch Filter hindurchgeschickt, durch welche nur die jeweiligen Trägerwellen hindurchgehen, und so ausgewählt (selected); auf diese Weise ist es möglich, die Dehnungen in den einzelnen Punkten je für sich getrennt aufzuzeichnen. Man hat also den Vorteil, dass man die Messung der Dehnung an den einzelnen Punkten mit Hilfe einer einzigen FM-Welle durchführen kann.

Die Abbildung 2 zeigt die Temperaturcharakteristik, die Zeitcharakteristik und die Zentrifugalkraftcharakteristik der Nullpunktswanderung (?) des Telemeters.



Die einzelnen durch die Normen vorgeschriebenen Daten des Telemeters

cross talk (Mischsignale)	0,4-0,7%
Linearität	innerhalb von 3%
Eichgenauigkeit	+ 1%
Schwingungscharakteristik (0-200 Htz)	1%
Feldcharakteristik	s. Abb. 2
Temperaturcharakteristik	s. Abb. 2
Fliehkraftcharakteristik	s. Abb. 2
Zeitcharakteristik, bei Verwendung von 2 Quecksilberbatterien	2%/h

Abb. 2 Die Charakteristiken eines FM-Spannungstelemeters

3. Der mechanische Aufbau des Telemetersenders für eine Kurbelwelle

Bei der Befestigung des Telemeters an der Kurbelwelle ist das Bohren von Gewindelöchern und dgl. in der Kurbelwelle, wenn die Gewindelöcher bei dem zu messenden Gegenstand über das Maß hinausgehen, welches man bei der Kurbelwelle eines praktischen Motors hat, absolut unzulässig.

Die für die gewöhnlichen Wellen verwendeten Telemeter werden, wie dies in der Abbildung 3 dargestellt ist, mit Weicheisenbändern festgespannt, im Falle einer Kurbelwelle jedoch haben wir keine Stellen, an denen wir derartige Bänder festmachen könnten, und deshalb haben wir Klebemittel verwendet, da ja in der jüngsten Zeit gerade auf dem Gebiete der Klebemittel ganz ausserordentliche Fortschritte gemacht worden sind. Mit Hilfe dieser Klebemittel haben wir die Telemeter an den Seitenflächen der Kurbelarme festgeklebt.

Als Klebemittel haben wir Epoxyharz verwendet; der Literatur entnehmen wir, dass die Zugfestigkeit des Epoxyharzes $6-9 \text{ kg/mm}^2$, seine Ermüdungsfestigkeit $0,07 - 0,15 \text{ kg/mm}^2$ ($N= 10^7$) betragen,

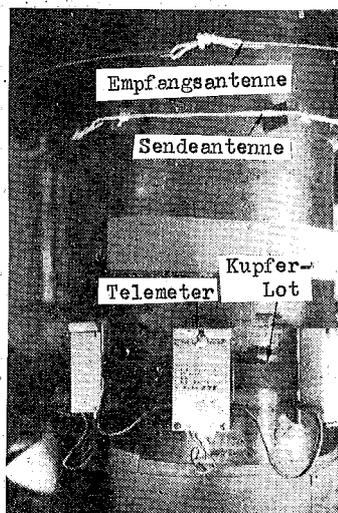


Abb. 3
Telemeter für Wellen

so dass man nach vollständiger Aushärtung eine ausreichende Festigkeit erhält.

Da die anfänglich für die Messung verwendeten Telemeter auch für die Messung der Spannungen in Wellen verwendet wurden, so hat man die Hauptträgerwellensignalerzeuger, die zusätzlichen Trägerwellensignalerzeuger und die Batterien je für sich in besondere Gehäuse eingebaut und auf den im voraus schon auf die Kurbelarme aufgeklebten Eisenplatten je einzeln befestigt; es hat sich jedoch gezeigt, dass dieses Verfahren in seinem Handhabungswirkungsgrad ausserordentlich schlecht ist. Bei den folgenden Messungen haben wir uns nun auf ein anderes Verfahren umgestellt, in dem wir die Telemeter im voraus auf dicke Aluminiumplatten schraubten und diese dann wiederum auf an den Kurbelarmen festgeklebte Bakelitgrundplatten aufschraubten; dadurch ist es uns gelungen, den arbeitsmässigen Wirkungsgrad wesentlich zu verbessern. Als wir jedoch nach Beendigung der Messungen das Innere der Telemeter untersuchen wollten, mussten wir feststellen, dass, obwohl wir auf Öldichtheit ganz besonders geachtet hatten, Öl eingedrungen war. Wenn insbesondere in die Potentiometer für die Regelung des Gleichgewichtes Öl eindringt, dann gibt es schlechte Kontakte, was zur Folge hat, dass an den Ausgangsklemmen eine allzu grosse Unwuchtspannung (wörtlich: Ungleichgewichtsspannung) entsteht und dass im Verstärkerstromkreis Schwingungen auftreten. Da derartige Schwingungen Frequenzen von einem ausserordentlich weiten Bereich enthalten, so können die Frequenzfilter des Signalempfängers ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen (?), es entstehen Mischsignale und die Folge ist eine erhebliche Verschlechterung der Meßgenauigkeit.

Unter Berücksichtigung der praktischen Erfolge bei dieser Art der Anwendung des Telemeters haben wir die im vorigen Jahre für die Messung der Spannungen an Wellen bereits verwendeten Telemeter erneut eingebaut und bei dieser Gelegenheit die Telemeter für die Anwendung bei Kurbelwellen zu verbessern versucht. Wir haben also ausgehend von den Gedanken, dass es überaus wichtig ist, das Eindringen des Schmieröles zu verhindern, die Telemeter, ohne sie irgendwie zu verändern, in vollständig öldichte Gehäuse aus Aluminiumguss eingebaut; die Abbildung 4 zeigt das Innere dieser Gehäuse.

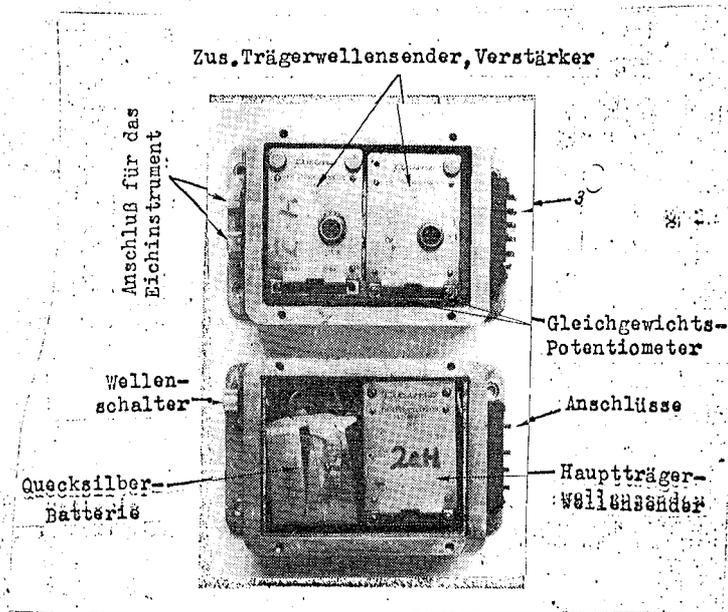


Abb. 4

Telemeter für Kurbelwellen

Der Erfolg der Anwendung dieser Aluminiumgehäuse war eine ganz wesentliche Verbesserung, und wenn nur der Einfluss der Temperatur nicht wäre, dann könnte man die gleiche Genauigkeit erwarten, wie bei den für die Messungen an Wellen bestimmten Telemetern. Die weiter unten aufgeführten Meßergebnisse hat man sämtliche mit dieser verbesserten Ausführungsform der Meßeinrichtung erhalten.

