

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

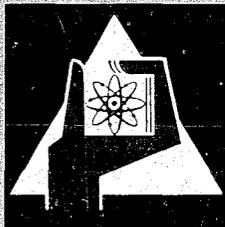
März 1968

KFK 731
EUR 3718 d

Institut für Reaktorentwicklung

Methode für die experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenzen,
der Normal- und der Dehnungsfunktionen sowie der
Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe

J. Kadlec, V. Pfrommer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

März 1968

KFK-731
EUR 3718d

Institut für Reaktorentwicklung

Methode für die experimentelle Untersuchung der Eigen-
frequenzen, der Normal- und der Dehnungsfunktionen
sowie der Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe *)

J. Kadlec
V. Pfrommer

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

*) Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der Schnellen Reaktoren durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis:

- Vorbemerkung
1. Einleitung
 2. Theoretische Betrachtungen
 3. Versuchsanlage
 - 3.1 Einrichtung für die Erregung der Schwingung
 - 3.2 Meßaufnehmer und Meßgeräte
 4. Inbetriebnahme der Versuchsanlage
 - 4.1 Beschreibung der Experimente
 - 4.1.1 Messung der Resonanzkurve
 - 4.1.2 Messung der Phase
 - 4.1.3 Messung der Amplitude der Auslenkungen und der relativen Dehnungen
 - 4.2 Resultate der Untersuchungen
 - 4.2.1 Rechnung
 - 4.2.2 Resonanzkurven
 - 4.2.3 Phase
 - 4.2.4 Amplitude der Auslenkung und der relativen Dehnung
 - 4.2.5 Schlußbemerkung zu den durchgeführten Untersuchungen
 5. Schlußfolgerungen
- Literatur

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Problematik der experimentellen Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen der querschwingenden Brennstäbe, welche an mehreren Stellen durch Abstandshalter unterstützt sind. Die Versuchsanlage sowie die Resultate ihrer Inbetriebnahme sind in dieser Arbeit beschrieben. Zur Erreichung des Schwingungszustandes des Brennstabes wird ein elektromagnetisches Erregungssystem benutzt.

Die Arbeit wird im Rahmen der Projektarbeiten des schnellen Brutreaktors durchgeführt.

1. Einleitung

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich mit der Problematik der experimentellen Untersuchung der Eigenfrequenzen, der Normal- und der Dehnungsfunktionen sowie der Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe. Sie gehört zu den anderen Arbeiten aus dem Gebiet der durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungen der Brennstoffstäbe, welche im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt werden.

Die Definition und die Erklärung der physikalischen Bedeutung der Eigenfrequenzen ν_j (bzw. der Eigenkreisfrequenzen $\omega_j = 2\pi\nu_j$), der Normalfunktionen $G_j(x)$, der Dehnungsfunktionen $\epsilon_j(x)$ und der Dämpfungsquotienten ξ_j des im Brennstoffsubassembly montierten Brennstoffstabes enthält die Arbeit [1]. Diese Werte und Funktionen sind für die Berechnung [1] oder die Abschätzung [2] des Schwingungszustandes des Brennstabes im Reaktor von besonderer Wichtigkeit.

Das System der Eigenfrequenzen ν_j und der entsprechenden Eigenfunktionen $G_j(x)$ und $\epsilon_j(x)$, das jedem bestimmten Brennstab (mit einer bestimmten Verteilung der Abstandshalter) eindeutig zugeordnet ist, kann man rechnerisch bestimmen [3]. Da diese Berechnung die Lagerung des Brennstabes in der Form der idealisierten Randbedingungen berücksichtigt, ergibt sich die Notwendigkeit, die Resultate der Rechnung experimentell zu überprüfen. Das System der Dämpfungsquotienten ξ_j kann man nur experimentell bestimmen.

Bei der Durchführung des Versuches stößt man auf folgende zwei Probleme:

1. Von dem Gesichtspunkt der Mechanik ist der Brennstab ein Kontinuum, d.h. er besitzt unendlich viele Freiheitsgrade, denen eine unendlich große Zahl der Eigenfrequenzen ν_j und Eigenfunktionen $G_j(x)$ und $\epsilon_j(x)$ entspricht. Bei einer willkürlichen Erregung der Schwingung sogar im Falle nur einer Erregungsfrequenz ν , überlagern sich die Schwingungen in verschiedenen Schwingungsformen $G_j(x)$, so daß ein gemischter

Schwingungszustand entsteht. Bei einem Brennstab mit vielen Abstandshaltern wird diese Tatsache besonders betont, da in diesem Falle die Eigenfrequenzen ν_j sehr dicht aufeinander folgen. Die erste zu stellende Frage lautet: Wie erregt man die Schwingung des Brennstabes, daß er nur in der gerade zu untersuchenden Form $G_k(x)$ schwingt, ohne daß sich die anderen Schwingungsformen $G_j(x)$, $j \neq k$ geltend machen können?

2. Die Anwesenheit starker Dämpfungsglieder (Abstandshalter, äußere und innere Dämpfung) am Brennstab hat zur Folge, daß die im Betrieb des Reaktors zu erwartenden Schwingungen des Brennstabes sehr kleine Amplituden haben (einige Zehntel mm an empfindlichsten Stellen), welche man bei dem Versuch reproduzieren und messen muß. Die künstliche Vergrößerung der Amplituden bei der Messung ist nicht zulässig, weil dabei nichtlineare Phänomene auftreten können (z.B. durch die Federung der Abstandshalter), welche dann die Resultate der Messung verfälschen. Der Einsatz der empfindlichen kontakten Meßaufnehmer ist ebenfalls ausgeschlossen, da diese sich auf die Meßresultate ungünstig auswirken können. Es ergibt sich folgende zweite Frage: Wie kann man die kleinen Amplituden des schwingenden Brennstabes messen, ohne daß nichtlineare Phänomene sowie andere Meßverfälschungen auftreten können?

Die Lösung dieser Probleme wird in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit behandelt. Die Meßmethode sowie die Versuchsanlage wird am Beispiel eines Modellstabes mit neun Abstandshaltern illustriert bzw. beschrieben.

2. Theoretische Betrachtungen

Es wird die gezwungene Querschwingung des Brennstabes im Falle der äußeren erregenden Querkraft $f(x,t)$ betrachtet. Die Auslenkung des Brennstabes aus der Ruhelage $y(x,t)$ wird durch folgende Gleichung beschrieben [1]:

$$y(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} G_j(x) F_j(t) \quad (1)$$

Die Normalfunktionen $G_j(x)$ sind orthogonal, d.h. sie erfüllen die Bedingung

$$\int_0^1 G_j(x) G_k(x) m(x) dx = \begin{cases} 0 & j \neq k \\ \int_0^1 G_j^2(x) m(x) dx = M_j & j = k \end{cases} \quad (2)$$

Hier bedeuten:

$m(x)$ Masse der Einheitslänge des Brennstabes

M_j "generalisierte Masse" der j -ten Schwingungsform

x Koordinate in der Längsrichtung des Brennstabes

l Länge des Brennstabes

t Zeit

Die Normalkoordinaten $F_j(t)$ in der Gleichung (1) bestimmen die Größe des Anteils der Schwingung mit der j -ten Eigenfrequenz an der Gesamtschwingung. Sie sind durch das folgende System der Lagrangeschen Differentialgleichungen bestimmt.

$$M_j \ddot{F}_j(t) + K_j \dot{F}_j(t) + \omega_j^2 M_j F_j(t) = \Phi_j(t) \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, \infty$$

In der Gleichung (3) bedeuten:

$$K_j = \int_0^1 \beta G_j^2(x) dx$$

"generalisierte Dämpfung" der j -ten Schwingungsform

β

Koeffizient der linearen Dämpfung des Brennstabes (mit Berücksichtigung des Kühlmittels)

$$\Phi_j(t) = \int_0^1 f(x,t) G_j(x) dx$$

"generalisierte Kraft" der j -ten Schwingungsform

Das System der Lagrangeschen Gleichungen (5) kann man für jede j -te Schwingungsform getrennt lösen. Den Ausdruck für die Auslenkung $y(x,t)$ bekommt man durch Einsetzen der einzelnen Lösungen in die Gleichung (1). Die Summation in der Gleichung (1) beschreibt die in Kapitel 1 erwähnte Tatsache, daß im Falle einer willkürlichen Erregungskraft $f(x,t)$ ein gemischter Schwingungszustand des Brennstabes zu erwarten ist.

