

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

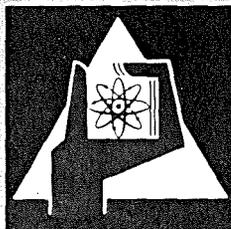
Oktober 1972

KFK 1693

Institut für Reaktorentwicklung

**Untersuchungen der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungs-
formen der Brennelementplatte des Hochflußreaktors Grenoble.**

J. Kadlec
W. Krüger



**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1693

Institut für Reaktorentwicklung

Untersuchungen der Eigenfrequenzen und der
Eigenschwingungsformen der Brennelement-
platte des Hochflußreaktors Grenoble.

J. Kadlec

W. Krüger

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den Untersuchungen der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenschwingungsformen der freien Schwingung der Brennelementplatten des Hochflußreaktors Grenoble.

Die entsprechende Meßanlage ist beschrieben und die Resultate der Untersuchungen für die 6 ersten Eigenschwingungsformen sind in Form von Profilkurven graphisch dargestellt und diskutiert. Für die Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser wurden geeignete Instrumentierungspositionen für die Dehnungsmeßstreifen ausgewählt. Die Relationen zwischen der relativen Biegedehnung und der Auslenkung der im Eigenschwingungszustand schwingenden Platte wurden experimentell bestimmt. Die Technologie der Instrumentierung und das entsprechende Meß- und Datenverarbeitungsverfahren wurde praktisch erprobt.

Abstract

Investigations of the Eigenfrequencies and the Corresponding Vibration Modes of the Free Vibration of Fuel Element Plates of the Grenoble High Flux Reactor.

The measuring equipment is described and the results of the investigations covering the first 6 vibration modes are represented graphically as profiles and discussed. For studies of vibration in a water flow, positions were selected for application of strain gauges, the relations were determined between the relative bending strain and the deflection of the plate cossillating in the vibrational mode, and the technology and instrumentations as well as the pertinent measuring and data processing systems were tested in practical applications.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	
1.0 Einleitung und Formulierung der Aufgabe	1
2.0 Theoretische Erwägungen	4
3.0 Experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungsformen der Originalplatte in Luft	11
3.1 Versuchsaufbau und Instrumentierung	11
3.2 Resultate der Untersuchungen	14
4.0 Vorversuche zur Instrumentierung der Brennelementplatte für die Messung im strömenden Wasser	17
5.0 Schlußbemerkung	21
Literatur	22

1.0 Einleitung und Formulierung der Aufgabe

Das Brennelement des Hochflußreaktors Grenoble und eine entsprechende Brennelementplatte sind auf den Bildern 1 und 2 schematisch dargestellt. Der Hüllwerkstoff der Brennelementplatte ist eine Al-Fe-Ni-Mg-Legierung mit ca. 96 % Al und je 1 % Fe, Ni und Mg. Der Kern der Platte besteht aus einer ca. 0,5 mm dicken Schicht einer U-Al-Legierung (69 % U). Die Brennelementplatten werden in einem Walzverfahren hergestellt. Da die einzelnen Kühlkanäle im Brennelement über die elastischen Brennelementplatten miteinander verbunden sind, besteht die Möglichkeit der Entstehung einer positiven Rückkopplung zwischen der Bewegung der schwingenden Platten und dem Druck- und Geschwindigkeitsfeld in den Kühlkanälen. Da das Auftreten dieses Phänomens die Lebensdauer der Brennelemente stark herabsetzen würde, ist die Untersuchung des durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der Brennelementplatten von prinzipiellem Interesse.

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Untersuchungen wurden im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt aufgrund des Auftrags des Instituts Max von Laue-Paul Langevin vom 16.7.1969, Position 2. Das Gesamtvorhaben ist laut Spezifikation [1] in folgende Untervorhaben gegliedert:

Pos. 2.1 - Eigenschwingungen einer Brennelementplatte

Pos. 2.2 - Erregerfrequenzen in der Strömung

Pos. 2.3 - Festigkeit der Verbindung Platten-Seiten

Pos. 2.4 - Direktmessung der Plattenschwingungen im Brennelementsegment

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten beschränken sich auf das Untervorhaben 2.1 und auf einige Vorarbeiten für das Untervorhaben 2.4, die im gleichen Zeitraum (1969 - 1971) durchgeführt wurden. Über die restlichen Arbeiten, die relativ später in Angriff genommen wurden und z.Z. teilweise noch nicht ganz abgeschlossen sind, wird separat berichtet. Das Teilvorhaben 2.1 wurde in [1] folgenderweise spezifiziert: "Die in einer steifen Vorrichtung eingespannte Platte wird durch elektromagnetisch erzeugte Schwingungen angeregt. Frequenz und Lage der Resonanzschwingungen werden durch

Dehnungsmeßstreifen ermittelt und ergeben ein Bild der im Betrieb möglichen Plattenschwingungen. Die Messungen wurden in Luft durchgeführt und die Ergebnisse umgerechnet auf eine im Wasser schwingende Platte. Die Fixierung der Platte an den Längsseiten erfolgt in Analogie zur geschweißten Assemblierung durch Festklemmen mittels Schrauben in folgenden Abständen:

- a) 3 cm von Schraube zu Schraube
- b) 6 cm von Schraube zu Schraube

Aus dem sich ergebenden Schwingungsbild sollen Ort und Größe der maximalen Spannungen in der Platte ermittelt werden".

Da im Laufe der Arbeiten der Abstand zwischen den Schweißnähten auf 3,6 cm festgelegt wurde, wurde die Untersuchung der 6,0 cm Variante abgebrochen und weiter nicht mehr verfolgt.

Für die Durchführung der Arbeit wurde ein Untersuchungsverfahren angewendet, das im IRE für die laufenden Untersuchungen der hydrodynamisch induzierten Brennstabschwingung benutzt wird [2]. Das Verfahren kann für den von uns untersuchten Fall in folgende 2 Schritte unterteilt werden:

- a) Experimentelle Bestimmung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen der freien, ungedämpften Schwingung der Brennelementplatte im Labor und Auswahl der geeigneten Instrumentierungspositionen an der Platte, an der die relative Biegedehnung (Referenzdehnung) für alle zu erwartenden Schwingungsformen gemessen wird.
- b) Messung des Zeitverlaufes der Referenzdehnung der schwingenden Brennelementplatte im strömenden Wasser, nachfolgende rechnerische Bestimmung der Spektraldichtefunktionen der Referenzdehnung und schließlich Berechnung der Spektraldichtefunktionen und der entsprechenden quadratischen Mittelwerte der Auslenkungen und der relativen Biegedehnungen (bzw. Biegespannungen) für alle Positionen an der Brennelementplatte, an denen große Auslenkungen oder Biegespannungen zu erwarten sind.

Wenn die Untersuchungen nach diesen beiden Schritten durchgeführt werden, dann ist der Schwingungszustand der Brennelementplatte mit technisch ausreichender Genauigkeit bekannt.

Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten beziehen sich im wesentlichen nur auf den ersten Schritt. Die mathematische Begründung des Verfahrens und die auf die Verteilung der Elektromagnete gerichteten theoretischen Überlegungen über die Eigenschwingungsformen der ebenen Platte sind im Kapitel 2.0 kurz zusammengefaßt. Die Beschreibung des Versuchsstandes für die experimentelle Untersuchung der Resonanzkurven und der Eigenschwingungsformen und die Resultate dieser Untersuchungen enthält das Kapitel 3.0. Die auf den zweiten Schritt gerichteten Arbeiten zur Auswahl und Eignung der Technologie der Applikation der Referenzdehnungsmeßstellen für die Messungen bei extrem hohen Wassergeschwindigkeiten und die praktische Überprüfung des vorgeschlagenen Meß- und Auswerteverfahrens sind im Kapitel 4.0 beschrieben. Die aus der Arbeit resultierenden Schlußfolgerungen sind im Kapitel 5.0 kurz zusammengefaßt.

2.0 Theoretische Erwägungen

Es wird angenommen, daß die schwingungserzeugenden Druckpulsationen im strömenden Kühlmittel des HFR-Brennelementes einen randomen Zeitverlauf haben, so daß die entsprechende dynamische Reaktion der Brennelementplatten als ein stationärer randomer Prozess betrachtet werden muß. Diese Annahme kann durch die Resultate der bisher durchgeführten Schwingungsuntersuchungen an den Brennstab-bündelelementen unterstützt werden. Die zur Zeit abgeschlossenen Schwingungsmessungen an den HFR-Brennelementplatten im strömenden Wasser haben diese Annahme bekräftigt.