Da somit das öldichte Gehäuse ein grosser Erfolg war, so sind wir heute soweit, dass wir uns ganz und gar auf den Primo verlassen und unsere Messungen so geplant haben, dass an den bisher für die Messungen an Kurbelwellen gebrauchten Telemetern der grosse Umbau durchgeführt werden muss.

4. Eine Betrachtung über die Dehnungsmesser

Einer Kurbelwelle wird eine entsprechend grosse Menge von Schmieröl zugeführt, insbesondere bei den schnellaufenden Motoren, bei denen die Temperatur der Kurbelwelle ziemlich hoch wird, muss auch auf den Temperaturschutz der Dehnungsmesser selbst ganz besonders sorgfältig geachtet werden.

Der Zweck unserer Messungen richtete sich vor allem auf die Spannungen in den Hohlkehlen; da sich diese Hohlkehlen in unmittelbarer Nähe der Lager befinden, so ist zu erwarten, dass sich hier die Temperaturbedingungen von denen in den Kurbelwellen ganz wesentlich unterscheiden. Wenn die Messungen mit Dreirichtungsdehnungsmessern durchgeführt werden, dann ist zu befürchten, dass infolge der Temperaturänderungen sowohl im Dehnungsmesser wie auch im Telemeter eine Nullpunktswanderung (?) entsteht und da auch im Falle dieses Verfahrens sobald auch nur an einem Dehnungsmesser oder an einem Telemeter die Messung unbrauchbar ist, sofort die gesamten Meßergebnisse wertlos werden, so haben wir die in der Abbildung 5 dargestellte Schaltung angewandt und dadurch den Erfolg erzielt, dass wir die obenerwähnte nachteilige Beeinträchtigung der Ergebnisse auf ein Mindestmaß beschränken konnten.

Bei Verwendung einer derartigen Schaltung sind die Spannungen

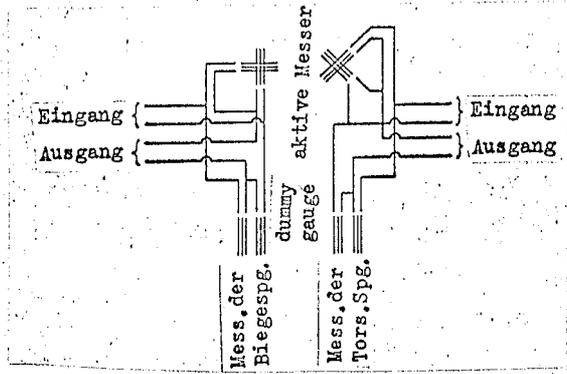


Abb. 5

für den Fall, dass der zu messende Gegenstand ein Rundstab ist, aus den Ergebnissen der Dehnungsmessungen durch folgende Gleichungen bestimmt:

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_m / (1 - \nu^2)$$

$$\tau_{xy} = E \cdot \epsilon_m / z(1 + \nu)$$

hierin sind σ_x = die Spannung in der Achsrichtung

τ_{xy} = die Querschnittsspannung

E = der Young'sche Modul

ν = die Poisson'sche Konstante (Querdehnungsziffer)

ϵ_m = der gemessene Dehnungswert

Wenn wir die beiden obigen Gleichungen nun auf die Hohlkehlen einer Kurbelwelle anwenden wollen, müssen wir einige Untersuchungen machen.

Auf die Kurbelarme wirkt sich die Explosionskraft als Druckkraft (d.h. als zusammendrückende Kraft) aus und es ist natürlich zu erwarten, dass auch die an den Hohlkehlen befestigten Dehnungsmesser diesen Einfluss erfahren.

Über diesen Punkt hat der Verfasser anlässlich seiner Untersuchungen des Spannungskonzentrationskoeffizienten bei Kurbelwellen bereits Untersuchungen angestellt, welche auf eine Lösung der Frage abzielten, in welcher Weise die auf die Kurbelarme wirkenden Druckkräfte die Spannungen in den Hohlkehlen beeinflussen. In dem Falle, wo an der Hohlkehle eine

Ausnehmung vorhanden ist, ist die Lage des höchsten Spannungswertes, wie man aus der Abbildung 6 ansehen kann, mehr in der Mitte des Armes. Der Einfluss der auf den Arm wirkenden Druckkräfte wird leichter aufgenommen, andererseits ist in dem Fall wo keine Ausnehmung vorhanden ist, ein Einfluss der Druckkräfte nahezu überhaupt nicht festzustellen.

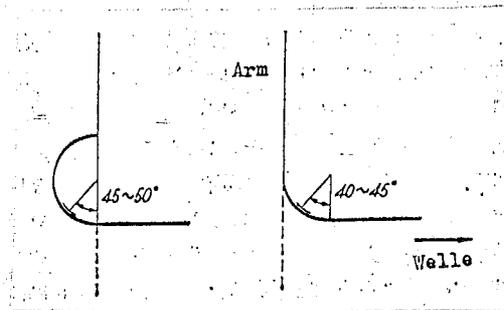


Abb. 6 Die Punkte, an denen die Biegespannung in den Hohlkehlen einen max. Wert annimmt

Die Dehnungsmeßbrücke ist aus den obenerwähnten 2 aktiven Dehnungsmessern und 2 Leerlauf-Dehnungsmessern aufgebaut; da in einem Telemeter keine Leerlauf-Dehnungsmesser eingebaut sind, so werden an den Stellen der Kurbelarme, an welchen voraussichtlich die niedrigsten Spannungen auftreten, zwei Einrichtungsdehnungsmesser aufgeklebt und als Leerlauf-Dehnungsmesser genommen. Um unseren Arbeitswirkungsgrad zu erhöhen, haben wir, wie in der Abbildung 7 dargestellt, auf einem 0,8 mm starken Messingblech Leerlauf-Dehnungsmesser und Folienanschlüsse aufgeklebt und so den Block mit den Leerlauf-Dehnungsmessern im voraus hergestellt; dadurch, dass wir diesen Block mit Epoxyharz geklebt haben, konnten wir unsere Arbeitszeit verkürzen. Bei den Aktiv-Dehnungsmessern haben wir die Dehnungsmesser auf Polyesterbasis unter Verwendung eines Klebemittels aus

Polyesterharz befestigt, und nach Fertigstellung der ganzen Schaltung haben wir das ganze mit einem Überzug aus Epoxyharz versehen.

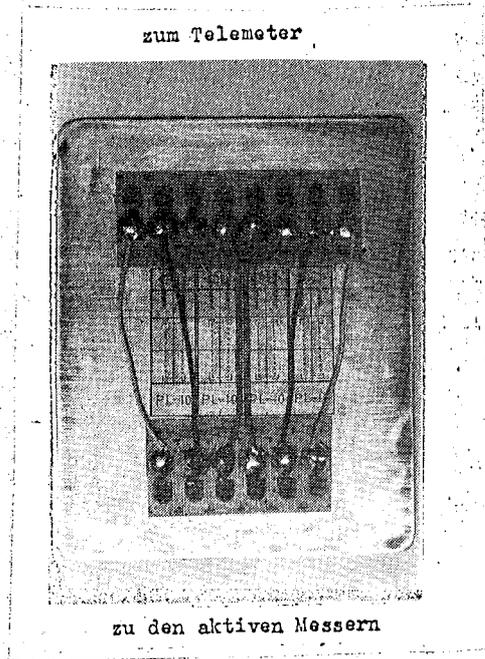


Abb. 7
Leerlaufspannungsmesserblock (dummy gauge)

5. Die Erdung des Telemetersenders, sowie die Antennen für den Sender und für den Empfänger

Da es sich bei der Hauptträgerwellenfrequenz um Ultrakurzwellen von 40 Mhz handelt, so muss bei der Verwendung von Telemetern der Sender vollständig geerdet werden.