Für weitere Betrachtungen benutzen wir für die äußere erregende Kraft $f(x,t)$ folgende Annahme

$$f(x,t) = m(x) G_k(x) e^{i\omega t}, \quad (4)$$

wobei $i = \sqrt{-1}$ und das Symbol ω eine frei gewählte erregende Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$ bedeutet. Die Funktion $G_k(x)$ ist die Normalfunktion der k -ten Schwingungsform, welche wir experimentell zu untersuchen beabsichtigen. Unter der Berücksichtigung der Annahme (4) und der Bedingung (2) transformieren wir dann das System der Lagrangeschen Gleichungen (3) in das folgende System:

$$\ddot{F}_j(t) + \frac{K_j}{M_j} F_j(t) + \omega_j^2 F_j(t) = 0 \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, \infty \\ j \neq k$$

$$\ddot{F}_k(t) + \frac{K_k}{M_k} \dot{F}_k(t) + \omega_k^2 F_k(t) = e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\text{für } j = k$$

Die Gleichung (5) und die Gleichung (6) (ohne die rechte Seite) beschreiben die freie, gedämpfte Schwingung des Brennstabes. Die Lösung dieser homogenen Gleichung wird:

$$F_{jh}(t) = e^{-\zeta_j \omega_j t} (A_j \cos \Omega_j t + B_j \sin \Omega_j t) \quad (7)$$

$$j = 1, 2, \dots, \infty$$

In der Gleichung (7) bedeutet der Ausdruck

$$\Omega_j = \sqrt{\omega_j^2 - \frac{K_j^2}{4M_j^2}} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2} \quad (8)$$

die Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung der j-ten Schwingungsform. Das Symbol

$$\xi_j = \frac{K_j}{2\omega_j M_j} \quad (9)$$

bezeichnet den Dämpfungsquotienten der j-ten Schwingungsform. Die Integrationskonstanten A_j und B_j kann man aus der Anfangsbedingung der Aufgabe bestimmen. Da die freie gedämpfte Schwingung des Brennstabes nach sehr kurzer Zeit abklingen wird (z.B. für $\xi_j = 0,02$ und $\nu_j = 70$ Hz wird die Amplitude schon nach 0,52 sec nur noch 1 % ihres ursprünglichen Wertes betragen), bekommen wir das Resultat (für ein genügend großes t):

$$F_{jh}(t) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, \infty \quad (10)$$

Für den eingeschwungenen Zustand bleibt das partikuläre Integral der Gleichung (6)

$$F_k \text{ part.}(t) = \frac{e^{i\omega t}}{\omega_k^2 - \omega^2 + i2\xi_k \omega_k \omega} \quad (11)$$

Durch Einsetzen der Lösungen (10) und (11) in die Gleichung (1) bekommen wir das Resultat, welches allerdings nur für die Erregung der Schwingung des Brennstabes mit einer äußeren Querkraft $f(x,t)$ nach der Bedingung (4) gilt:

$$y(x,t) = \frac{G_k(x)}{\omega_k^2 - \omega^2 + i2\xi_k \omega_k \omega} e^{i\omega t} \quad (12)$$

Aus Gleichung (12) folgt, daß bei Erfüllung der Bedingung (4) der Brennstab nach Erreichung seines eingeschwungenen Zustandes in der k-ten Schwingungsform schwingt, unabhängig von der Kreisfrequenz ω der erregenden Kraft (4). Dieses Resultat wird als Basis den Versuchen zugrunde gelegt.

Aus der Gleichung (12) folgt weiter, daß die Amplitude der Schwingung des Brennstabes von der Kreisfrequenz ω abhängt. Aus der graphischen Darstellung dieser Abhängigkeit (Resonanzkurve) kann man den Wert des Dämpfungsquotienten S_k nach der folgenden bekannten Formel (z.B. nach [4]) bestimmen:

$$S_k = \frac{\Delta\omega_k}{2\omega_{k \text{ res}}} = \frac{\Delta\nu_k}{2\nu_{k \text{ res}}} \quad (13)$$

Die Größe $\Delta\omega_k$ (bzw. $\Delta\nu_k$) ist die Breite der Resonanzkurve bei einem Amplitudenabfall von 3 dB (die Halbwertsbreite des Amplitudenquadrates); $\omega_{k \text{ res}}$ (bzw. $\nu_{k \text{ res}}$) ist die Resonanzkreisfrequenz (bzw. Resonanzfrequenz). Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Resonanzfrequenz $\nu_{k \text{ res}}$ nach folgender Formel [4] mit dem Dämpfungsquotienten S_k verknüpft ist:

$$\nu_{k \text{ res}} = \nu_k \sqrt{1 - 2S_k^2} \quad (14)$$

Diese Beziehung gilt allerdings nur für die Auslenkung. Die Resonanzfrequenz für die Geschwindigkeit stimmt mit der Eigenfrequenz ν_k überein.

3. Versuchsanlage

Einen Gesamtblick auf die Versuchsanlage sieht man auf Bild 1. Die Einzelheiten dieser Anlage und die Schaltungen der elektronischen Geräte sind auf Bild 2 schematisch dargestellt. Der mechanische Teil dieser Anlage ist so konstruiert, daß man die Versuche auch in stehendem Wasser durchführen kann (in diesem Falle handelt es sich um die Messung der Dämpfungsquotienten S_j im Wasser).

Der Versuchsstab 1 ist mit neun Abstandshaltern 2 unterstützt, welche in Vorrichtung 4 befestigt sind. Die gesamte Vorrichtung 4 ist an den Stäben 3 vertikal verschiebbar angebracht. Diese Konstruktion der Versuchseinrichtung gibt die Möglichkeit, die Versuchsstäbe an beliebigen Stellen durch die Abstandshalter zu stützen, wie es dem gerade zu untersuchenden Subassemblytyp entspricht.

3.1 Einrichtung für die Erregung der Schwingung

Bei der Durchführung des Versuches ist eine exakte Erfüllung der Bedingung (4) mit technischen Schwierigkeiten verbunden. Diese werden dadurch verursacht, daß die erregende Querkraft $f(x,t)$ nach der Bedingung (4) eine kontinuierliche Funktion der Koordinate x ist, was sich nur schwierig realisieren läßt. Wie aber die Versuche gezeigt haben (s. Kap. 4), bekommt man auch dann noch befriedigende Resultate, wenn man diese kontinuierliche Kraft durch einige diskrete Kräfte ersetzt. Es ist dabei darauf zu achten, daß die Richtungen dieser diskreten Kräfte an allen Stellen x mit dem Vorzeichen der Normalfunktion $G_k(x)$ übereinstimmen.