Wie es z.B. in der Arbeit von Bendat [3] ausführlich begründet wurde, kann ein beliebiger, stationärer randomer Prozeß $z(t)$ (t bezeichnet die Zeit) durch seine Spektraldichtefunktion $S_z(\nu)$ (ν bezeichnet die Frequenz) im statistischen Sinne vollständig beschrieben werden. Aus diesem Grunde ist das Interesse bei den Schwingungsuntersuchungen an den HFR-Brennelementplatten der Gewinnung von Spektraldichtefunktionen der den Schwingungszustand der Platten beschreibenden Größen gewidmet. Da die den Schwingungszustand der Platten beschreibenden Funktionen $z(\vec{r}, t)$ (Auslenkung der Platte aus der Ruhelage) und $\epsilon(\vec{r}, t)$ (relative Biegedehnung der äußeren Faser der Hülle) nicht nur von der Zeit t , sondern auch von dem Radiusvektor \vec{r} wesentlich abhängen, müssen die diesen Größen entsprechenden Spektraldichtefunktionen $S_z(\vec{r}, \nu)$ und $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ ebenfalls als Funktionen des Radiusvektors \vec{r} betrachtet werden. Durch diese Sachlage können die Untersuchungen beträchtlich erschwert werden, da die rein experimentelle Bestimmung der kompletten Spektraldichtefunktionen $S_z(\vec{r}, \nu)$ und $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ einen erheblichen Aufwand darstellt. Vorausgesetzt, daß zwischen den einzelnen, durch die Eigenfrequenzen der Platte ν_j und die entsprechenden Dämpfungsquotienten ξ_j bestimmten Absorptionsbänder der Platte im Frequenzspektrum Intervalle existieren, in welchen die schwingungserregende Energie von der Platte aus der Strömung uneffektiv absorbiert werden kann (was die bisher durchgeführten Messungen schon bestätigt haben), ist es möglich, die Aufgabe zu vereinfachen. Die entsprechende Methode ist für den Fall von eindimensional betrachteten Brennstäben in der Arbeit [2]

beschrieben. Ihre Anwendung kann aber auch auf die dreidimensionalen HFR-Brennelementplatten ausgedehnt werden. In diesem Sinne wird zunächst als Frequenzband der j -ten Eigenfrequenz ν_j das Band der Frequenzen ν mit folgenden Eigenschaften definiert:

$$\nu_j' \leq \nu \leq \nu_j'' \quad (1)$$

$$S_\epsilon(\vec{r}, \nu_{j-1}'') = S_\epsilon(\vec{r}, \nu_j'),$$

$$S_\epsilon(\vec{r}, \nu_j'') = S_\epsilon(\vec{r}, \nu_{j+1}').$$

Die Grenzfrequenzen ν_j' und ν_j'' sind nach dieser Definition solche Frequenzen an beiden Seiten von ν_j , wo die Spektraldichtefunktion $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ ihr Minimum erreicht. Der bei dieser Unterteilung des gesamten Frequenzspektrums auf einzelne Frequenzbänder erzielte Gewinn besteht in der vereinfachten mathematischen Beschreibung der Spektraldichtefunktion, wie es im folgenden erläutert wird.

Für den Fall, daß die auf der Oberfläche der Brennelementplatte wirkenden Druckkräfte des strömenden Kühlmittels entlang dieser Oberfläche nur schwach korreliert sind, wird die Spektraldichtefunktion der relativen Dehnungen $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ durch einfache Superpositionen der Beiträge von den einzelnen Eigenschwingungsformen folgendermaßen ausgedrückt (die Ableitung kann in der gleichen Weise erfolgen wie in der Arbeit [2]):

$$S_\epsilon(\vec{r}, \nu) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\epsilon_j^2(\vec{r}) K_j^2}{[(\nu_j^2 - \nu^2)^2 + 4 \zeta_j^2 \nu_j^2 \nu^2] M_j^2} \quad (2)$$

In der Gleichung (2) bezeichnet das Symbol $\epsilon_j(\vec{r})$ die Dehnungsfunktion (Verteilung der Amplitude der relativen Biegedehnung entlang der Platte) der j -ten Eigenschwingungsform, M_j ist die generalisierte Masse der j -ten Eigenschwingungsform und K_j ist eine Konstante, in welcher die Auswirkung der schwingungserzeugenden hydrodynamischen Kräfte des Kühlmittels enthalten ist. Für die Spektraldichtefunktion der Auslenkung $S_z(\vec{r}, \nu)$ gilt ähnlich:

$$S_z(\vec{r}, \nu) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{G_j^2(\vec{r}) K_j^2}{\left[(\nu_j^2 - \nu^2)^2 + 4 \xi_j^2 \nu_j^2 \nu^2 \right] M_j^2}, \quad (3)$$

wobei $G_j(\vec{r})$ die Normalfunktion (Verteilung der Amplitude der Auslenkung) der j -ten Eigenschwingungsform bezeichnet. Im Frequenzband der j -ten Eigenfrequenz ($\nu \rightarrow \nu_j$) wird der Nenner in dem j -ten Term der Gleichung (2) und (3) minimalisiert, in allen übrigen Termen nimmt sein Wert beträchtlich zu. Durch das Einsetzen der realen Werte von ν , ν_j und ξ_j in die Gleichung (2) und (3) läßt sich leicht nachprüfen, daß im j -ten Frequenzband die Spektraldichtefunktionen $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ und $S_z(\vec{r}, \nu)$ mit relativ kleinem Fehler nur durch einen, nämlich den j -ten Term beschrieben werden können,

$$S_\epsilon(\vec{r}, \nu) \doteq \frac{\epsilon_j^2(\vec{r}) K_j^2}{\left[(\nu_j^2 - \nu^2)^2 + 4 \xi_j^2 \nu_j^2 \nu^2 \right] M_j^2} \quad (4)$$

und

$$S_z(\vec{r}, \nu) = \frac{G_j^2(\vec{r}) K_j^2}{\left[(\nu_j^2 - \nu^2)^2 + 4 \xi_j^2 \nu_j^2 \nu^2 \right] M_j^2}. \quad (5)$$

Der Fehler wird umso kleiner, je größer das Verhältnis $|\nu_j - \nu_k| / \nu_j$ wird und je kleiner das Verhältnis $|\nu_j - \nu| / \nu_j$ wird, wobei $j \neq k$ ist.

Das Verhältnis zwischen den auf zwei unterschiedlichen Positionen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 bezogenen Spektraldichtefunktionen $S_\epsilon(\vec{r}_1, \nu)$ und $S_\epsilon(\vec{r}_2, \nu)$, bzw. $S_z(\vec{r}_1, \nu)$ und $S_z(\vec{r}_2, \nu)$, wird dann

$$\frac{S_\epsilon(\vec{r}_1, \nu)}{S_\epsilon(\vec{r}_2, \nu)} = \frac{\epsilon_j^2(\vec{r}_1)}{\epsilon_j^2(\vec{r}_2)}, \quad (6)$$

bzw.

$$\frac{S_z(\vec{r}_1, \nu)}{S_z(\vec{r}_2, \nu)} = \frac{G_j^2(\vec{r}_1)}{G_j^2(\vec{r}_2)}, \quad (7)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots; \quad \nu_j' \leq \nu \leq \nu_j''$$

Aus den Gleichungen (6) und (7) folgt, daß die Spektraldichtefunktionen $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ und $S_z(\vec{r}, \nu)$ für die ganze Platte berechnet werden können, wenn sie für einen einzelnen Referenzpunkt \vec{r}_{ref} bekannt sind. Wenn zusätzlich die Relationen zwischen den Eigenfunktionen $\epsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ bekannt sind, kommt man mit der Kenntnis nur einer dieser zwei Spektraldichtefunktionen völlig aus. Für die Berechnungen müssen allerdings die Eigenfunktionen $\epsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ für alle \vec{r} bekannt sein. Bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens reicht es aber aus, wenn die Eigenfunktionen $\epsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ nur für einige interessante Positionen bekannt sind, wo $\epsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ ihre Maximalwerte erreichen. Die früher erwähnte, auf den Referenzpunkt \vec{r}_{ref} bezogene und für die Berechnung ebenfalls benötigte eine Spektraldichtefunktion kann am bequemsten über die Messung der relativen Biegedehnung der schwingenden Platte $\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, t)$ (Referenzdehnung) gewonnen werden. Die geeigneten Positionen \vec{r}_{ref} , an denen die für diese Messung benötigten Dehnungsmeßstreifen appliziert werden müssen, werden aufgrund der Kenntnis von $\epsilon_j(\vec{r})$ ausgewählt. Aus der in den Referenzpositionen \vec{r}_{ref} bestimmten Spektraldichtefunktionen der Referenzdehnung $S_\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu)$ wird die entsprechende Spektraldichtefunktion der Auslenkung $S_z(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu)$ nach folgender Formel stückweise bestimmt:

$$S_z(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu) = \frac{G_j^2(\vec{r}_{\text{ref}})}{\epsilon_j^2(\vec{r}_{\text{ref}})} S_\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu), \quad (8)$$

wobei $\nu_j' \leq \nu \leq \nu_j''$. Die Berechnungen von $S_\epsilon(\vec{r}, \nu)$ und $S_z(\vec{r}, \nu)$ für alle übrigen \vec{r} erfolgen dann nach den Gleichungen (6) und (7).