Da jedoch im Falle der Kurbelwelle die Grundplatte mit Hilfe eines Klebemittels festgeklebt ist, so bekommt man einfach durch die blosse Befestigung noch keine Erdung; in diesem Zustand haben wir die Erfahrung gemacht, dass, ohne dass die Anzeige des Eingangsniveaus des Signalempfängers stabilisiert wird, wenn wir in diesem Zustand eine Welle ganz ruhig einmal zu drehen versuchen, an einer bestimmten Stelle das Eingangsniveau überaus stark absinkt. Wenn wir in diesem Zustand eine Messung ausführen, dann haben wir zwar die Absicht, eine Dehnungsmessung zu bekommen, wir müssen jedoch sehr vorsichtig sein und sorgfältig die Änderung des Eingangs des

Signalempfängers untersuchen. In unserem Falle haben wir die Grundplatte mit Gewindelöchern von 5 mm Durchmesser versehen, und nachdem die Grundplatte vollständig angeklebt war, haben wir am Grund der Löcher das Klebemittel entfernt und kleine Schrauben eingeschraubt. Auf diese Weise haben wir die Telemeter geerdet und so eine vollständige Beseitigung der Änderung des Eingangsniveaus erzielt.

Bei Verwendung einer Abstimmungsantenne kommt mit gutem Wirkungsgrad auf ein Telemeter eine Antenne von $1/4$ Wellenlänge. Diese Antenne wäre zwar, da die Welle nur ganz dünn ist, zu lang, man schneidet sie deshalb jedoch nicht ab, sondern wickelt sie zwei oder auch dreimal herum oder man muss sie einfach in Falten legen. Die Länge des Antennendrahtes bildet also kein nennenswertes Problem.

Die Befestigung der Sendeantenne geschieht derart, dass man an den Kurbelarmen die Antennenstützen anklebt (an kleinen Bakelitsäulen hat man Löcher gebohrt, durch welche der Antennendraht hindurchgeführt wird).

Die Empfängerantenne wurde ebenfalls dadurch befestigt, dass man an der Wand des Kurbelgehäuses Antennenstützen festgeklebt hat, da jedoch das Andrücken bis zum vollständigen Festkleben ein lästiges Problem darstellt, so haben wir die Sache so gemacht, dass wir überzogene Leitungsdrähte an langgestreckten Magneten festgebunden haben, an diesen Magneten haben wir das Klebemittel angebracht und die Magnete auf diese Weise an den Wänden des Kurbelgehäuses befestigt; dadurch ist es gelungen, das unangenehme Problem des Andrückens auf einfache Weise zu lösen. In der Zukunft haben wir die Absicht, auch die Stützen

der Sendeantennen in ähnlicher Weise durch Verwendung von Magneten zu befestigen

6. Praktische Meßbeispiele

Zum Schluss wollen wir noch ganz überschlägig einige Beispiele praktischer Messungen, die wir in der letzten Zeit ausgeführt haben, besprechen und erklären.

6.1 Die praktische Messung der Spannungen in der Kurbelwelle des Motors Sulzer 12RD90 der Fa. Ishikawajima Harima K.K

Unter Verwendung von 3, in einem öldichten Gehäuse untergebrachten Linientelemetern (?) haben wir bei einer Probefahrt des Schiffes Kirishima Maru der Shokoku-Seetransportgesellschaft in der Heckseitigen Kurbelzapfenhohlkehle der Kröpfung Nr. 5 und in der Bugseitigen Kurbelzapfenhohlkehle der Kröpfung Nr. 12 die Biegespannungen und die Torsionsspannungen gemessen.

Für die Messung hatten wir folgende Vorbereitungen getroffen: An dem Kurbelzapfenlager hatten wir die unterseitige Lager-schale herausgenommen und in den Hohlkehlen die Dehnungsmesser mit aufgeklebten Leerlaufspannungsmessern (dummy gauge) verbunden; sodann hatten wir die Lager wieder in ihren ursprünglichen Zustand gebracht, und dann die Sender, die Sende- und Empfangsantennen usw. eingebaut und einreguliert. Mit diesen Arbeiten waren 4 Mann 28 Stunden lang beschäftigt.

Da es sich hier um ganz grosse Motoren handelte, so war für diese Arbeiten im Kurbelgehäuse ausnahmsweise viel Platz vorhanden.

Da die Temperatur in dem Kurbelgehäuse niedrig war, so verwendeten man 4 Quecksilberbatterien, 1 Stunde vor dem Auslaufen (5 Uhr morgens) und nach dem Einlaufen nach beendigter Ver-

suchsfahrt um 8 Uhr abends wurden die Dehnungseichwerte sowie die Nulllinie aufgezeichnet; die beiden Aufzeichnungen stimmten nahezu vollständig mit-einander überein, so dass man also von einer Nullpunktswanderung nahezu überhaupt nicht sprechen konnte. Die Abbildung 8 zeigt die Stellen, an denen die Dehnungsmesser aufgeklebt waren und die Befestigung der Telemeter; die Abbildung 9 zeigt Beispiele der praktischen Meßergebnisse. In der Abbildung 10 haben wir sodann einen Vergleich unserer bei den praktischen Messungen erhaltenen Ergebnisse mit den schon oben erwähnten theoretisch errechneten Werten durchgeführt; wie man aus der Abbildung 10 ersieht, stimmen die Werte nicht gerade gut miteinander überein. Den Grund hierfür möchte ich darin sehen, dass die Ergebnisse doch wohl stark dadurch beeinflusst waren, dass die Drehzahl bei diesen Motoren sehr nahe bei dem Resonanzpunkt der Torsionsschwingungen von 1 Knoten und 3 Ordnungen des Motors lagen; hierüber habe ich bisher in der Literatur noch keine Angaben gefunden.