Zur Erregung der Schwingung des Brennstabes wurde ein elektromagnetisches System gewählt. Die diskreten Kräfte wurden durch die magnetische Kraftwirkung der in Serie geschalteten Spulen 5 (Bild 2) realisiert. Zur Erreichung der erforderlichen magnetischen Sättigung hat man an den erforderlichen Stellen des Brennstabes leichte Anker 6 aus weichem Stahl befestigt. Die Spulen wurden von einem RC-Generator, Type MG-47 der Fa. Wandel & Goltermann (Frequenzbereich 30 Hz bis 300kHz) über einen Eladyn-Endverstärker, Type 6 S Ela 2796 a der Fa. Siemens & Halske (untere Grenzfrequenz 20 Hz, Tonfrequenzleistung 250 W) gespeist.

Der Vorteil des elektromagnetischen Systems zur Erregung der Schwingung besteht darin, daß die Kraft der elektrischen Spannung entspricht $\lceil 5 \rceil$, so daß die Forderung der harmonischen Kraft nach Bedingung (4) sich einfacher realisieren läßt. Die Änderung der Kraftamplitude an verschiedenen Stellen x kann man durch die Änderung der Windungszahl an verschiedenen Spulen simulieren. Der Einfachheit halber wurden die Spulen ohne Polarisierung gewählt. Dies hat den Vorteil, daß der Zeitverlauf der Erregungskraft (im Vergleich zum Fall der Spulen mit Polarisierung) durch die höheren harmonischen Komponenten weniger gestört ist. Nachteilig ist die Tatsache, daß die mit diesem System verbundene Verdoppelung der

Erregungsfrequenz zu einem niedrigeren Wirkungsgrad des Leistungsverstärkers (wegen des Abfalles der Leistung im Bereich der niedrigeren Frequenzen) führt.

3.2 Meßaufnehmer und Meßgeräte

Zur Aufnahme der relativen Dehnungen wurden Dehnungsmeßstreifen 7 gewählt. Diese wurden auf die gegenüberliegende Faser des Versuchsstabes in der Schwingungsebene befestigt und in Halbbrückenschaltung mit einem dreiaderigen abgeschirmten Kabel am Eingang des Meßverstärkers KWS II/5 der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik (Trägerfrequenz 5 kHz) angeschlossen. Diese Schaltung hat den Vorteil, daß Temperatureffekte kompensiert werden und die Empfindlichkeit der Dehnungsmessung verdoppelt wird.

Zur Aufnahme der Auslenkungen wurden die tastlosen induktiven Wegaufnehmer 8, Type Tr 2-5 der Fa. Hottinger gewählt. Ein Paar dieser Aufnehmer wurde ebenfalls in Halbbrückenschaltung mit einem dreiadrigen abgeschirmten Kabel am Eingang des Meßverstärkers KWS II/5 angeschlossen. Durch diese Schaltung wurde die Linearität der Auslenkungsaufnahme verbessert. Um Meßverfälschungen durch Einwirkungen des äußeren elektromagnetischen Feldes der Spule zu verhindern, wurden die Aufnehmer mit 2 mm dickem Mumetallblech der Fa. Vakuumschmelze, Hanau, abgeschirmt. Die RMS-Werte der Ausgangssignale der Meßverstärker wurden an einem RMS-Voltmeter, Type 3400 A, der Fa. Hewlett Packard abgelesen. Um die Schwingungen des Versuchsstabes beobachten zu können, wurden die Ausgangssignale parallel an die Eingänge des Zweistrahl-Oszillographen, Type H 2 V 18 der Fa. Hottinger (Schirmdurchmesser 18 cm) gegeben.

Für die Eichung der induktiven Wegaufnehmer und für die Messung der Auslenkungen der unzulänglichen Stellen (Anker des elektromagnetischen Erregungssystems) wurde der auf Bild 3 gezeichnete optische Schwingungsaufnehmer ("Meßkeil") benutzt 6. Bei diesen zur Eichung oft benutzten Aufnehmern kreuzen sich zwei gerade Linien, die bei Schwingungen in horizontaler

Richtung einen Schatten werfen (s. Andeutung Bild 3). Die Amplitude der Schwingung kann man in vergrößertem Maßstab (benutzter Aufnehmer hat 5-fache Vergrößerung) auf der Vertikale ablesen. Die Aufnehmer wurden auf fotografischem Wege 10 mal verkleinert und auf die jeweiligen Meßstellen des Versuchsstabes geklebt (Bild 4). Für die Ablesung der Amplitude wurde ein Stereo-Mikroskop III der Fa. Karl Zeiss (Vergrößerung 12 mal) 9 eingesetzt. Auf diese Weise ist es möglich, die Amplitude der Auslenkung des schwingenden Versuchsstabes mit der Genauigkeit $\pm 0,01$ mm abzulesen. Der Fehler des Meßverstärkers liegt an den Grenzen ± 1 % des Meßbereiches, während ein bedeutenderer Meßfehler mit dem Einsatz der DMS verbunden ist. Dieser Fehler hängt von der Qualität der eingesetzten DMS ab und kann in ungünstigen Fällen bis zu ± 10 % erreichen.

4. Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Um die Wirksamkeit der Versuchsanlage und die Zweckmäßigkeit der vorgeschlagenen Untersuchungsmethode zu überprüfen, wurde eine Untersuchung der Schwingung in der ersten Schwingungsform eines Versuchsstabes mit neun Abstandshaltern durchgeführt.

4.1 Beschreibung der Experimente

Ein Längsschnitt durch den Versuchsstab sowie die Lage der Abstandshalter und der Anker ist auf Bild 5b gezeichnet. Der Versuchsstab und die Verteilung der Abstandshalter entsprechen ungefähr dem Brennstab des Subassemblies der Na 1-Studie [7], allerdings ohne Spalt- und Brutstofffüllung. Für die Berechnung der Eigenfrequenzen ν_j und der Eigenfunktionen $G_j(x)$ und $E_j(x)$ wurde der Versuchsstab in 30 Abschnitte mit konstanter Masse und konstanter Biegesteifigkeit unterteilt. Diese Abschnitte sind auf Bild 5 mit den Ziffern (1) bis (30) bezeichnet. Die Koordinate x wird vom Anfang des gegebenen Abschnittes an gemessen. Dieselbe Bezeichnung wird auch für die Lokalisierung der Meßstellen benutzt.

Für die Abstandshalterung hat man den auf Bild 6a gezeichneten Abstandshalter eingesetzt, um den idealisierten mathematischen Randbedingungen [3] möglichst nahe zu kommen.

Für die Erregung der Schwingung des Versuchsstabes hat man acht gleiche Spulen eingesetzt, welche jeweils in der Mitte des Abschnittes 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23 und 26 auf zwei gegenüberliegenden Seiten (mit Berücksichtigung des Vorzeichens der Normalfunktion $G_1(x)$) in der Schwingungsebene lokalisiert sind. Die Spulen sind aus 0,9 mm dickem Kupferdraht gewickelt; der Kern aus Transformatorenblechen hat die Abmessung 13 x 21 x 97 mm; äußere Abmessungen der Windungen sind 50^ø x 75 mm, ihr Ohmscher Widerstand beträgt 4 Ω . Um den Bedingungen (4) näher zu kommen, wurden die Spulen nach dem auf Bild 6b aufgezeichneten Schema geschaltet. Eine Spule ist auf Bild 4 zu sehen.

Für die Aufnahme der relativen Dehnungen wurden die DMS, Type PLS-10 der Fa. Tokyo Kenkyujo (Ohmscher Widerstand $120 \pm 0,3 \Omega$, K-Faktor 2,05) eingesetzt. Die DMS wurden an den Verstärker KWS II/5 angeschlossen. Aus den RMS-Werten der Ausgangsspannung U_{RMS} [Volt] wurde die Amplitude der relativen Dehnung nach folgender Formel (Gleichung (2), [8]) ermittelt:

$$10^6 \epsilon = \frac{100}{2,05 \cdot 4 \cdot 0,707} U_{\text{RMS}} \quad (15)$$

(Bei dem benutzten Meßbereich $100 \cdot 10^{-6}$ entspricht der Vollausschlag einem Gleichspannungssignal von 4 V).