Kurz zusammenfassend kann aufgrund der bisherigen Erwägungen gesagt werden, daß der Schwingungszustand der Brennelementplatten durch die Kenntnis von $S_\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu)$, $\epsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ mit technischer ausreichender Genauigkeit eindeutig bestimmt ist. Die Funktion $S_\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, \nu)$ kann über direkte Messung des Zeitverlaufes der Referenzdehnung $\epsilon(\vec{r}_{\text{ref}}, t)$ bestimmt werden. Die auf diese Messung bezogenen Vorversuche werden in Kap. 4.0 behandelt. Der Rest des

Berichtes bezieht sich auf die Bestimmung von $\varepsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ und auf die Auswahl von geeigneten Referenzpositionen \vec{r}_{ref} .

Wie im Kap. 1.0 schon kurz erwähnt, wurde für die Bestimmung der Eigenfunktionen $\varepsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ ein experimentelles Verfahren gewählt. Bei diesem Verfahren werden die gesuchten Funktionen an der in der j-ten Eigenschwingungsform schwingenden Brennelementplatte direkt gemessen. Die dafür benötigte periodische Schwingung der Platte wird elektromagnetisch angeregt. Das kann realisiert werden durch ein System von Elektromagneten, dessen senkrecht auf die Platte wirkende Anziehungskraft $F_j(\vec{r}, t)$ folgende Relation erfüllt:

$$F_j(\vec{r}, t) = A_j(\vec{r}) \sin 2\pi \nu t, \quad (9)$$

wobei die Erregungsfrequenz ν in der Nähe von der Eigenfrequenz ν_j liegt. Weitere Überlegungen beziehen sich auf die optimale Auslegung der räumlichen Verteilung der Amplitude der Anziehungskraft $A_j(\vec{r})$.

Ähnlich wie im Falle eines Brennstabes [4] läßt sich analytisch nachweisen, daß die Brennelementplatte in ihrer "reinen" j-ten Schwingungsform dann schwingen wird, wenn die räumliche Verteilung der Amplitude der Anziehungskraft $A_j(\vec{r})$ in der Gleichung (9) folgende Relation erfüllt:

$$A_j(\vec{r}) \approx G_j(\vec{r}) . \quad (10)$$

Dieses wichtige Zwischenergebnis liegt der in der vorliegenden Arbeit angewandten Methode der experimentellen Bestimmung der Eigenfunktionen $\varepsilon_j(\vec{r})$ und $G_j(\vec{r})$ zugrunde. Bei dieser Anwendung sind allerdings zwei Schwierigkeiten zu begegnen:

- a) laut der Gleichung (10) soll die zu untersuchende Eigenfunktion $G_j(\vec{r})$ schon im voraus bekannt sein,
- b) technische Schwierigkeiten bei der Realisierung der Bedingung (10).

Glücklicherweise wurde im Fall von Brennstäben öfters nachgewiesen [4, 5], daß es genügt, wenn die Bedingung (10) nur in der ersten

Näherung und nur in einigen diskreten Punkten erfüllt wird. Aufgrund dieser Erfahrung wurde die entsprechende erste Näherung gesucht. Da die Evolventen-Krümmung der HFR-Brennelementplatten nicht zu groß ist, kann man voraussetzen, daß die Kenntnis der Eigenschwingungsform $G_j(\vec{r})$ einer ebenen Platte für die Entscheidung über die Verteilung der Elektromagnete nach der Gleichung (10) ausreichende Information liefern würde. Die Eigenschwingungsformen einer ebenen, homogenen dünnen Platte wurden in der Arbeit von Zeissig [6] diskutiert. Dabei wurde angenommen, daß die rechteckige Platte mit den Abmessungen a (Länge der Platte in der Richtung der α -Achse) und $2b$ (Länge in der β -Achse) an den parallel zur β -Achse liegenden Kanten gelenkig gelagert wurde, wobei die übrigen zwei Kanten frei bleiben. Die in der Arbeit [6] ausführlich diskutierte Lösung der Differentialgleichung der freien Biegeschwingung der Platte mit den entsprechenden Randbedingungen hat die Form

$$G(\alpha, \beta) = e^{q\beta} \sin \frac{K\pi\alpha}{a}, \quad (11)$$

wobei $K = 1, 2, 3 \dots$ ist. Die Zahl q ist im allgemeinen komplex und enthält diskret sich ändernde Werte, die von K und dem Verhältnis a/b abhängen. Bei vorgegebenen a/b bekommt man für jeden Wert von K eine Reihe von q -Werten, die entweder den Schwingungsformen mit gerader Anzahl der Knotenlinien parallel zur α -Achse (symmetrische Schwingungsformen) oder den Schwingungsformen mit ungerader Anzahl der Knotenlinien parallel zur α -Achse (unsymmetrische Schwingungsformen) entsprechen. Für $a/b = 0,171$, was der HFR-Brennelementplatte entspricht, bekommt man für $K = 1$ mindestens 6 symmetrische und 5 unsymmetrische Eigenschwingungsformen. Da die diesen ersten Eigenschwingungsformen entsprechenden Eigenfrequenzen der Platte den energiereichen Frequenzbereich der schwingungserzeugenden Druckpulsationen im strömenden Kühlmittel weit überdecken, ist es berechtigt zu erwarten, daß die den höheren Werten von K ($K > 1$) entsprechenden Eigenschwingungsformen von den zu erwartenden Druckpulsationen kaum angeregt werden können. Daraus folgt ein weiteres wichtiges Ergebnis der theoretischen Analyse, nach dem es genügt, nur die dem Wert $K = 1$ entsprechenden Eigenschwingungsformen zu untersuchen. Das hat eine wesentliche Vereinfachung der experimentellen Arbeit zur Folge, das es in diesem Fall völlig ausreicht,

die Erregungsmagnete nur auf einer geraden Linie parallel zur β -Achse etwa in die Mitte der HFR-Platte (über dem Maximalpunkt der Evolvente) zu plazieren. Als weiteres Zwischenergebnis der Analyse ergibt sich, daß die Eigenschwingungsformen mit der geraden und ungeraden Anzahl der Knotenlinien parallel zur α -Achse zu erwarten sind.

3.0 Experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungsformen der Originalplatte in Luft

In Übereinstimmung mit den Resultaten der theoretischen Analyse wurde ein Versuchsstand für die elektromagnetische Erregung der Plattenschwingung in Eigenschwingungsformen konzipiert, an dem die Elektromagnete an beliebigen Stellen entlang der Längsachse der Platte positioniert werden können. Die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenschwingungsformen der Originalplatte wurden dann in 4 Meßschritten gefunden:

- a) Aufnahme der Resonanzkurve bei der Erregung mit nur einem einzigen Elektromagnet. Der Elektromagnet wurde an der Stelle montiert, an der ein Maximalwert der Eigenschwingungsform erwartet wurde.
- b) Messung der entsprechenden Schwingungsform bei der Erregerfrequenz nahe der gefundenen Resonanzfrequenz.
- c) Aufnahme der Resonanzkurve bei der Erregung mit 15 Elektromagneten. Die Zahl der Windungen der einzelnen Elektromagnete wurde dabei der im Schritt b) gemessenen Schwingungsform angepaßt.
- d) Messung der entsprechenden Schwingungsform bei der Erregerfrequenz nahe der gefundenen Resonanzfrequenz.

In den folgenden Abschnitten werden der Versuchsstand und die Resultate der Messungen beschrieben. Zum Schluß des Kapitels werden die ausgewählten Instrumentierungspositionen für die Applikation der den einzelnen Eigenschwingungsformen zugehörigen Referenz-Dehnungsmeßstreifen spezifiziert.

3.1 Versuchsaufbau und Instrumentierung

Für die experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenz und der entsprechenden Eigenschwingungsformen der freien, ungedämpften Biegeschwingung der Brennelementplatte in Luft wurde ein Versuchsstand mit elektromagnetischer Schwingungserregung aufgebaut. Einen Gesamtblick auf den Versuchsstand zeigt Bild 3. Die Hauptkomponenten des Versuchsstandes sind (Bild 4): ① Gestell, ② Einspannvorrichtung, ③ Topfmagnet, ④ Anker

(Armco-Eisen), ⑤ Brennelementplatte, ⑥ Dehnungsmeßstreifen und ⑦ Wegeaufnehmer. Ein horizontaler Schnitt durch die Einspannvorrichtung mit der Brennelementplatte, einem Erregungsmagnet und dem entsprechenden Anker ist auf Bild 5 dargestellt. Die in die Einspannvorrichtung eingelegte Platte wurde an beiden Längsseiten mit Klemmleisten eingespannt. Die zusätzliche Verspannung der Platte im HFR-Brennelement durch die Elektronenstrahl-Schweißnähte wurde mit M4-Anpreßschrauben simuliert. In Übereinstimmung mit der Spezifikation der Aufgabe wurde auf jeder Seite der Platte 31 Anpreßschrauben angebracht. Die Abstände zwischen den Anpreßschrauben betragen 30 mm und an einem Ende der Platte nur 21 mm. Die Mitte der Anpreßschrauben ist von der Außenseite der Brennelementplatte etwa 1 mm entfernt. Die vertikale Verteilung der Anpreßschrauben auf der Brennelementplatte ist auf Bild 6 angegeben.