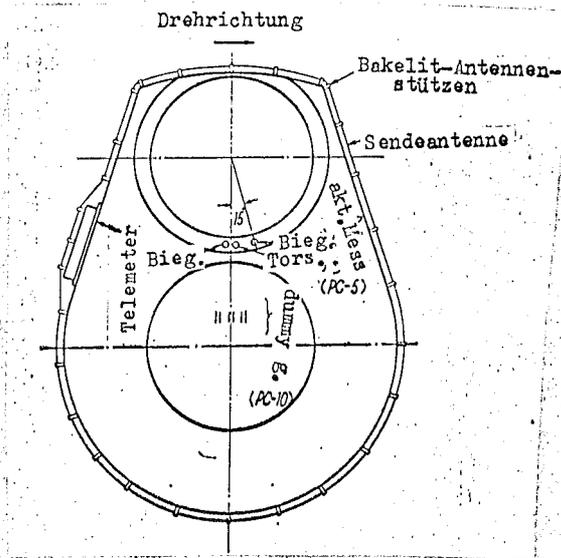


Abb. 8 Die Befestigung der Dehnungsmesser und des Telemeters

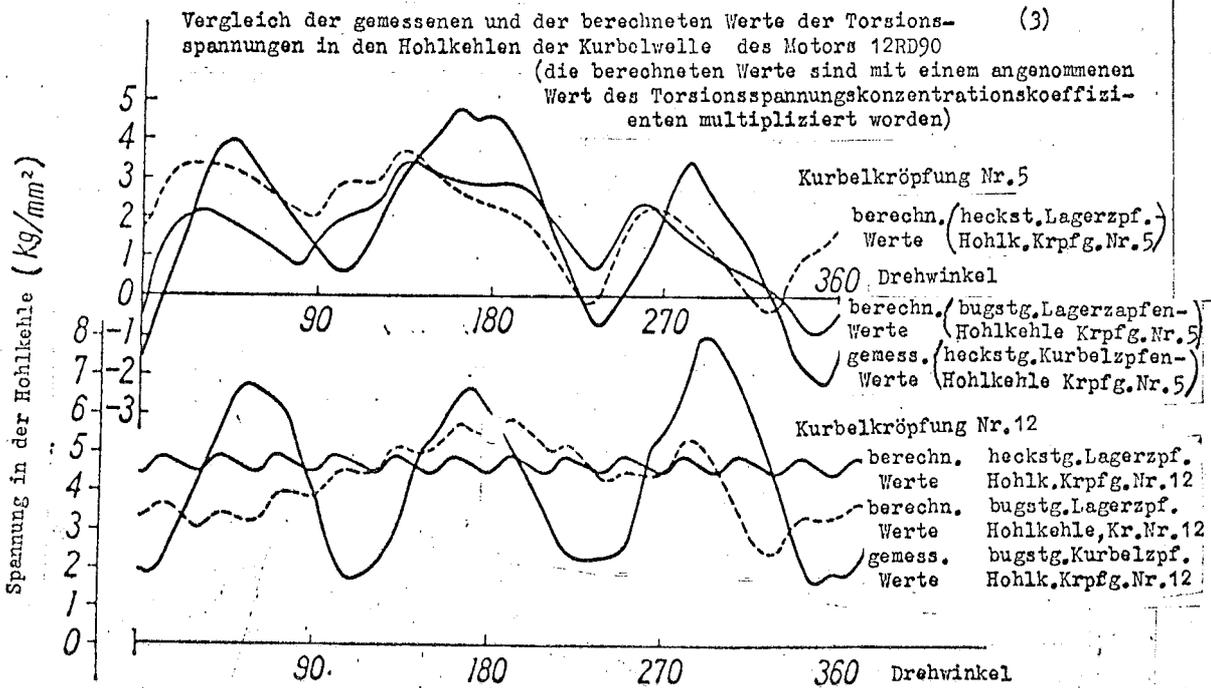
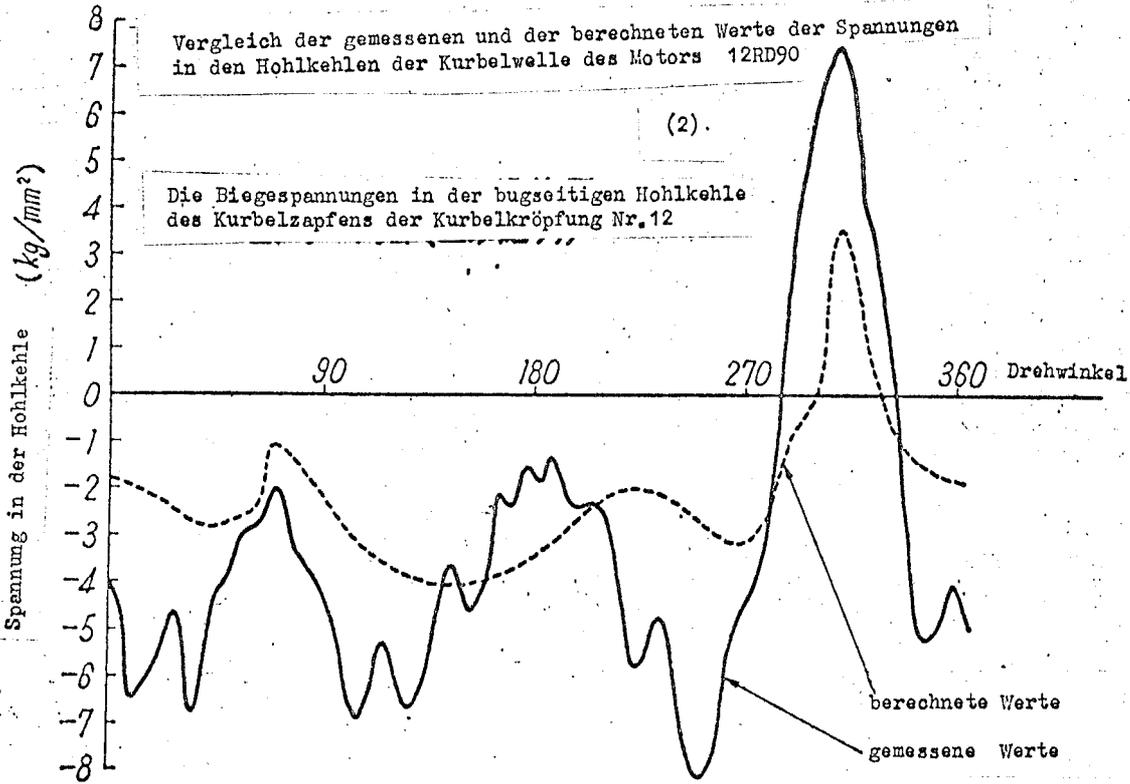
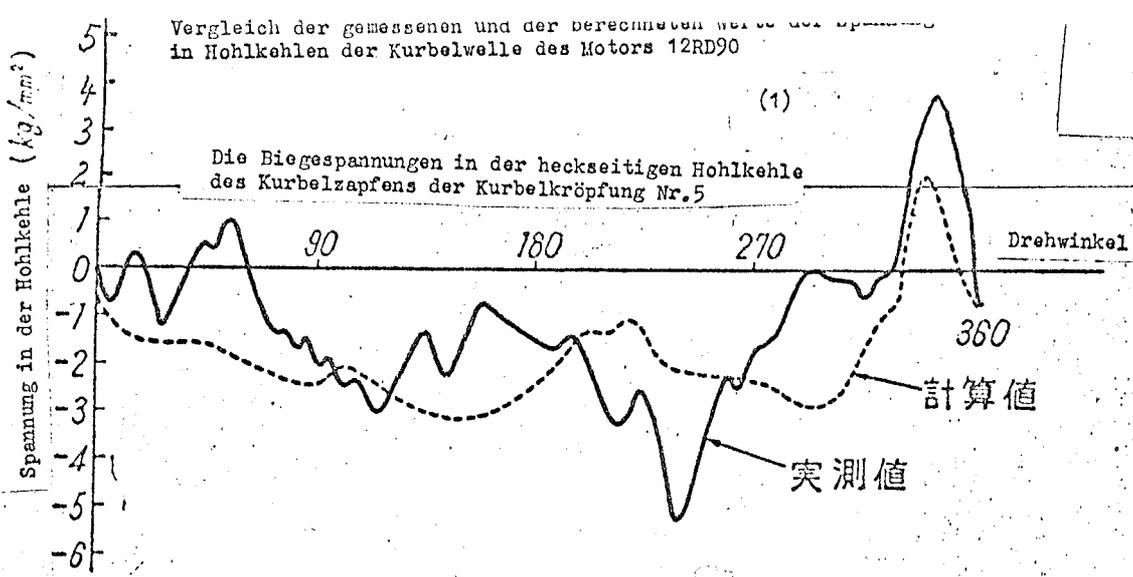


Abbildung 10 Vergleich der gemess. u. der berechn. Spannungswerte der Kurbelwelle des Motors 12 RD 90

6.2 Der Motor Yokohama-MAN V8V 30/42AL des Motorgenerators für den elektrischen Antrieb des Südpolerkundungsschiffes "Fuji"

Am 9. Dezember 1964 haben wir während einer Küstenversuchsfahrt in der bugseitigen Kurbelzapfenhohlkehle der Kröpfung Nr. 5 und in der heckseitigen Kurbelzapfenhohlkehle der Kröpfung Nr. 8 die Biegespannungen und die Torsionsspannungen gemessen.

Von 10 Uhr nachts des 8. Dezember bis zum Mittag des darauffolgenden 9. Dezembers haben wir die Messung vorbereitet und die Meßeinrichtungen anschliessend einreguliert; die Messungen waren abends um 6.30 Uhr beendet.