Für die Messung der Amplitude der Auslenkung wurde das in Kap. 3.2 beschriebene optische Verfahren benutzt; für die Messung der Phase und für die Visualisierung der Schwingung hat man die in Kap. 3.2 beschriebenen tastlosen Aufnehmer eingesetzt.

4.1.1 Messung der Resonanzkurve

Die Messungen wurden mit den DMS und mit den tastlosen Aufnehmern durchgeführt. Der Frequenzbereich 60 - 200 Hz wurde

langsam durchfahren und die entsprechenden Ausgangssignale an dem RMS-Voltmeter abgelesen. Der Schwingungsvorgang wurde auf dem Schirm des Oszillographen beobachtet.

4.1.2 Messung der Phase

Die Messung wurde mit zwei tastlosen Aufnehmern bei der Erregungsfrequenz 140 Hz durchgeführt. Der erste Aufnehmer wurde während der ganzen Messung in einem "Referenzpunkt" (Abschnitt 24, $x = 8$ cm) befestigt, während mit dem zweiten Aufnehmer der Schwingungsvorgang entlang des ganzen Versuchsstabes (mit Ausnahme der Anker) sondiert wurde. Die Schwingungsvorgänge von beiden Aufnehmern wurden auf dem Schirm des Oszillographen verglichen. Die beiden Verstärkerkanäle wurden dabei wechselweise als zwei Vertikalverstärker und ein Horizontalverstärker (zur Beobachtung von Lissajousschen Figuren) eingeschaltet.

4.1.3 Messung der Amplitude der Auslenkungen und der relativen Dehnungen

Die Messungen wurden entweder mit zwei DMS-Paaren oder mit einem DMS-Paar und einem optischen Schwingungsaufnehmer bei der Erregungsfrequenz 140 Hz durchgeführt. Das erste DMS-Paar (Abschnitt 27, $x = 2,3$ cm) wurde immer zur Aufnahme der Amplitude der "Referenzdehnung" benutzt; mit dem zweiten Aufnehmer wurde die der Amplitude der "Referenzdehnung" zugeordnete Amplitude der Auslenkung oder der relativen Dehnung an einer anderen Stelle des Stabes gemessen. Diese Art der Messung wurde deshalb gewählt, weil bei den im Versuchsprogramm vorgesehenen Messungen der Schwingungen der Brennstäbe im Versuchsloop nur die Aufnahme der relativen Dehnungen an einem Ort des Brennstabes vorgesehen ist. Aus diesen Messungen (bei der gleichzeitigen Aufnahme der Frequenz) werden dann in bezug auf die Auslenkungen und relativen Dehnungen an anderen Orten des Brennstabes die Schlüsse gezogen. Bei der gleichzeitigen Messung der "Referenzdehnung" und der zweiten Größe wurde die Amplitude

der Schwingung durch die stufenförmige Änderung der Ausgangsspannung am RC-Generator geregelt, so daß man bei der Auswertung der Meßdaten die angenommene lineare Abhängigkeit zwischen den beiden gemessenen Größen untersuchen konnte. Sämtliche Meßstellen sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Alle in den Paragraphen 4.1.1 bis 4.1.3 angeführten Messungen wurden in Luft durchgeführt.

4.2 Resultate der Untersuchungen

Außer den in den Paragraphen 4.1.1 bis 4.1.3 beschriebenen Messungen wurde mit dem Programm Nr. 13204 [3] der Rechenanlage IBM-7074 eine Berechnung der Eigenfrequenzen ν_j und der entsprechenden Eigenfunktionen $G_j(x)$ und $\epsilon_j(x)$ des Versuchsstabes durchgeführt. Die Resultate der Rechnung und der Messung wurden miteinander verglichen.

4.2.1 Rechnung

Die Rechnung wurde für die drei ersten Schwingungsformen des Versuchsstabes durchgeführt. Die berechneten Frequenzen sind $\nu_1 = 145,69$ Hz, $\nu_2 = 158,80$ Hz und $\nu_3 = 180,74$ Hz. Die der ersten Frequenz ν_1 entsprechenden Eigenfunktionen $G_1(x)$ und $\epsilon_1(x)$ sind auf Bild 5a in Abhängigkeit von der Koordinate x in graphischer Form aufgetragen. Die beiden Funktionen sind auf den Wert der Referenzdehnung (Abschnitt 27, $x = 2,3$ cm) $\epsilon_1 = 100 \cdot 10^{-6}$ genormt. Dies bedeutet, daß z.B. die Funktion $\epsilon_1(x)$ die Amplitude der relativen Dehnung der äußeren Faser (in der Schwingungsebene) des mit der ersten Eigenfrequenz ν_1 querschwingenden Versuchsstabes beschreibt, welche dem Wert der Amplitude der relativen Referenzdehnung $\epsilon_1 = 100 \cdot 10^{-6}$ entspricht. Die Funktion $G_1(x)$ beschreibt die Amplitude der Auslenkung für die gleichen Bedingungen.

4.2.2 Resonanzkurven

Beim Beobachten der Ausgangssignale auf dem Schirm des Oszillographen wurde festgestellt, daß in dem Frequenzintervall 100 bis 200 Hz der untersuchte

Schwingungsvorgang dem idealen Sinus-Vorgang sehr gut entspricht. Die Signale wurden mit dem Rauschen nur leicht moduliert; der Rauschpegel betrug etwa 1 % des maximalen Meßwertes. In diesem Frequenzbereich wurde in den Ausgangssignalen kein Anteil höherer harmonischer Frequenzen beobachtet. Die sichtbaren Verzerrungen der Ausgangssignale fanden nur in dem Frequenzintervall 60 bis 100 Hz statt. Aus diesen positiven Ergebnissen der Untersuchung kann man schließen, daß die Ersetzung der Bedingung (4) durch ein diskretes System der elektromagnetischen Schwingungserreger ihren Zweck gut erfüllt.

Eine aus der Serie der Messungen gewonnene typische Resonanzkurve ist auf Bild 7 dargestellt. Auch auf dieser Kurve ist zu erkennen, daß im Bereich der höheren Frequenzen keine Verzerrungen, welche normalerweise auf die höheren Eigenschwingungsformen hinweisen, stattgefunden haben. Dieses Resultat identifiziert sich mit dem oben Gesagten völlig. Aus der Lage des Maximums der Resonanzkurve folgt das Resultat

$$\nu_{1 \text{ res}} = 138 \text{ Hz}$$

Die Breite der Resonanzkurve $\Delta\nu_1$ beträgt 7,8 Hz. Aus der Formel (13) folgt dann

$$\xi_1 = 2,82 \%$$

Durch Einsetzen der Werte ξ_1 und ν_1 in die Formel (14) bekommt man den Rechnungswert der Resonanzfrequenz $\nu_{1 \text{ res}} = 145,5 \text{ Hz}$. Die relative Abweichung

$$\frac{\nu_{1 \text{ res}}(\text{berechnet}) - \nu_{1 \text{ res}}(\text{gemessen})}{\nu_{1 \text{ res}}(\text{gemessen})} = 5,4 \%$$

4.2.3 Phase

Es wurde festgestellt, daß die Phasenverhältnisse mit der Rechnung (siehe Bild 5a) entlang des ganzen Versuchsstabes völlig übereinstimmen.