Die in Gehäusen aus Armco-Eisen eingebauten Spulen wurden von einem RC-Generator Typ MG-47 der Fa. Wandel u. Goltermann über einen 250 Watt Eladyn-Endverstärker Typ 6 S Ela 2796 a der Fa. Siemens gespeist. Alle Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen (160 bis 300) wurden dabei in Serie geschaltet. Die Erregerfrequenz wurde mit dem Universalzähler Typ UZ 42 Q der Fa. Grundig gemessen.

Für die Aufnahme von relativen Dehnungen wurden an einigen Stelle der Brennelementplatte Dehnungsmeßstreifen Typ PL-3 der Fa. Tokyo Sokki Kenkyujo appliziert. Diese DMS wurden in einer Halbbrückenschaltung am Eingang des Meßverstärkers Type KWS II/5 der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik (Trägerfrequenz 5 kHz) angeschlossen. Die RMS-Werte der Ausgangsspannung wurden mit dem RMS-Voltmeter Typ 3400 A der Fa. Hewlett-Packard gemessen. Um den Zeitverlauf der relativen Dehnungen der schwingenden Platte beobachten zu können, wurde noch parallel dazu ein Zweistrahloszillograph Typ H 2 V 18 der Fa. Hottinger eingesetzt.

Für die Aufnahme der Auslenkungen der schwingenden Brennelementplatte wurde das Wegaufnehmersystem des Druckaufnehmers Typ PlM der Fa. Hottinger angewendet. Zur Übertragung der Bewegung der Platte auf das Meßsystem wurde auf die Membrane des Aufnehmers ein leichter

metallischer Konus aufgeklebt. Der Tastkonus des so entstandenen Wegaufnehmers wurde während der Messung auf die schwingende Brennelementplatte mit der Hand angepresst. Durch Versuche wurde festgestellt, daß die Amplitude der **angeregten Brennelementplatte** durch das Anpressen des Aufnehmers in einem sehr breiten Intervall der Anpresskraft nicht beeinflusst wird. Der Wegaufnehmer wurde ebenfalls an den KWS II/5 Meßverstärker angeschlossen. Für die dynamische Kalibrierung des Wegaufnehmers wurde die auf Bild 7 schematisch dargestellte Kalibriervorrichtung benutzt. Die Schwingung des auf der Grundplatte ① befestigten Kalibrierbalkens ② wurde mit dem für die Kalibrierung bestimmten Wegaufnehmer ③ aufgenommen, der an die gleichen Meßgeräte angeschlossen ist wie im Falle des vorher beschriebenen Versuchsstandes. Die Schwingung des Kalibrierbalkens wurde vom Topfmagnet ④ über Anker ⑤ erregt. Für die Speisung der Spule des Topfmagnetes wurden die gleichen Geräte benutzt, wie im vorhergehenden Fall. Die Schwingungsamplitude am äußeren Ende des Kalibrierbalkens wurde von einem Meßkeil ⑥ mit Hilfe des Stereomikroskops ⑦ Typ III der Fa. Karl Zeiss abgelesen. Das dabei angewandte Meßprinzip ist in der Arbeit [4] ausführlich beschrieben. Die mit dem Meßkeil gemessene Amplitude wurde in die von dem Wegaufnehmer aufgenommene Amplitude über die berechnete erste Eigenschwingungsform des Balkens umgerechnet. Auf diese Weise konnte die sehr kleine Amplitude des Kalibrierbalkens für die Messung insgesamt 100 x vergrößert werden. Die erste 10-fache Vergrößerung wurde mit Hilfe der Eigenschwingungsform erreicht, die zweite mit Hilfe des Meßkeils. Dem Entwurf der Kalibriervorrichtung liegen die bei den Schwingungsuntersuchungen von Brennstäben gewonnenen Erkenntnisse über sehr gute Stabilität der Eigenschwingungsformen in Bezug auf kleine Steifigkeits- und Massenänderungen zugrunde [7]. Für die Berechnungen der Eigenschwingungsformen wurde das in der Arbeit [8] beschriebene und öfters verifizierte [5, 7] Rechenprogramm benutzt. Als Resultat der Kalibrierung wurde eine sehr gute Linearität des Wegaufnehmers festgestellt. Die bei 64 Hz im empfindlichsten Meßbereich des Meßverstärkers gemessene Empfindlichkeit des Wegaufnehmers beträgt $27,1 \text{ mikron/V}_{\text{eff}}$.

3.2 Resultate der Untersuchungen

Es wurden die 6 ersten Eigenschwingungsformen untersucht. Die entsprechenden Eigenfrequenzen liegen bei 302, 377, 530, 603, 689 und 760 Hz. Da die Masse der auf die Brennelementplatte angebrachten Anker der virtuellen Masse des verdrängten Wassers in etwa entspricht, werden diese Werte auch für die Eigenschwingung der Brennelementplatten im Wasser gültig sein. Größere Differenzen sind dann zu erwarten, wenn die Brennelementplatten nicht reproduzierbar hergestellt und in das Brennelement ebenso eingeschweißt werden können.

Die Längs- und Querprofile der Eigenschwingungsformen für die beiden Schwingungserregungsarten (mit 1 und 15 Magneten) und die Resonanzkurven sind auf den Bildern 8 bis 13 graphisch dargestellt. Aus den Diagrammen kann abgeleitet werden, daß die Erregung mit einem einzigen Elektromagnet nur eine erste Information über die Eigenschwingungsformen liefern kann. Die dabei entstehenden Schwingungszustände sind nicht ganz stabil und der auf dem Schirm des Zweikanaloszillographen beobachtete Zeitverlauf der Schwingung wird oft noch verzerrt, was auf die Überlagerung von höheren Schwingungsformen hindeutet. Dagegen wurden bei der Erregung mit 15 Elektromagneten stabile und gut reproduzierbare Schwingungszustände erreicht. Der beobachtete Zeitverlauf der Schwingung war eindeutig sinusförmig. Die Positionen der Elektromagnete sind auf dem Bild 6 eingezeichnet. Die den einzelnen Eigenschwingungsformen angepaßten Windungszahlen der Spulen sind in der Tabelle 1 angeführt. Das negative Vorzeichen vor einigen Werten der Windungszahlen der Magnetanordnung B und E ist so zu erklären, daß die entsprechenden Spulen in Übereinstimmung mit den Eigenschwingungsformen negativ orientiert (auf der entgegengesetzten Seite der Brennelementplatte montiert) sind. Die gemessenen Eigenschwingungsformen sind sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch und entsprechen in groben Zügen den Eigenschwingungsformen der ebenen Platte. Dieses Zwischenergebnis kann bei den Schwingungsuntersuchungen von anderen plattenförmigen Bauteilen, z.B. Teilen des Reaktorcontainments, nützlich sein.

In Bezug auf den Fall der hydrodynamisch induzierten Schwingung von Brennelementplatten können aufgrund der gewonnenen Resultate einige positive Schlüsse gezogen werden. Wie die Untersuchungen der schwingungserzeugenden turbulenten Druckpulsationen in Brennelement-

bündeln ergaben $\sim 10^{-7}$, ist die Energie der Druckpulsationen im Frequenzbereich über 200 Hz relativ niedrig. Da die erste Eigenfrequenz der Brennelementplatte etwa bei 300 Hz liegt, ist zu erwarten, daß durch die Wirkung von turbulenten Druckpulsationen nur eine energetisch schwache Plattenschwingung induziert werden kann. Dieser Schluß kann durch die Resultate der Messung der Eigenschwingungsformen bekräftigt werden. Da die Korrelationslänge der turbulenten Druckpulsationen, die nur einige hydraulische Durchmesser beträgt, relativ klein ist im Vergleich zu den gemessenen Wellenlängen der Eigenschwingungsformen, kann eine energetisch reiche Koinzidenz nicht entstehen. Der relativ flache Verlauf der im gegebenen Frequenzbereich hydrodynamisch induzierten Eigenschwingungsformen hat weiter zur Folge, daß keine zu große Spannungskonzentrationen an den Schweißstellen entstehen können.