Da das Kurbelgehäuse sehr eng war, so konnte man sich in dem Kurbelgehäuse nicht bewegen, es war deshalb äusserst mühevoll, die Dehnungsmesser an den Kurbelzapfenhohlkehlen festzukleben und die Kabelverbindungen anzubringen. Da sich auch das Andrücken beim Festkleben der Empfängerantenne nicht geschickt machen liess, so brauchte man hierzu unerwartet viel Zeit; die Folge davon war, dass man die ganze Nacht hindurch noch nicht einmal zum Schlafen kam.

Was die Telemeter anbelangt, so hat man, wie in der Abbildung 4 dargestellten zusätzlichen Trägerwellensignalerzeuger (2 Linien) und die Hauptträgerwellensignalerzeuger, sowie die Quecksilberbatterien (4 Stück) jeweils in besondere Aluminiumgehäuse eingebaut und so verwendet.

Die Abbildung 11 zeigt ein Beispiel der Aufzeichnung des Oszillographen, während in der Abbildung 12 die praktisch gemessene Wellenform mit den Rechenergebnissen verglichen wird. Da die Spannungen in der Kröpfung Nr. 8 wegen einer Störung im

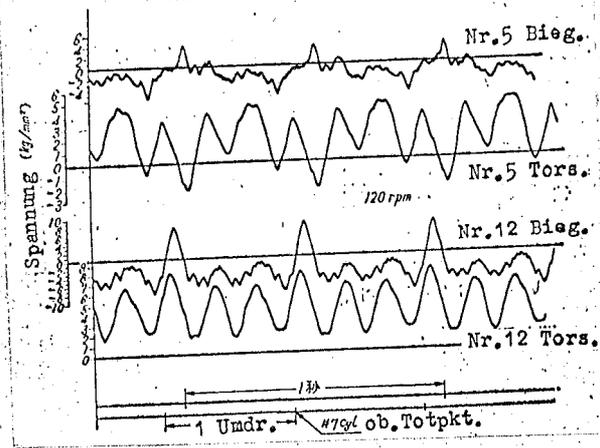


Abb. 9 Die Ergebnisse der praktischen Spannungsmessungen an dem 12 Zyl.-Sulzer-Motor RB 90

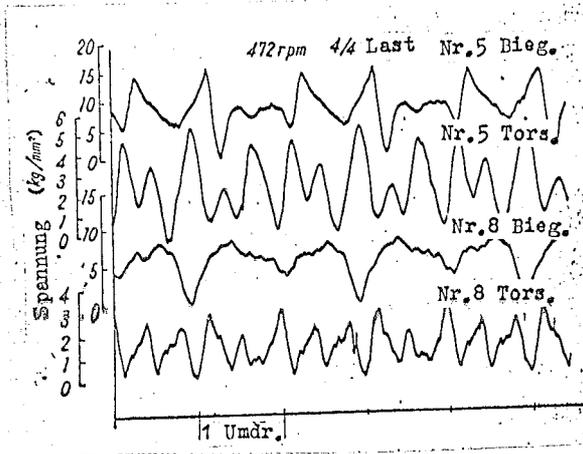


Abb.11a Die Ergebnisse der Spannungsmessungen an der Kurbelwelle des Motors Jokohama-MAN V8V 30/42 AL

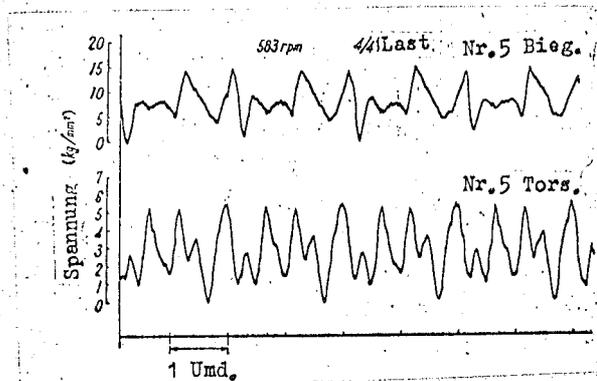


Abb.11b Die Wellenform der Spannungen der Kurbelwelle des Motors Jokohama-MAN V8V 30/42 AL

Telemeter bei 600 U/min nicht gemessen werden konnten, so haben wir den Vergleich mit den bei 500 U/min erhaltenen Meßergebnissen dargestellt.

Aus diesen Ergebnissen sieht man deutlich, dass im Falle des von uns gemessenen Motors zwischen den praktisch gemessenen Werten und den berechneten Werten eine starke Wechselbeziehung vorhanden ist, wir dürfen dabei jedoch nicht vergessen, dass in dem von uns gemessenen Motor eine Torsionsschwingungsdämpfungseinrichtung eingebaut war, und dass deshalb die von diesen Schwingungen herrührenden zusätzlichen Spannungen äusserst klein waren, was ganz sicher der Grund dafür war, dass bei uns die praktisch gemessenen Werte mit den berechneten Werten sehr gut übereinstimmten.

Da weiterhin im Falle des von uns gemessenen Motors die Temperatur im Kurbelgehäuse ausserordentlich hoch war, so haben wir ungefähr alle 2 Stunden 4 mal nacheinander zum Zwecke der Eichung die Dehnungswertnulllinie aufgenommen, da wir jedoch eine starke Nullpunktswanderung und erhebliche Änderungen der Empfindlichkeit feststellten, so haben wir die Amplituden der praktisch gemessenen Werte durch Vergleich mit den Eichwerten bestimmt. Die Nulllinie haben wir so festgelegt, dass ihre Wellenform im Wesentlichen mit den berechneten Werten übereinstimmte.

6.3 Der Motor 8UAKKS der Fa. Kinoshita Eisenwerke K.K.

Wir haben die Messungen während der Fahrt auf dem der japanischen Dampfschiffahrts-AG. gehörenden Schiff "Shinei Maru" (zwischen Osaka und Moji) durchgeführt.