4.2.4 Amplitude der Auslenkung und der relativen Dehnung

Zwei aus der Serie der Messungen ausgewählte typische Beispiele befinden sich auf den Bildern 8 und 9. Die Amplitude der Auslenkung in Abhängigkeit von der Amplitude der relativen Referenzdehnung ist auf Bild 8 graphisch dargestellt. Aus dem Diagramm folgt, daß diese Abhängigkeit linear ist. Der Amplitude der Referenzdehnung $\epsilon_{1 \text{ ref}} = 100 \cdot 10^{-6}$ entspricht die Amplitude der Auslenkung $G_1(x) = 0,274 \text{ mm}$. Der berechnete Wert beträgt $0,295 \text{ mm}$. Die relative Abweichung

$$\frac{G_1(\text{berechnet}) - G_1(\text{gemessen})}{G_1(\text{gemessen})} = 7,7 \%$$

Die Amplitude der relativen Dehnung in Abhängigkeit von der Amplitude der relativen Referenzdehnung ist auf Bild 9 graphisch dargestellt. Die relative Abweichung

$$\frac{\epsilon_1(\text{berechnet}) - \epsilon_1(\text{gemessen})}{\epsilon_1(\text{gemessen})} = 3,5 \%$$

Die berechneten und die gemessenen Werte aller Meßstellen sind auf Bild 5a aufgetragen. Auf diesem Diagramm kann man erkennen, daß diese Werte miteinander sehr gut übereinstimmen. Die relativen Abweichungen für alle Meßstellen sind noch zusätzlich in Tabelle 1 angeführt. Die maximale Abweichung beträgt $7,7 \%$.

4.2.5 Schlußbemerkung zu den durchgeführten Untersuchungen

Die in Abschnitt 4.2 angeführten Resultate der Rechnung und der Messung stimmen gut miteinander überein. Die maximale festgestellte Abweichung von $7,7 \%$ ist, wenn man die zu erwartende Inhomogenität des Modellstabes (Herstellungs-

toleranzen des Hüllrohrs) und die Fehlergrenze des K-Faktors der Dehnungsmeßstreifen berücksichtigt, sehr klein. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die angenommenen mathematischen Randbedingungen durch die eingesetzten Abstandshalter (Bild 6a) gut simuliert sind. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, daß im Falle des Einsatzes der wirklichen Abstandshalter diese Bedingung nicht unbedingt erfüllt sein muß. Dann werden die Meßresultate ausschlaggebend sein, während die Rechnung nur als Hilfsmittel für die Durchführung der Messungen dient.

5. Schlußfolgerungen

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich mit der Methode der experimentellen Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen sowie der Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe. Zu diesem Zwecke wurde eine experimentelle Anlage ausgelegt, gebaut und in Betrieb genommen. An einem Falle der durchgeführten Untersuchungen der Grundschwingung des Na 1-Brennstabes (jedoch ohne Spalt- und Brutstoff-Füllung) wurde die Einsetzbarkeit der Methode und der Versuchsanlage praktisch überprüft.

Diese Arbeit in Verbindung mit der Arbeit [3] bildet zusammen eine Einheit. Das Untersuchungsverfahren umfaßt folgende Schritte

1. Berechnung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Normal- und Dehnungsfunktionen mit dem Rechenprogramm Nr. 13204 [3].
2. Messung der Resonanzkurven mit anschließender Ermittlung von Resonanzfrequenzen und Dämpfungsquotienten.
3. Messung der Amplituden der Auslenkungen und der relativen Dehnungen sowie die Bestimmung der Phasen entlang des Stabes.

Die Methode wird im Rahmen des IRE-Versuchsprogrammes für die Untersuchungen der durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungen der Brennstäbe im Institut für Reaktorentwicklung angewendet. Sie ist allerdings auch für die Untersuchungen an anderen Bauteilen des Reaktorbaues (z.B. Röhre des Wärmetauschers) geeignet.

Literatur:

- [1] Kadlec, J.:
Allgemeine Betrachtung über die durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungen der Brennstoffstäbe des schnellen Brutreaktors 1000 MW,
Externer Bericht 8/66-5, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, Dezember 1966
- [2] Kadlec, J., Pfrommer, V.:
Abschätzung der optimalen Anzahl der Gitterabstandshalter für Na 2-Subassembly,
Externer Bericht 8/67-2, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, Januar 1967
- [3] Kadlec, J.:
Rechnungsverfahren für die Bestimmung der Eigenfrequenzen, der Normalfunktionen und der Dehnungsfunktionen querschwingender Brennstäbe,
Externer Bericht 8/66-9, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, September 1966
- [4] Blake, E.R.:
Basic Vibration Theory,
Shock and Vibration Handbook, Vol. 1,
McGraw-Hill Book Company, New York, 1961
- [5] Procházka, M.:
Přenosové vlastnosti elektromagnetického systému na buzení vibrací,
Strojírenství, 1966, 16, 9, 643 - 653
- [6] Klotter, R.:
Technische Schwingungslehre, Band 1,
Einfaches Schwingen und Schwingungsmeßgeräte,
Springer Verlag, 1951

- [7] Smidt, D., Müller, A.:
Referenzstudie für den 1000 MW_e natriumgekühlten schnellen
Brutreaktor (Na 1),
KFK-Bericht Nr. 299, Dezember 1964
- [8] Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH.:
Bedienungsanweisung Trägerfrequenz-Meßverstärker KWS II/5
- [9] Bisplinghoff, R.L., Ashley, H., Halfman, R.L.:
Aeroelasticity,
Addison-Wesley Publ. Comp., Cambridge, Mass., 1955