Für die Aufnahme der Referenzdehnung bei den Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser wurden insgesamt 13 DMS-Referenzpositionen gewählt. Die Koordinaten der Referenzpositionen und die Zuordnung der einzelnen Referenz-DMS zu den entsprechenden Eigenschwingungsformen sind in der Tabelle 2 angeführt. Die Lage der DMS ist auf Bild 14 erkennbar. Für jeden Referenz-DMS wurde die entsprechende Relation zwischen der Referenzdehnung und der Auslenkung an der typischen Stelle der Brennelementplatte (wo die entsprechende Eigenschwingungsform ihren Maximalwert erreicht) experimentell bestimmt. Mit Hilfe dieser Relationen können die auf den Bildern 8 bis 13 dargestellten Profilkurven, wo nur relative Werte der gemessenen Ausgangsspannung vom Meßverstärker U/U_{\max} aufgetragen sind, normiert werden. Die Resultate dieser Normierung sind in den Bildern 8 bis 13 oben rechts angeführt. So bedeutet z.B. die Relation für den Referenz-DMS Nr. 1: $1 \mu D \hat{=} 0,0096 \text{ mm}$ (für $x = 495 \text{ mm}$, $y = -10 \text{ mm}$), daß dem Wert der Amplitude der Referenzdehnung 10^{-6} (bezeichnet als 1 Mikrodehnung - 1 μD) an der Stelle mit den Koordinaten $x = 495 \text{ mm}$ und $y = -10 \text{ mm}$ der Wert $0,0096 \text{ mm}$ als Amplitude der Auslenkung entspricht. Die Amplituden der Auslenkung an den anderen Stellen der Brennelementplatte werden in Übereinstimmung mit den Profilkurven entsprechend kleiner. Die Relationen Referenzdehnung zur Auslenkung werden später in die in den Kapiteln 1.0 und 2.0 erwähnten Umrechnungen der Spektraldichtefunktionen der während der Versuche im

strömenden Wasser gemessenen Zeitverläufen der Referenzdehnung einbezogen. Von seiten der Meßtechnik geben die Relationen Referenzdehnung zur Auslenkung einen Aufschluß über die Empfindlichkeit des vorgeschlagenen Meßverfahrens. Da die Werte der Referenzdehnung von ca. $0,25 \cdot 10^{-6}$ noch gut auflösbar sind, können in Übereinstimmung mit den oben diskutierten Relationen die Amplituden der Auslenkungen von ca. 2,5 bis 25 μ noch gut aufgelöst werden.

4.0 Vorversuche zur Instrumentierung der Brennelementplatte für die Messung im strömenden Wasser

Um die in Kapitel 1.0 unter der Position 2.4 angeführten Messungen des Schwingungszustandes der Brennelementplatten im strömenden Wasser durchführen zu können, war es notwendig, die Funktionstüchtigkeit der Instrumentierung zu erproben. Dabei wurden folgende Gesichtspunkte verfolgt:

Eine kleine Abmessung der Dehnmeßstreifen und der Anschlüsse (zur Vermeidung der Erzeugung von Turbulenz im engen Strömungskanal), ein ausreichender Isolationswiderstand (bei Wassergeschwindigkeiten von 16 m/sec und einem statischen Druck bis 12 atü) und mechanische Stabilität und Zuverlässigkeit im Hinblick auf die Assemblierung des Brennelementes (die Brennelementplatten wurden nach der Instrumentierung assembliert und nach dem Elektronenstrahlschweißverfahren im Vakuum verschweißt). Um diese Gesichtspunkte zu erfüllen, wurden Vorversuche im IRE und bei einigen Fremdfirmen durchgeführt.

Im IRE wurden Laborversuche im stagnierenden Wasser durchgeführt, um die Standfestigkeit, bezogen auf die Güte des Isolationswiderstandes verschiedener Abdeckmittel in Verbindung mit den von uns verwendeten Dehnmeßstreifen PLS 10-11 von der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo und dem Klebemittel P2 der gleichen Firma aufgebracht auf einer Aluminiumplatte (Al-Fe-Ni-Mg-Legierung), zu testen. Außerdem wurde ein langzeitiger Biegebeanspruchungstest, um evtl. Ablöseerscheinungen zu studieren und ein Vakuumtest durchgeführt. Von allen verwendeten Abdeckmitteln stellte sich das Produkt der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo als das am besten geeignete heraus.

Dieses Abdeckmittel des Typs PS wurde in sechs dünnen Schichten auf die Dehnmeßstreifenstelle, die mit P2-Kleber vorbereitet war, aufgetragen. Jede Schicht wurde 8 Stunden bei Infrarot-Bestrahlung an der Luft ausgehärtet. Die letzte Schicht wurde mit 3 °C/min im Elektroofen auf 180 °C erhitzt und ebenso abgekühlt. Die so aufgebraachte Abdeckung ist bearbeitbar z.B. überschleifbar.

Nach 30 Stunden Einsatz im stagnierenden Wasser, wobei für 8 Stunden die Wassertemperatur auf 70 °C heraufgesetzt wurde, konnte ein Isolationswiderstand besser als 500 M Ω gemessen werden (Gerät: Isolationsmesser Typ I/100-1000 der Firma Metrawatt mit Testspannung 100 V).

Daraufhin wurde zur weiteren Erprobung der Technologie der Instrumentierung der HFR-Brennelementplatten und der Signalerfassung für die Messungen im strömenden Wasser ein Versuchseinsatz konzipiert und gebaut (Bild 15).

Die dafür verwendete Modellplatte bestand aus einem ebenen Aluminiumblech mit den Maßen $300 \times 100 \times 1,6$ mm, das in Längsnuten mit 2 Aluminiumleisten vernietet war. Diese Modellplatte wurde mit Teflondichtungen mit 2 ebenen Längsflanschen verschraubt, so daß die Platte auf beiden Seiten durch einen Kanal von $75 \times 1,8$ mm vom Wasser angeströmt werden konnte. In einem der Längsflansche waren 4 Bohrungen vorgesehen, um die Druckaufnehmer des Typs PL-070-100S der Firma Kulite zu applizieren. Dieser Strömungskanal wurde seinerseits durch 2 Runddichtungen und 2 Rundflansche mit einem Kanalschlitz an den axialen Ausgängen abgedichtet. Die Modellplatte wurde mit 4 Meßstellen (DMS Nr. 5W, 6W, 7W und 8 W), wie auf Bild 16 schematisch dargestellt, instrumentiert. Es wurde dasselbe Verfahren, wie vorher geschildert, angewendet, wobei die Dehnmeßstreifen direkt an eine 2-adrige edelstahlgemantelte Meßleitung angeschlossen wurden. Außerdem ist auf Bild 16 die Positionierung der Druckaufnehmer DA I, IV, VIII, III zu erkennen.

Parallel zu der von uns instrumentierten Modellplatte, wurde eine Instrumentierung mit je einer identischen Modellplatte bei der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik in Darmstadt mit den DMS Nr. 13W, 14W, 15W, 16W u. bei der Firma CERCA in Romans (Frankreich) mit den DMS Nr. 1W, 2W, 3W, 4W vorgenommen. Dabei wurden die bei diesen Firmen entwickelten Instrumentierungs- und Abdeckverfahren ausprobiert.

Diese Modellplatten wurden nacheinander in die Teststrecke (Bild 17) eingebaut. Die Teststrecke wurde in einem Wasserkreislauf des Instituts für Reaktorentwicklung eingesetzt (Bild 18). Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 16 m/sec und einer Wassertemperatur von 20°C bis 70°C wurden die instrumentierten Modellplatten ca. 100-150 Stunden hinsichtlich der Güte des Isolationswiderstandes getestet. Angestrebt wurde ein Isolationswiderstand nicht kleiner als $1 \text{ M}\Omega$. Einen Überblick über das Standvermögen bezogen auf den Isolationswiderstand vermittelt Bild 19 für unsere Modellplatte und Bild 20 für die CERCA-Modellplatte.

Bild 19 zeigt, daß nach einem Einsatz von ca. 145 Stunden der DMS Nr. 5W einen Isolationswiderstand von ca. 160 M Ω als maximalen Versuchswert, und der DMS Nr. 6W einen Isolationswiderstand von ca. 3 M Ω als minimalen Versuchswert erreichten. Bild 20 zeigt, daß nach einem Einsatz von ca. 160 Stunden der DMS Nr. 3W einen Isolationswiderstand von 200 M Ω als maximalen Versuchswert und der DMS Nr. 1W einen Isolationswiderstand von 1 M Ω als minimalen Versuchswert. Somit zeigte sich die gute Tauglichkeit beider Instrumentierungstechniken.

Einen optischen Eindruck der Instrumentierung vermittelt für unsere Modellplatte das Bild 21 mit den Dehnmeßstreifen Nr. 5W, 6W, 7W und 8W, wobei auf eine Überarbeitung der Abdeckung zur Demonstration der Instrumentierung verzichtet wurde, wie auf dem Bild 21 unter b) "Dehnmeßstreifen Detailaufnahme" zu erkennen ist. Diese Modellplatte hat einen Einsatz im strömenden Wasser von ca. 146 Stunden hinter sich.