Die Vorbereitungen für unsere Messungen haben wir, während

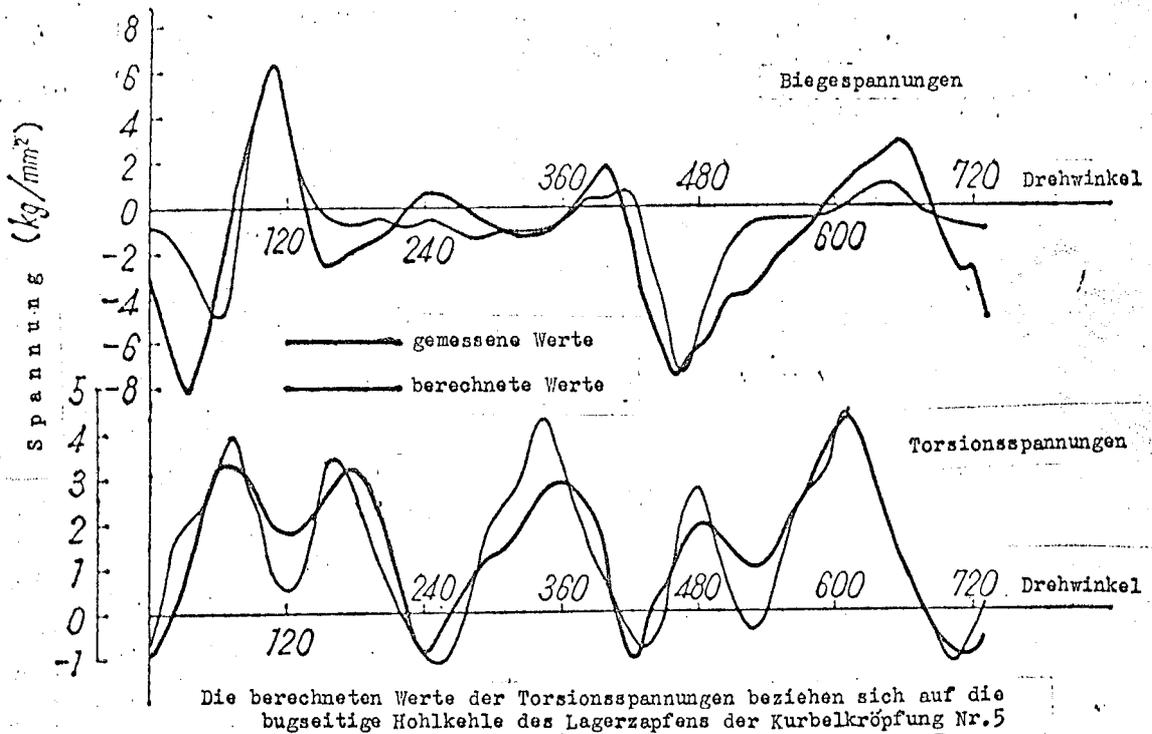


Abb.12a Vergleich der berechneten und der praktisch berechneten Werte der Spannungen in den Hohlkehlen des Kurbelzapfens Nr. 5 der Kurbelwelle des Motors Jokohama-MAN V8V 30/42 AL bei 600 U/min und 4/4 Last

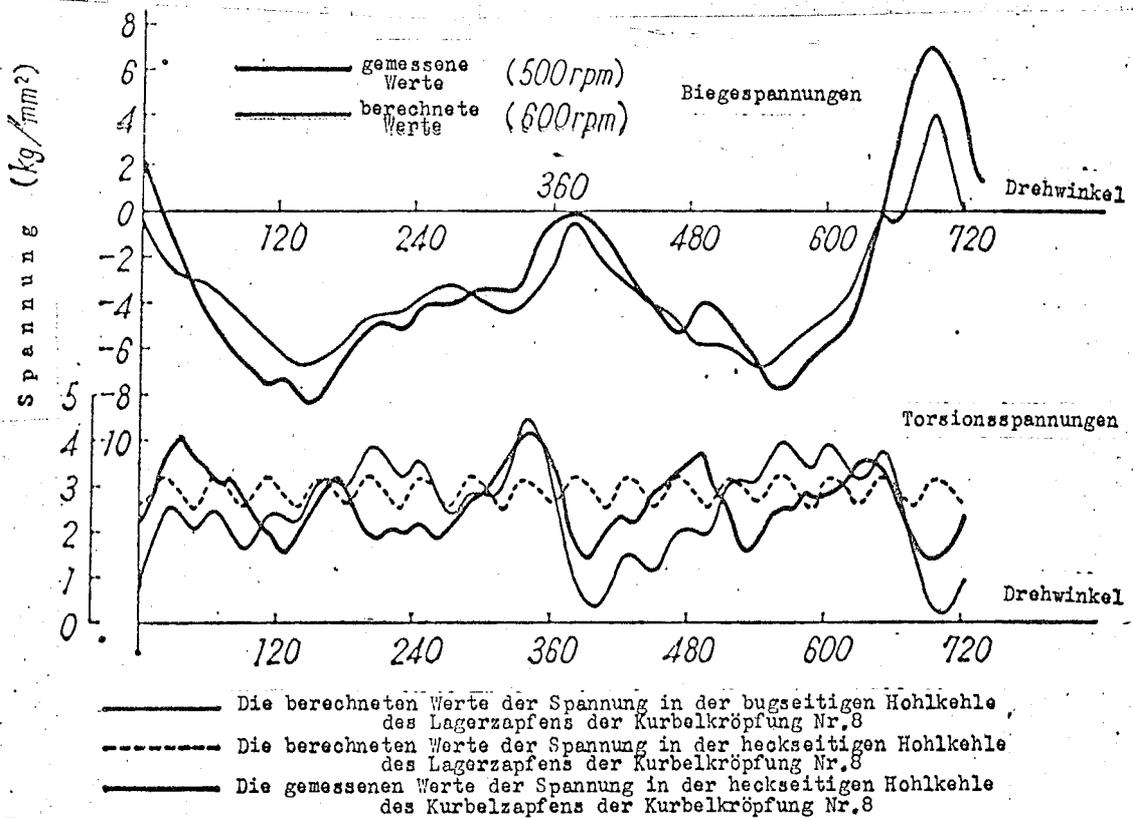


Abb.12b Vergleich der bei 500 U/min und 4/4 Last praktisch gemessenen Werte und der für 600 U/min berechneten Werte der Spannungen in den Hohlkehlen des Kurbelzapfens Nr. 8 der Kurbelwelle des Motors Jokohama-MAN V8V 30/42 AL

das Schiff im Hafen von Osaka lag und Ladung einnahm, mitten in der Nacht durchgeführt; wir haben dazu mit 3 Mann ungefähr 18 Stunden gebraucht.

Unsere Messungen bezogen sich auf die bugseitigen Lagerzapfenhohlkehlen der Kröpfungen Nr. 5 und Nr. 8; jedoch auch bei diesem Motor war das Kurbelgehäuse ausserordentlich eng, und da zudem die Meßstellen in den Lagerzapfenhohlkehlen lagen, so war die Arbeit bei der Anbringung der Meßeinrichtungen ausserordentlich erschwert. Da wir jedoch hierbei erstmals die oben erwähnten Leerlaufspannungsmesserblöcke, sowie die mit Magneten befestigten Antennenstützen usw. verwendeten, so konnte dadurch der Arbeitswirkungsgrad einigermaßen erhöht werden. Die Abbildung 13 zeigt, wie wir dabei die Dehnungsmesser, die Telemeter, die Antennen usw. befestigt hatten.

Beim nachträglichen Einregulieren der Telemeter zeigte es sich, dass ein Telemeterdefekt war, so dass die Biegespannungen in der Kröpfung Nr. 5 nicht gemessen werden konnten.

Bei unseren Messungen wurden alle 2 Stunden die Eichwerte und die Nulllinie aufgenommen, da die Nulllinie jedoch eine mehr oder weniger grosse Wanderung zeigte, so haben wir sie so festgelegt, dass sie einigermaßen mit den berechneten Werten übereinstimmte und von den Eichwerten haben wir die nach der Messung aufgenommenen Werte angewandt.

Die vom Oszillographen aufgenommene Wellenform dieser Messungen ist in der Abbildung 14 dargestellt, während die Abbildung 15 den Vergleich der praktisch gemessenen Werte mit den berechneten Werten zeigt.