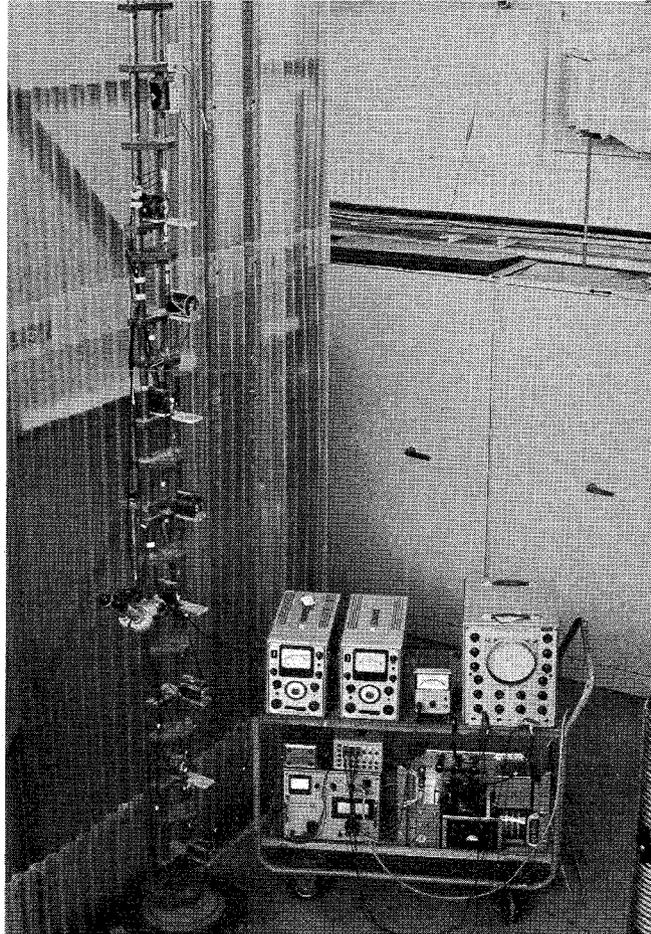


Bild 1 Gesamtblick auf die Versuchsanlage

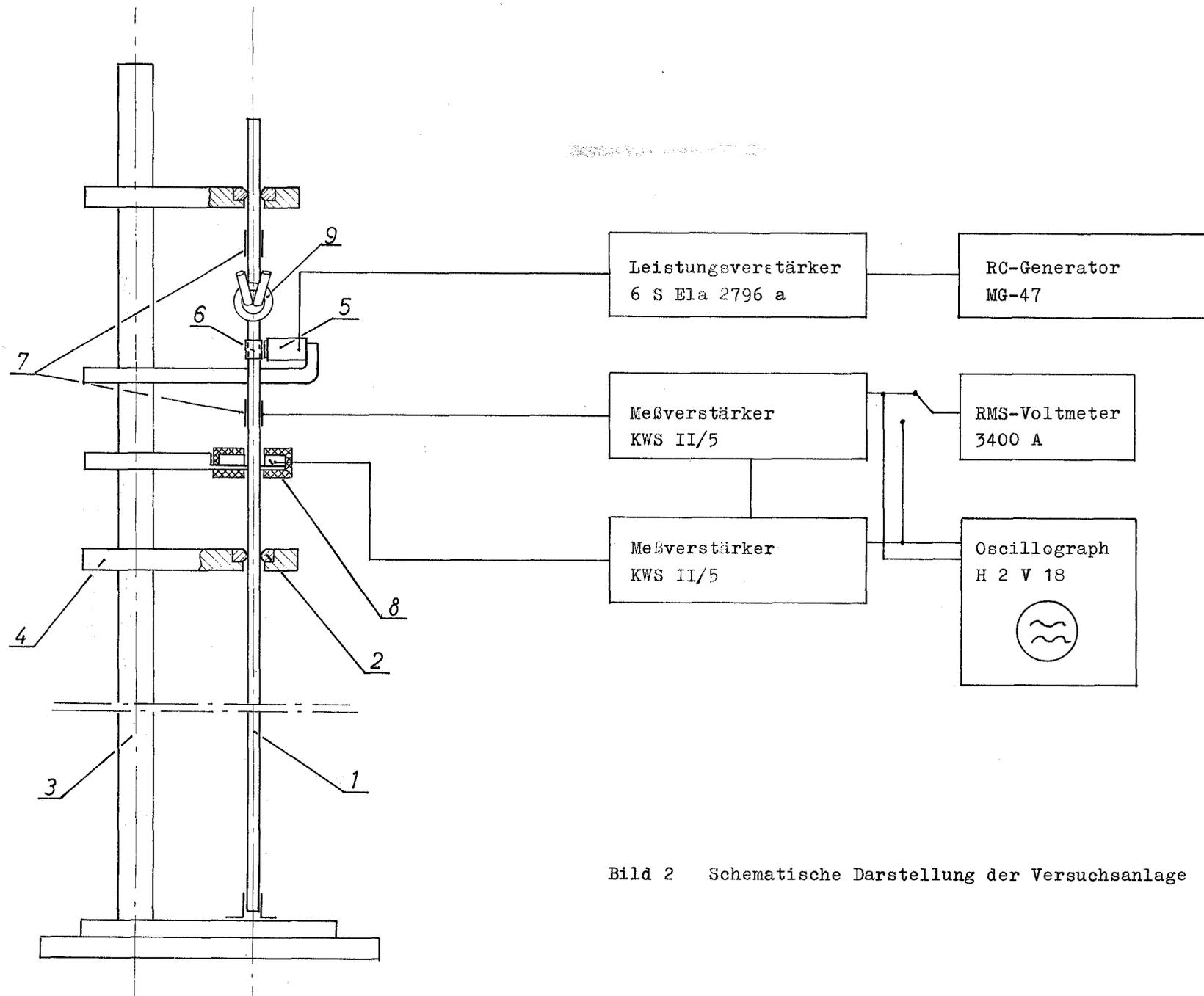


Bild 2 Schematische Darstellung der Versuchsanlage

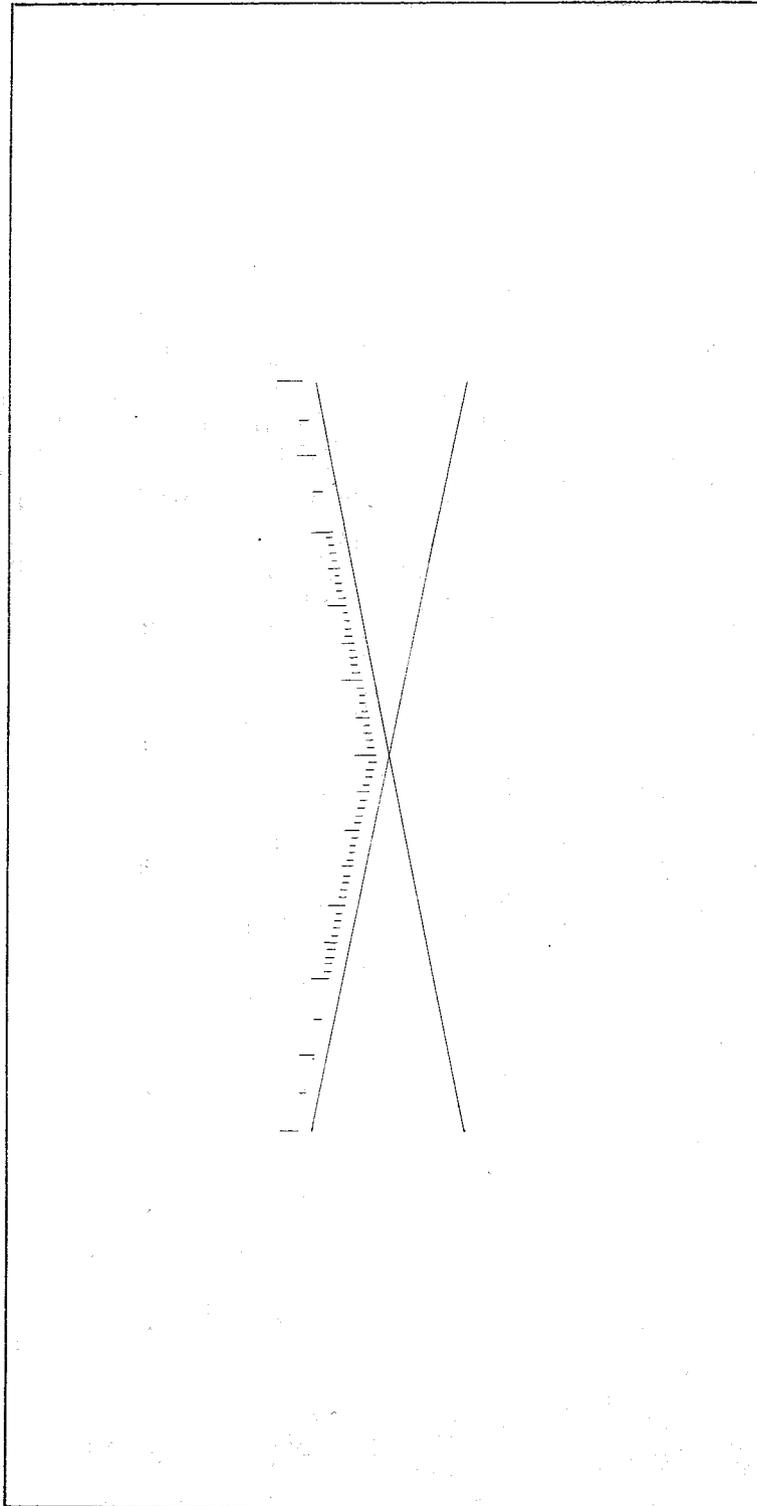


Bild 3 Optischer Schwingungsaufnehmer
("Meßkeil")