Das Bild 22 vermittelt diesen Eindruck für die CERCA-Modellplatte mit dem DMS Nr. 3W des Typs BAE-13-125 TD-120 der Firma Bean Detroit mit der Abdeckung GA 60 der Firma Vishay-Micromesure und dem Dehnmeßstreifen Nr. 2W desselben Typs mit der Abdeckung M 600 durch dieselbe Firma. Diese Modellplatte hat einen Einsatz im strömenden Wasser von ca. 160 Stunden hinter sich.

Das Bild 21 zeigt eine Hottinger Modellplatte mit den Dehnmeßstreifen Nr. 13W, 14W, 15W und 16W des Typs Hottinger 1,5-120 LB 13 mit der Abdeckung Barrier C, die nach 2 Stunden Einsatz im strömenden Wasser isolationstechnisch und mechanisch ausgefallen ist.

Die Erprobung der Meßwertaufnahme zeigt der Geräteaufbau auf Bild 24. Die Dehnmeßstreifen wurden über ein Halbbrückenerweiterungsglied an die Meßverstärker des Typs KWS II/5 der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH Darmstadt angeschlossen. Die Druckaufnehmer wurden über eine kapazitive Abgleichereinheit ebenfalls an die Meßverstärker des Typs KWS II/5 angeschlossen. Die RMS-Werte der Ausgangsspannungen wurden mit dem RMS-Voltmeter des Typs 3400 A der Firma Hewlett Packard gemessen. Um den Zeitverlauf der Dehnungen im Vergleich zu den Druckpulsationen optisch festzuhalten, wurde der 2-Strahl Oszillograph vom Typ H2V 18 System Tönnies der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, mit einer Sofortkamera des Typs Steinheil Oszillographen-Kamera OSCILLOPHOT M1 bestückt. Alle Ausgangssignale wurden dazu noch auf ein Magnetband zur Weiterverarbeitung aufgezeichnet.

Hierzu wurde das Magnetbandgerät des Typs FR 1300 der Firma Ampex mit FM-Aufzeichnung benutzt. Die Weiterverarbeitung der registrierten Meßsignale in Spektraldichtefunktionen etc. erfolgt nach einem im IRE erprobten Verfahren in den Schritten der Digitalisierung der Meßdaten, der Zwischenspeicherung auf ein digitales Magnetband und der endgültigen Verarbeitung über diverse Rechenprogramme auf der Rechenanlage IBM 360/65-85, [2, 9].

Die typischen Resultate aus diesen Untersuchungen sind in den Bildern 25 und 26 graphisch dargestellt.

Die Diagramme der normierten Mittelwerte der Druckpulsationen in der Wasserströmung $\sqrt{p^{-2}/q}$ in der Abhängigkeit von der mittleren Reynolds-Zahl Re (Bild 25a und 25b) zeigen die gleiche Tendenz wie entsprechende Diagramme bei Stabbündeluntersuchungen [2].

Bei dem Diagramm der relativen Dehnungen $\sqrt{\epsilon^{-2}/q}$ (Bild 25c) ist ein Anstieg der normierten Werte bei hohen Reynolds-Zahlen festzustellen, was auf eine leichte Rückkoppelung zwischen den hydrodynamischen Kräften des strömenden Wassers und den Plattenschwingungen zurückzuführen ist.

Diese Tendenz wird auch auf den Diagrammen im Bild 26a (Spektraldichtefunktionen der Druckpulsationen $S_p(\nu)$ bezogen auf die Frequenz ν), im Bild 26b (Spektraldichtefunktionen oder relativen Dehnungen $S_\epsilon(\nu)$ bezogen auf die Frequenz ν), im Bild 26c (Realteil der Kreuzspektraldichtefunktionen $S_{cp}(\nu)$ bezogen auf die Frequenz ν) und im Bild 26d (Imaginärteil der Kreuzspektraldichtefunktionen $S_{cp}(\nu)$ bezogen auf die Frequenz ν) ersichtlich.

Als Resultat der in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen ergab sich, daß die vorgeschlagenen Methoden der Instrumentierung, der Messung und der Meßdatenverarbeitung für die Schwingungsuntersuchungen an den HFR-Brennelementplatten bei den, dem Reaktorbetrieb nahen Betriebsparametern, geeignet sind.

5.0 Schlußbemerkung

Ein Versuchsstand für experimentelle Untersuchungen der Resonanzkurven und der Eigenschwingungsformen einer Brennelementplatte des Hochflußreaktors Grenoble wurde konzipiert, gebaut und in Betrieb genommen. Auf diesem Versuchsstand wurden die 6 ersten Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenschwingungsformen der Brennelementplatte bestimmt. Für jede Schwingungsform wurden 1 bis 3 Referenz-DMS-Positionen ausgewählt und die Relationen zwischen der Referenzdehnung und der Auslenkung der im entsprechenden Eigenschwingungszustand schwingenden Platte wurde für jede DMS-Position experimentell bestimmt. Ferner wurden einige technologische Verfahren zur Präparation der DMS-Meßstellen für die Messungen bei extrem hohen Wassergeschwindigkeiten praktisch erprobt und das gesamte Meß- und Datenverarbeitungsverfahren wurde am Fall der Schwingungsuntersuchung einer in der Wasserströmung schwingenden Modellplatte mit positiven Resultaten überprüft.

Aufgrund der Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenschwingungsformen wurde festgestellt, daß die in der Kühlmittelströmung zu erwartenden turbulenten Druckpulsationen nicht in der Lage sind eine energetisch starke Schwingung der Brennelementplatten hervorzurufen. Dagegen haben die Schwingungsuntersuchungen an den Modellplatten in strömendem Wasser ergeben, daß die Entstehung einer positiven Rückkopplung zwischen der Bewegung der schwingenden Platte und dem Druck- und Geschwindigkeitsfeld im strömenden Kühlmittel nicht ausgeschlossen ist. Eine endgültige Information über den von den Kühlmittelkräften hervorgerufenen Schwingungszustand der Brennelementplatten kann allerdings nur aufgrund der Messungen an einem Plattenpaket gewonnen werden, wie sie in der Spezifikation der Aufgabe auch vorgesehen ist.

Literatur

- [1] P. Ihle:
Hydrodynamische und mechanische Untersuchungen am Brennelement des HFR Grenoble.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1969,
unveröffentlicht
- [2] J. Kadlec, K.D. Appelt:
Methode für die experimentelle Untersuchung des durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der Brennstäbe.
KFK-Bericht 1082, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
November 1969
- [3] J.S. Bendat:
Principles and Applications of Random Noise Theory.
John Wiley u. Sons, Inc., New York, 1958
- [4] J. Kadlec, V. Pfrommer:
Methode für die experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenzen der Normal- und der Dehnungsfunktionen sowie der Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe.
KFK-Bericht 731, EUR 3718d, Kernforschungszentrum Karlsruhe, März 1968.
- [5] W. Krüger, R. Schwemmler:
Untersuchung der Eigenfrequenzen, der Normal- und Dehnungsfunktionen und der Dämpfung der instrumentierten Modellbrennstäbe des Na 1/2-Modellsbassemblys.
KFK-Bericht 1337, EUR 4572d, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Dezember 1970
- [6] C. Zeissig:
Ein einfacher Fall der transversalen Schwingung einer rechteckigen elastischen Platte.
Annalen der Physik und Chemie, 64, 360-397, 1898

- [7] K.D. Appelt, J. Kadlec:
Untersuchung der Eigenfrequenzen, der Normal- und der
Dehnungsfunktionen, sowie der Dämpfung des quer-
schwingenden Brennstabes der Na 1-Studie.
KFK-Bericht 923, EUR 3977d, Kernforschungszentrum
Karlsruhe, Januar 1969
- [8] J. Kadlec, V. Pfrommer:
Abschätzung der optimalen Anzahl der Gitterabstands-
halter für das Na 2-Subassembly.
Externer Bericht 8/67-2, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Institut für Reaktorentwicklung, Februar 1967
- [9] P. Tack:
Program to Compute Correlation Coefficients, Spectral
Density Functions and Cross Spectral Density Functions.
KFK-Bericht 1237, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Juli 1970
- [10] K.D. Appelt, J. Kadlec, W. Krüger, E. Ohlmer, R. Schwemmler:
Experimental Investigation of Loop Caused Influences on
Parallel Flow-Induced Vibration of Fuel Pins.
KFK-Bericht 1385, EUR 4574e, Kernforschungszentrum
Karlsruhe, März 1971

Magnet- Nr.	Windungszahl bei Magnetanordnung					
	A	B	C	D	E	F
1	175	- 175	175	175	- 182	175
2	182	- 215	182	180	- 186	182
3	186	- 235	186	182	- 250	186
4	195	- 283	190	186	- 195	195
5	206	- 206	195	190	175	206
6	215	- 195	206	195	206	283
7	235	- 190	215	206	215	206
8	283	160	220	215	283	215
9	250	186	235	235	195	220
10	220	195	283	283	160	235
11	206	206	250	250	- 206	250
12	195	220	206	220	- 220	195
13	190	250	195	206	- 235	190
14	180	182	180	195	- 190	180
15	160	180	160	160	- 180	160