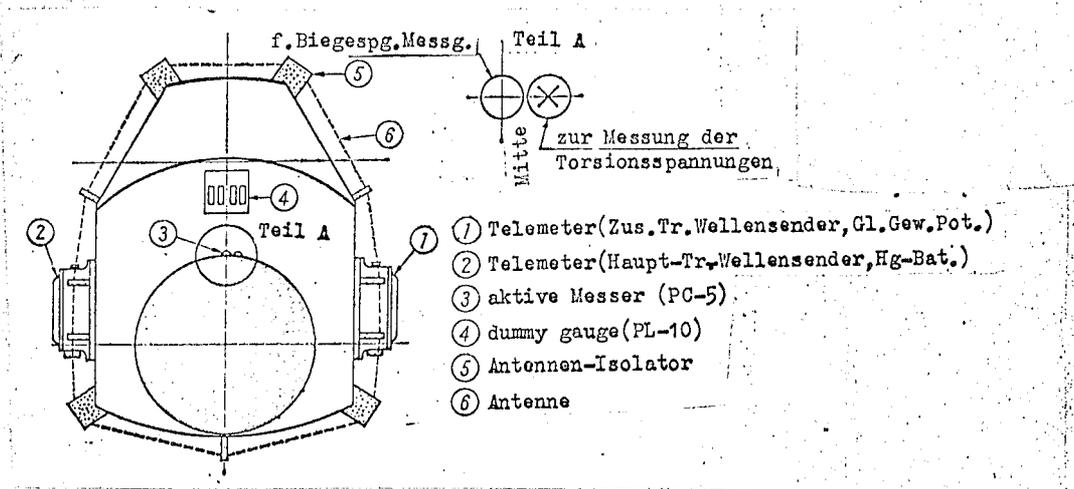


Abb. 13

Die Befestigung der Dehnungsmesser,
der Telemeter usw. bei dem Motor 8UAKKS

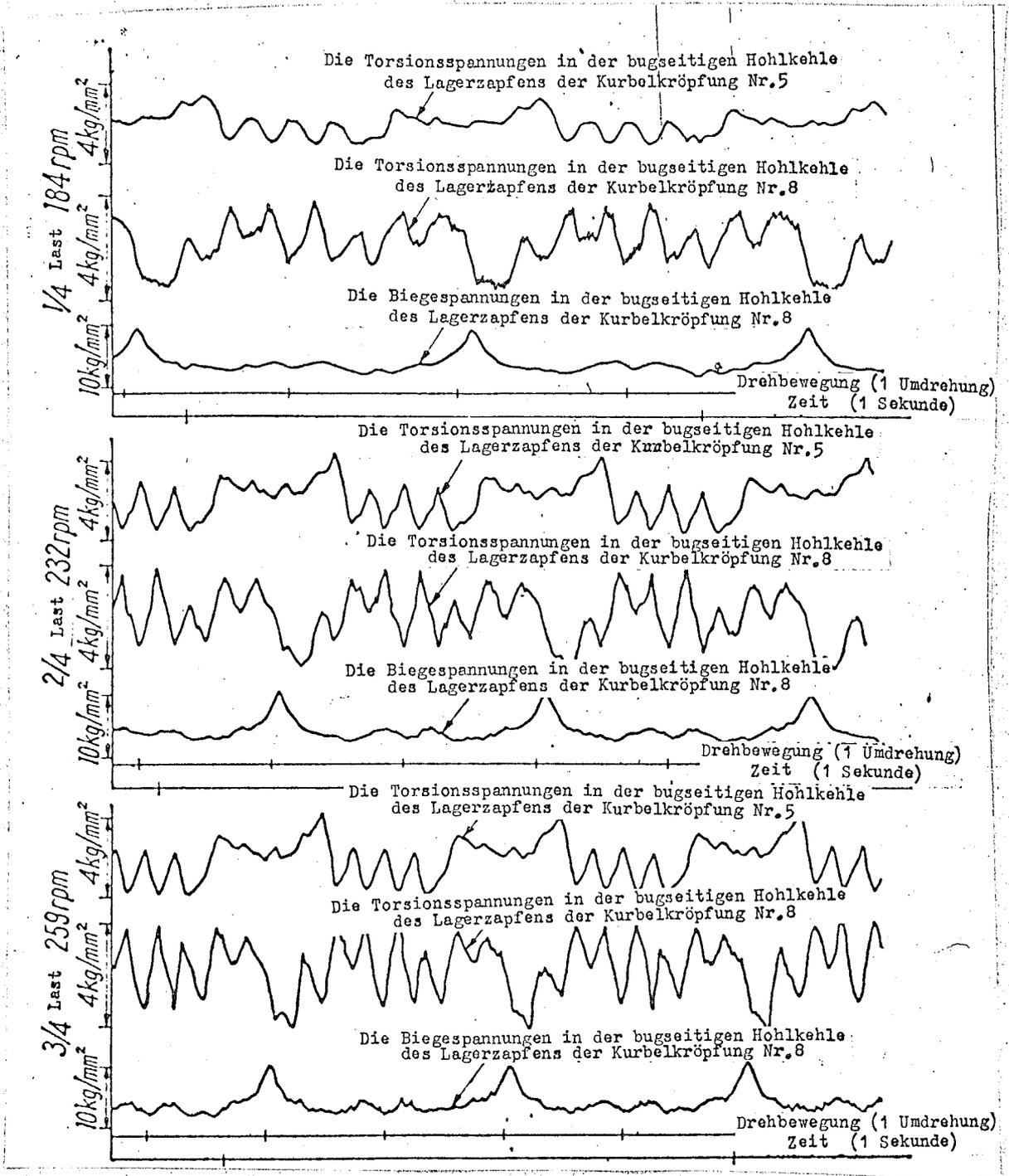


Abb. 14

Die Ergebnisse der Spannungsmessung in der Kurbelwelle des Motors 8UAKKS

Wie wir aus der Abbildung 15 ersehen können, haben wir eine recht gute Übereinstimmung zwischen den praktisch gemessenen Werten und den berechneten Werten; dies ist dadurch zu erklären, dass bei dem von uns gemessenen Motor der Resonanzpunkt der Torsionsschwingungen (1 Knoten 9 Ordnungen) bis zu einer ausserordentlich hohen praktisch angewandten Drehzahl ansteigt, und dass man deshalb ein sehr starkes und steifes Wellensystem genommen hat, was wiederum zur Folge hatte, dass die durch die Schwingungen hereinkommenden zusätzlichen Spannungen ausserordentlich klein waren.

7. Zusammenfassung:

Bis jetzt war es ausserordentlich schwierig, die Spannungen in den Kurbelwellen praktisch laufender Motoren zu messen; seit es jedoch FM-Spannungstelemeter gibt, ist es möglich geworden, auch diese Spannungen zu messen. In dem man ganz besonders auf Öldichtheit geachtet hat und dafür gesorgt hat, dass in die der Gleichgewichtsregelung dienenden Potentiometer kein Schmieröl eindringen konnte, ist es gelungen, für die Messung an den Kurbelwellen Telemeter mit grosser Genauigkeit anzuwenden.

Die praktisch gemessenen Werte haben mit den Ergebnissen, die man nach dem von verschiedenen Verfassern angegebenen Verfahren zur Berechnung der Spannungen in den vielfach gekröpften Kurbelwellen erhalten hat, mit ziemlicher Genauigkeit übereingestimmt.

Wir haben auf den oben beschriebenen Erfahrungen aufgebaut und haben die Konstruktion der Telemeter für die Messungen der Spannungen an Kurbelwellen erneut der Fa. Primo anvertraut,