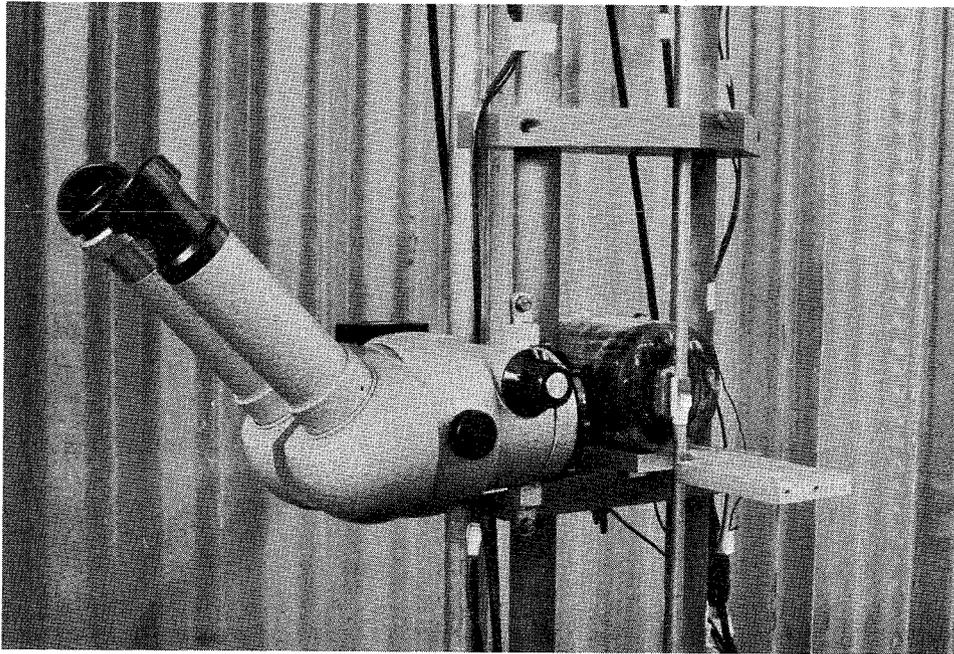


Bild 4 Detailaufnahme vom Meßobjekt

Bild: 5a Vergleich der berechneten Funktionen $G(x)$ und $L(x)$ mit den Resultaten der Messung

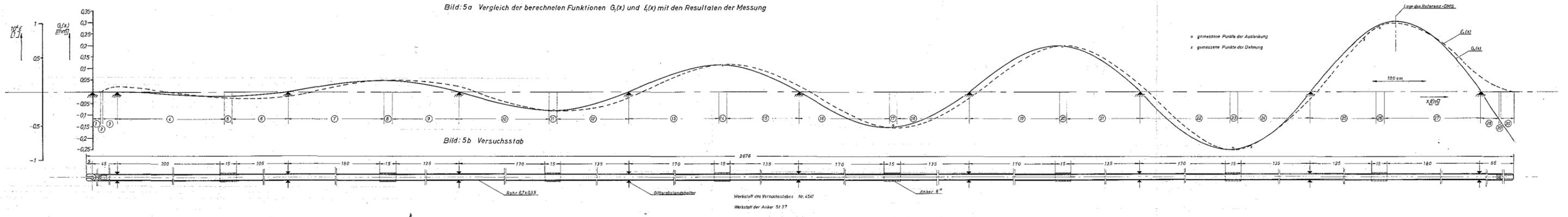


Bild 6a Abstandshalter

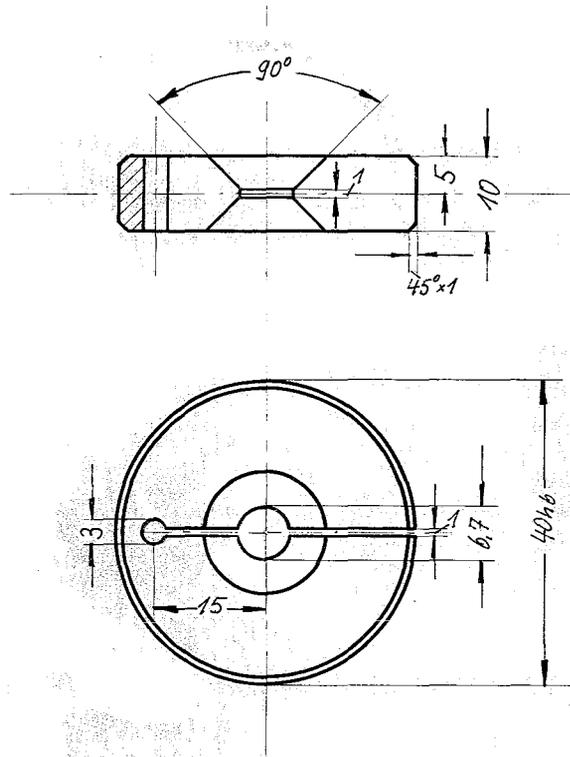


Bild 6b Schaltung der Spulen

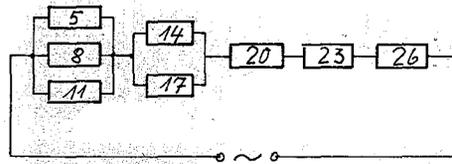


Tabelle 1 Meßstellen

Gemessene Größe	Ab-schnitt	x [cm]	Rechnung	Messung	[%]
Auslenkung	11	0,75	0,0824 mm	0,080 mm	3,00
Auslenkung	14	0,75	0,1175 mm	0,117 mm	0,51
Auslenkung	17	0,75	0,1570 mm	0,149 mm	5,37
Auslenkung	20	0,75	0,2020 mm	0,201 mm	0,49
Auslenkung	23	0,75	0,2540 mm	0,248 mm	2,42
Auslenkung	26	0,75	0,2950 mm	0,274 mm	7,67
Dehnung	24	2,7	$0,784 \cdot 10^{-4}$	$0,81 \cdot 10^{-4}$	-3,20
Dehnung	25	10,0	$0,776 \cdot 10^{-4}$	$0,75 \cdot 10^{-4}$	3,70
Referenz-Dehnung	27	2,3	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	-

$$= \frac{\text{berechneter Wert} - \text{gemessener Wert}}{\text{gemessener Wert}}$$