Tabelle 1: Windungszahlen der Elektromagnete
bei verschiedenen Magnetanordnungen

DMS Nr.	zugehörige Frequenz [Hz]	Koordinaten	
		x [mm]	y [mm]
1	302	495	- 10
2	302	255	- 10
3	377	180	+ 15
4	377	180	- 10
5	530	285	+ 15
6	530	435	+ 20
7	530	460	+ 15
8	603	335	+ 10
9	689	185	+ 15
10	689	855	+ 10
11	760	135	+ 15
12	760	420	+ 15
13	760	765	- 10

Tabelle 2: DMS-Instrumentierung der Brennelementplatte
nach zugehöriger Eigenfrequenz

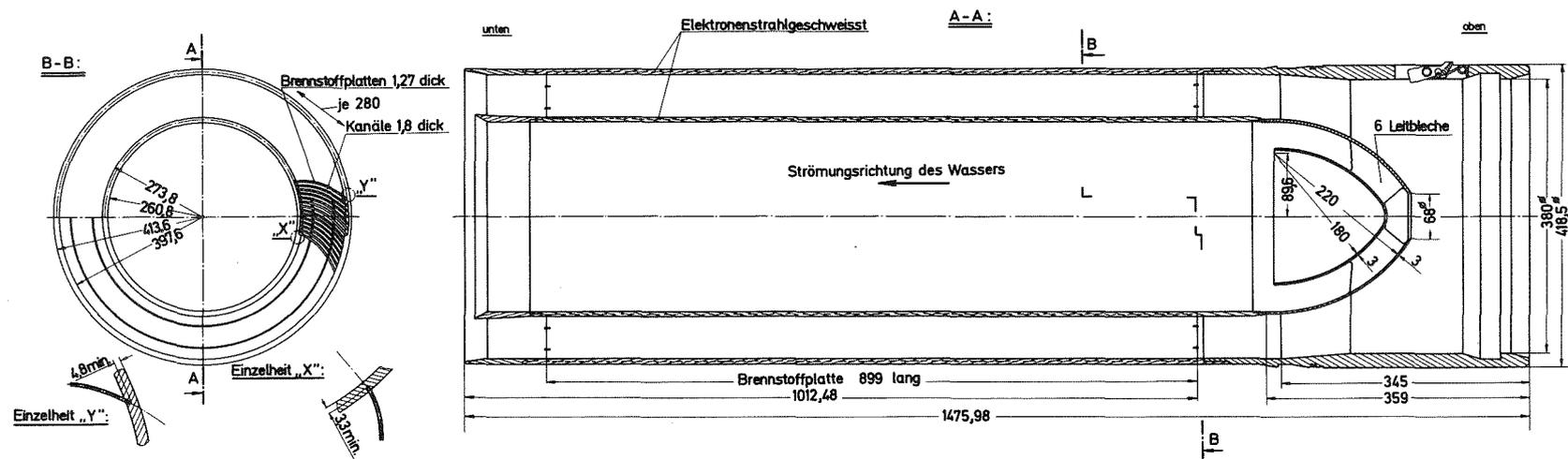


Bild 1: HFR-Brennelement

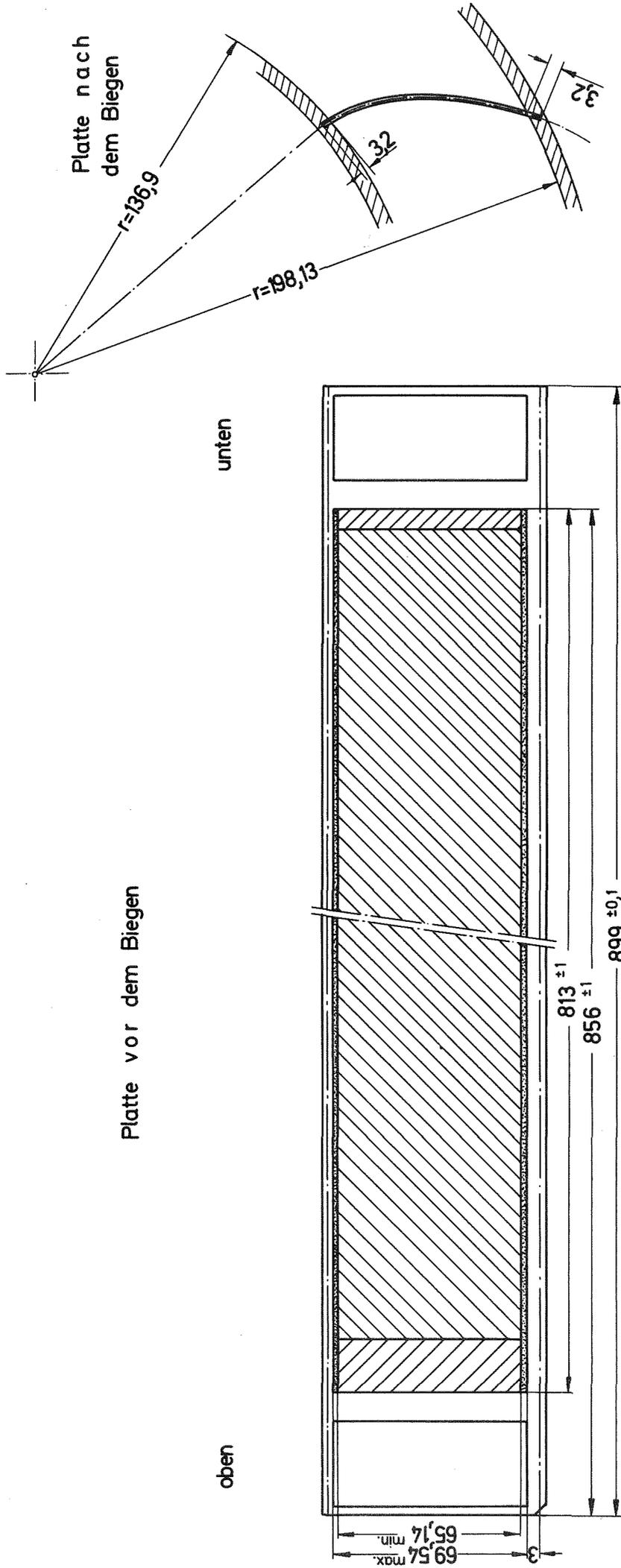


Bild 2: HFR-Brennelementplatte

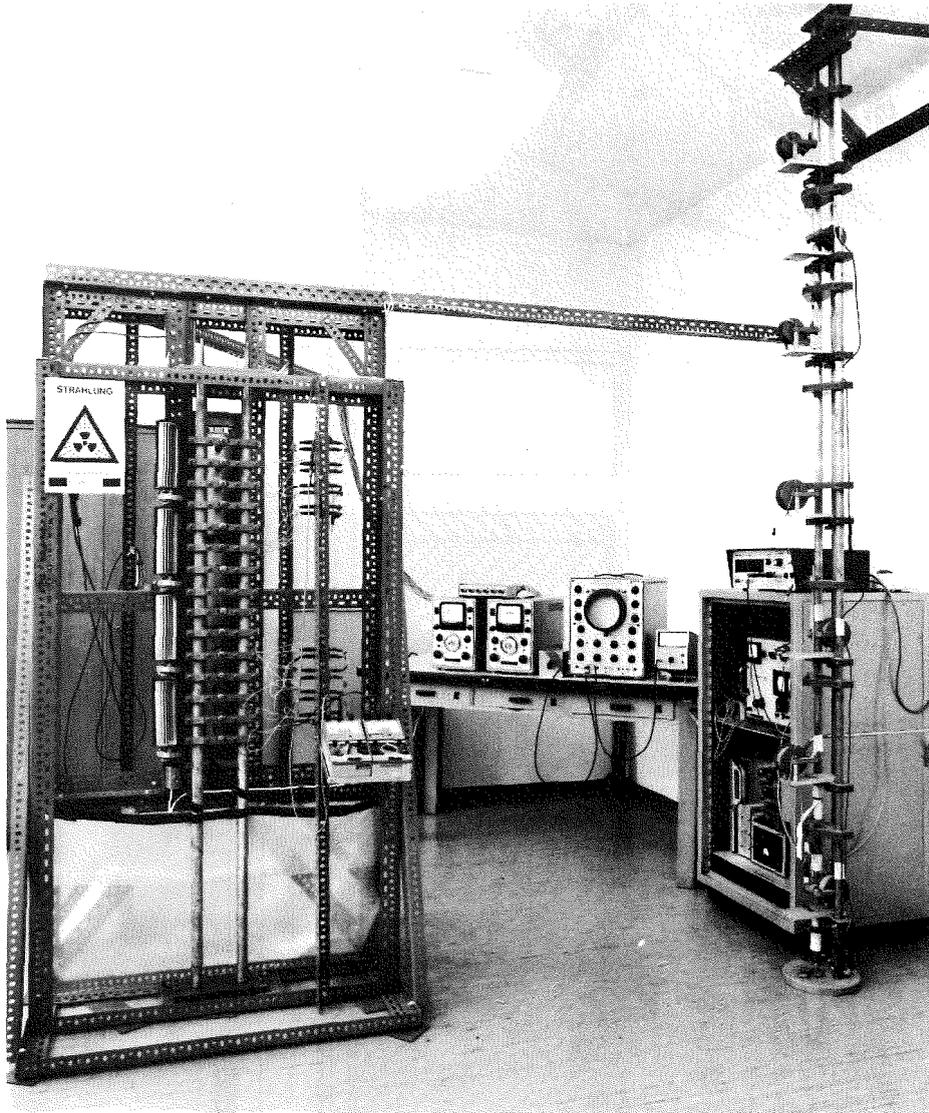


Bild 3: Versuchsstand für die experimentelle Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenschwingungsformen der Drennelementplatte.