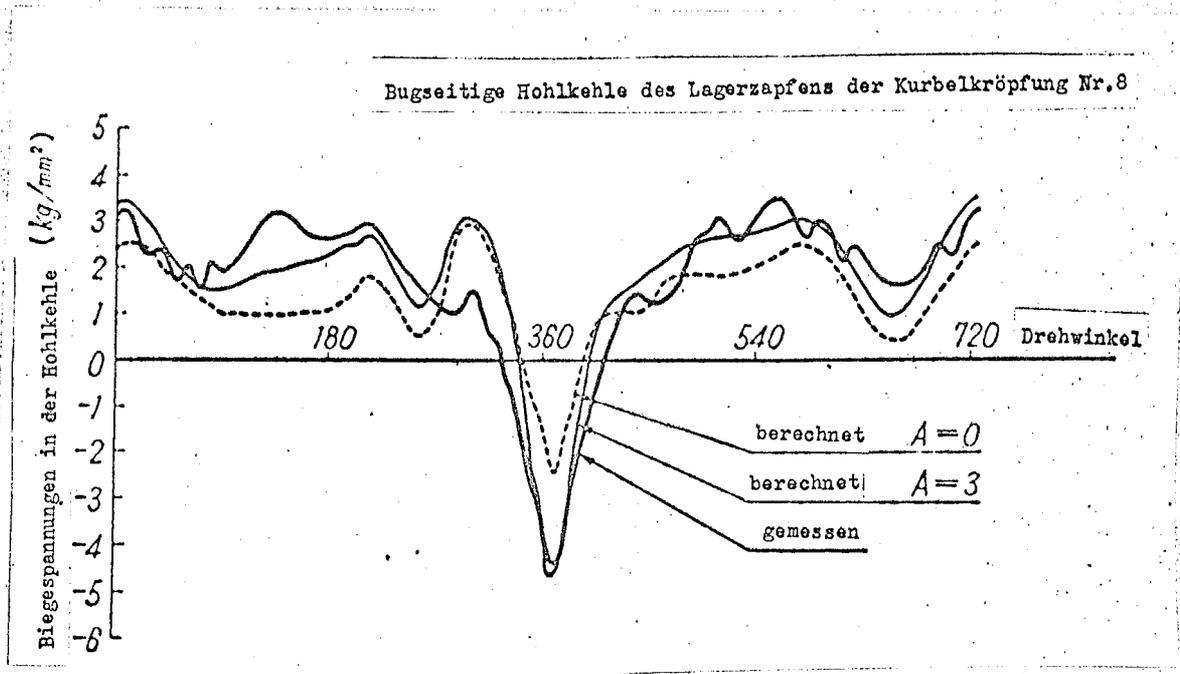


Abb.15a Vergleich der praktisch gemessenen Werte und der berechneten Werte für die Biegespannungen in den Lagerzapfenhohlkehlen der Kurbelwelle 8UAKKS

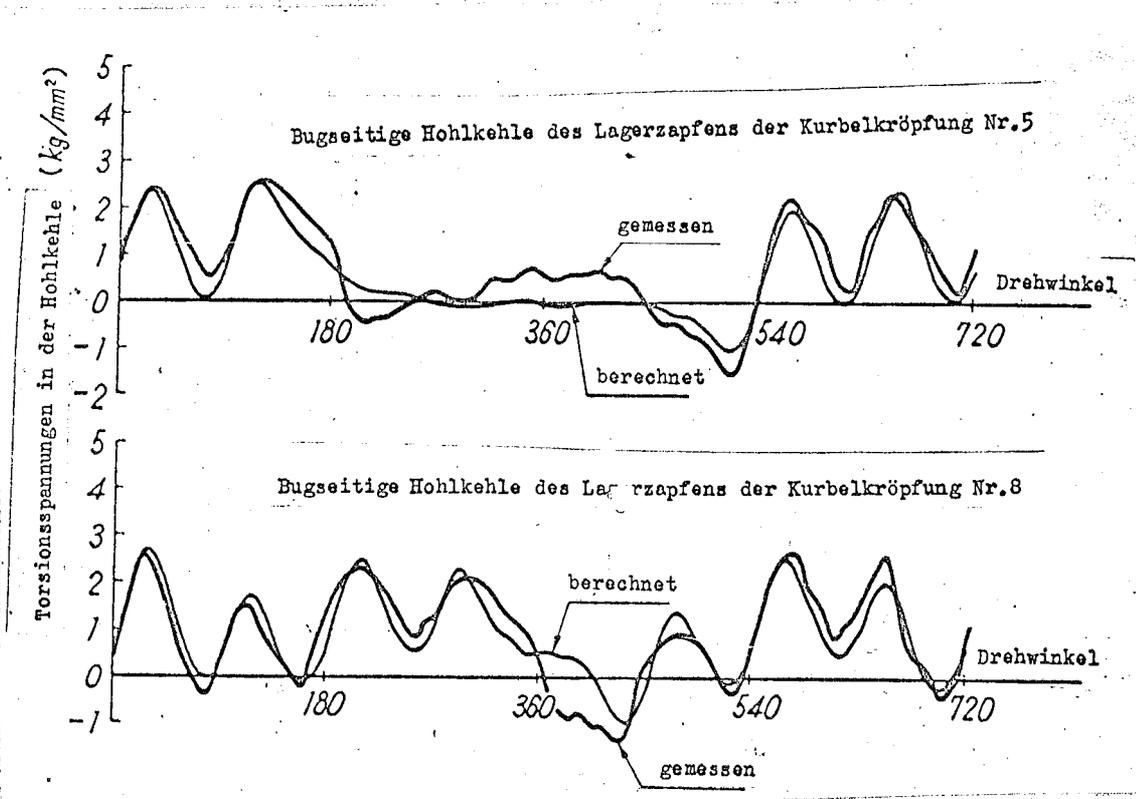


Abb.15b Vergleich der praktisch gemessenen Werte und der berechneten Werte der Torsionsspannungen in den Hohlkehlen der Lagerzapfen der Kurbelwelle des Motors 8UAKKS

das Wichtige dabei war jedoch, dass wir hinsichtlich der Operationsfähigkeit Opfer gebracht haben und dadurch zu einer Konstruktion gekommen sind, bei welcher der wichtige Punkt der Öldichtheit gelöst war. Wir haben also ein inneres Gehäuse aus Blech genommen (um eine öldichte Konstruktion zu bekommen haben wir auf die Wellen des Potentiometers Ohringe aufgesetzt und dadurch eine Öldichtheit erhalten); dieses Innengehäuse aus Blech haben wir sodann wiederum in ein äusseres Gehäuse aus Aluminiumguss gesetzt und zwischen die beiden Wandungen ein wärmeisolierendes Material derart eingebracht, daß die Temperaturbedingungen wenigstens einigermaßen gemässigt wurden; wenn man bei den Messungen möglichst die Eichdehnungswerte und die Nulllinien aufnimmt und wenn man es zudem so einrichtet, dass die Messungen möglichst in kurzer Zeit zu Ende geführt werden, dann ist die Anwendung der Telemeter bis zu sehr hohen Temperaturen möglich.

Derartige Messungen der Kurbelwellenspannungen müssen sich auf einen sich im praktischen Betrieb befindenden Motor auf eine wirkliche Handelsware beziehen. Man muss die Bedingungen für die Messung von dem Gesichtspunkt aus aufnehmen, dass sie unbedingt bei einer Probefahrt oder bei der in Dienststellung eines Schiffes ausgeführt werden müssen. In unserem Falle haben wir ausser den obenerwähnten Beispielen noch einige andere praktische Messungen durchgeführt, und wir sind sowohl den Werken gegenüber wie auch den Schiffen gegenüber für ihr Verständnis und ihre Zusammenarbeit mit uns zu grossem Dank verpflichtet.

Zum Schluss unserer Arbeit möchten wir nicht versäumen, allen Herren, die uns dabei behilflich waren oder uns wertvolle Hinweise gegeben haben, unseren herzlichsten Dank auszusprechen.

Literaturhinweise:

1. Verfahren zur theoretischen Berechnung der Kurbelwellen praktisch laufender Motoren von J. Arai
(analytisches Verfahren zur Berechnung der Biegespannungen in mehrfach gekröpften Kurbelwellen)
vorgebracht auf der 41. Jahrestagung der japanischen Gesellschaft für Mechanik, Sammlung der Berichte Nr. 94.
2. Das Telemeter
W.R.Cambel and P.F. Suit, JR., (A.Transistorized AM-FM Radio-link Torque Telemeter For Large Rotating Shaft)
Proc. of the Society for Experimental Stress Analysis.
Vol. XIV, Nr. 2.
3. Die Ergebnisse der Spannungsmessungen an Kurbelwellen mit Telemetern
Technische Berichte von Ishikawajima
(Ishikawajima: "Die Analyse der Schwingungen des 12 Zyl.-Sulzer-Dieselmotors RD-90") März 1965, Nr. 22.