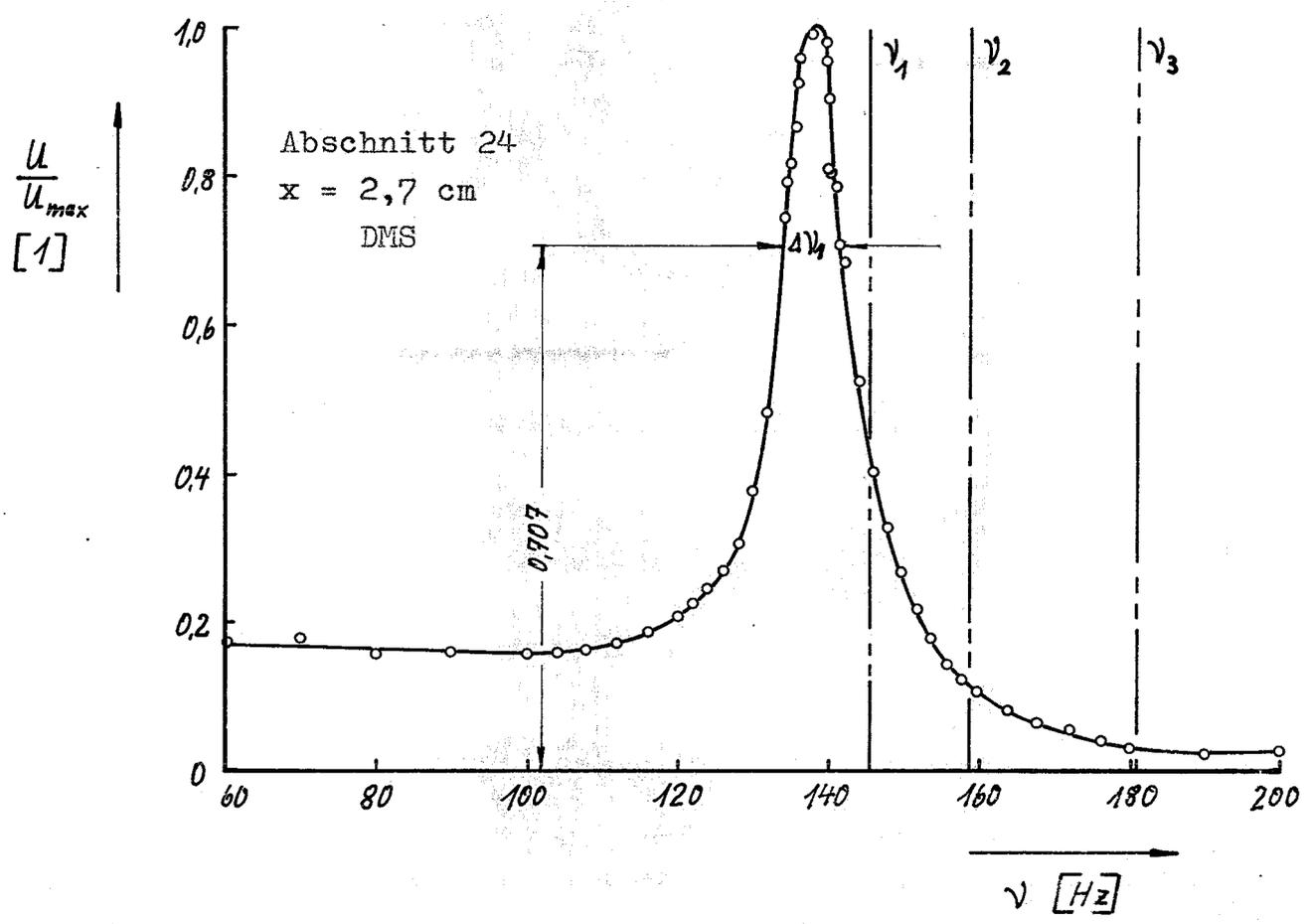


Bild 7 Resonanzkurve

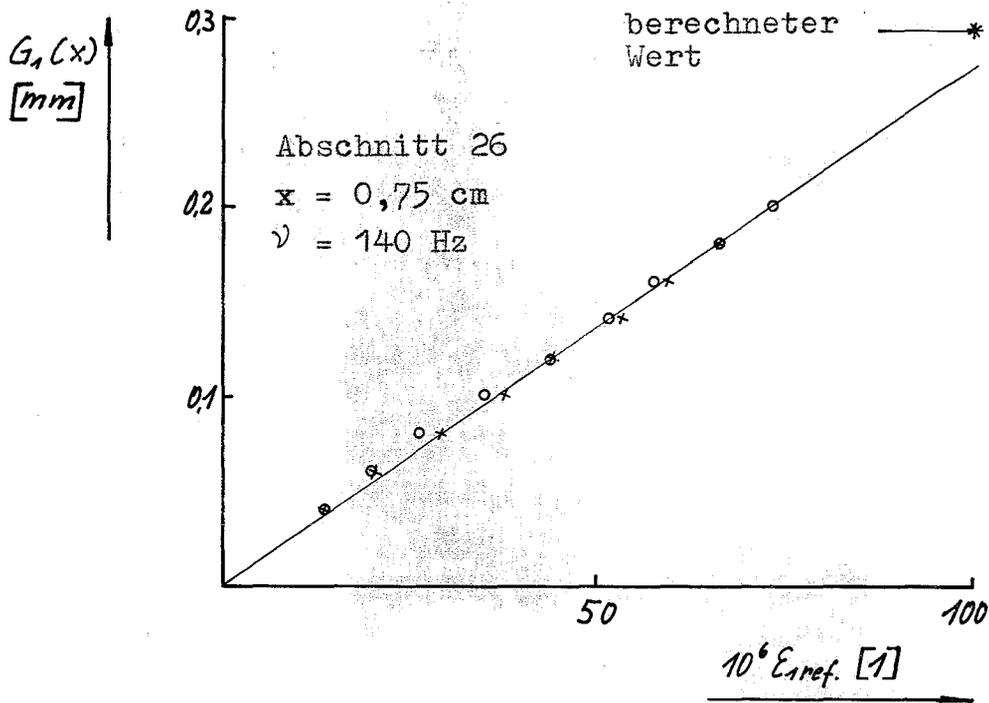


Bild 8 Auswertung der Messung der Amplitude der Auslenkung

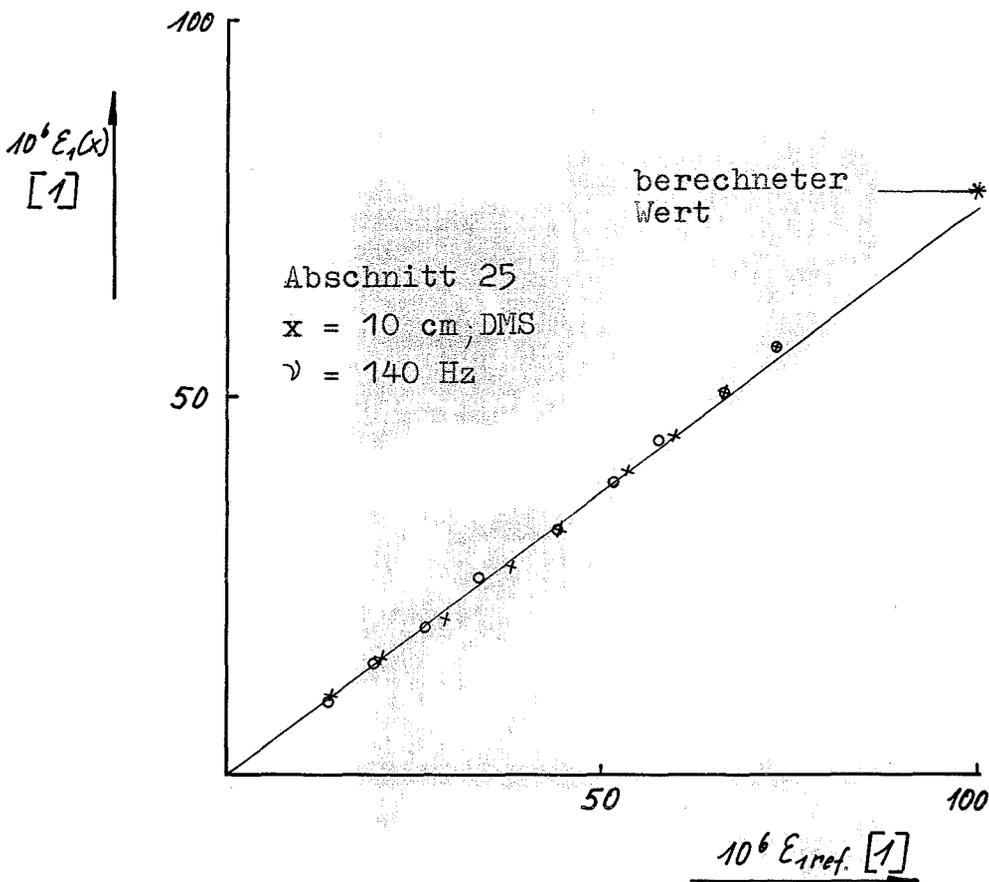


Bild 9 Auswertung der Messung der Amplitude der relativen Dehnung