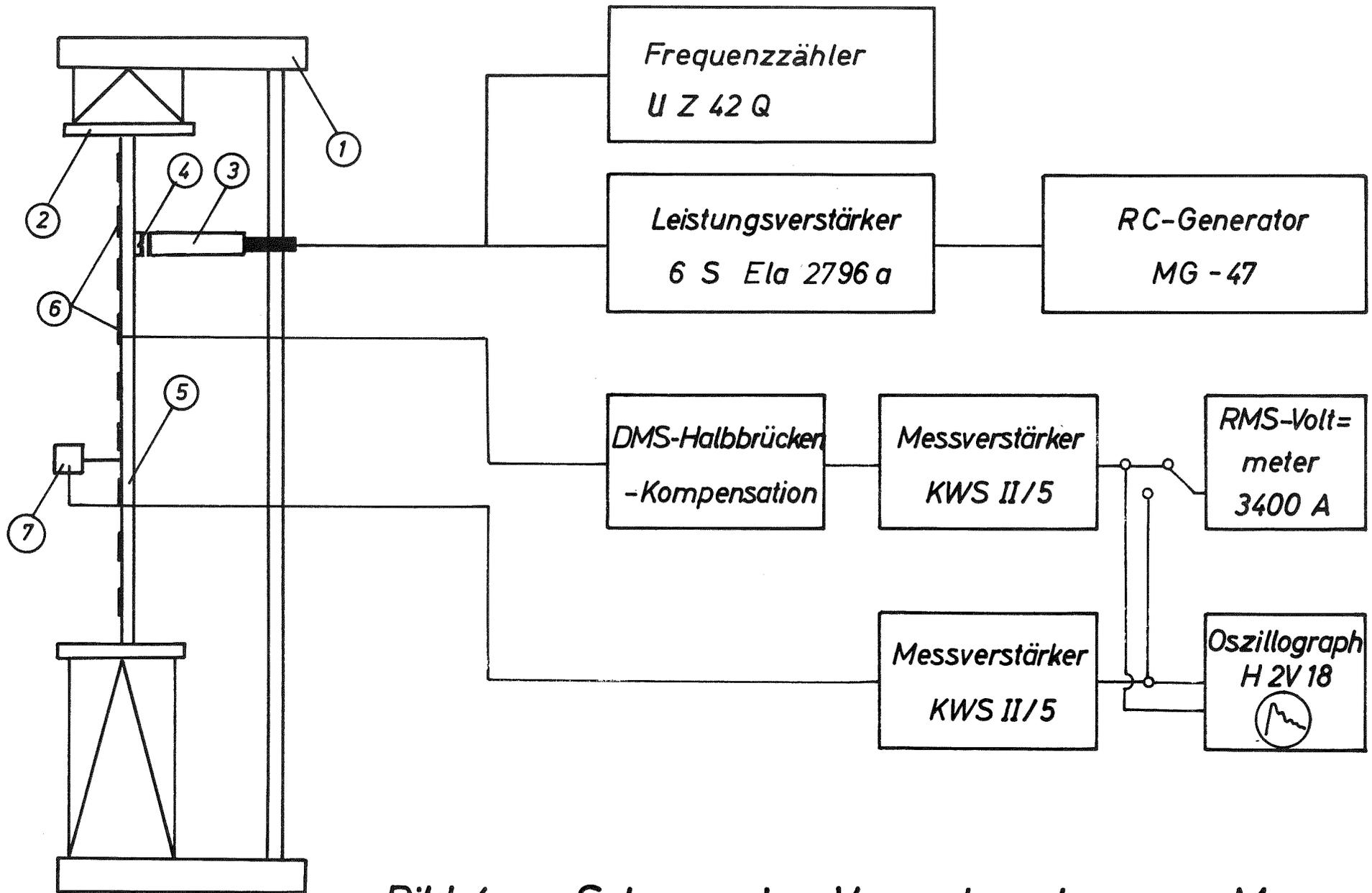


Bild 4 : Schema der Versuchsanlage zur Messung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungsformen

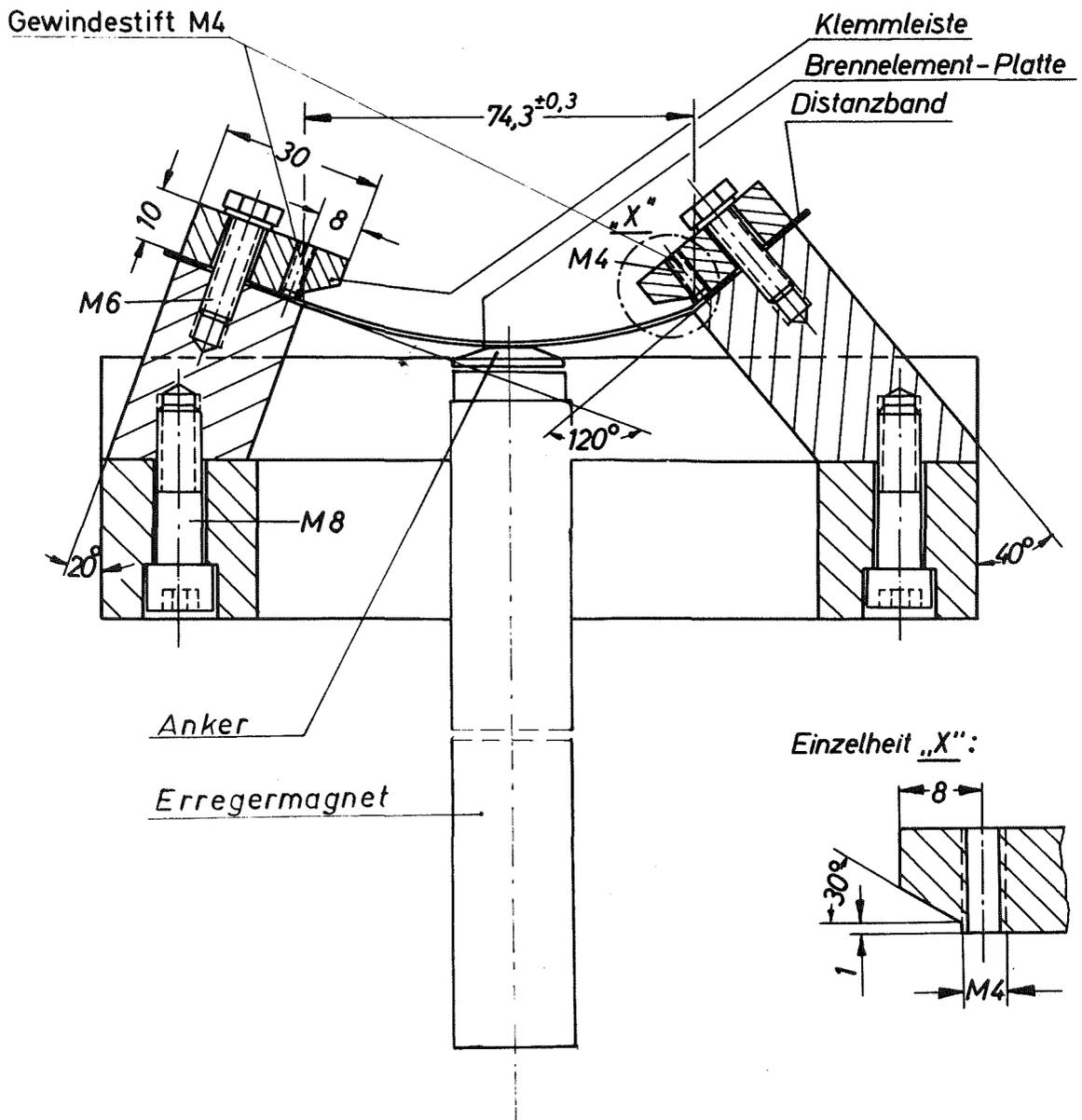


Bild 5: Schnitt durch Einspannvorrichtung

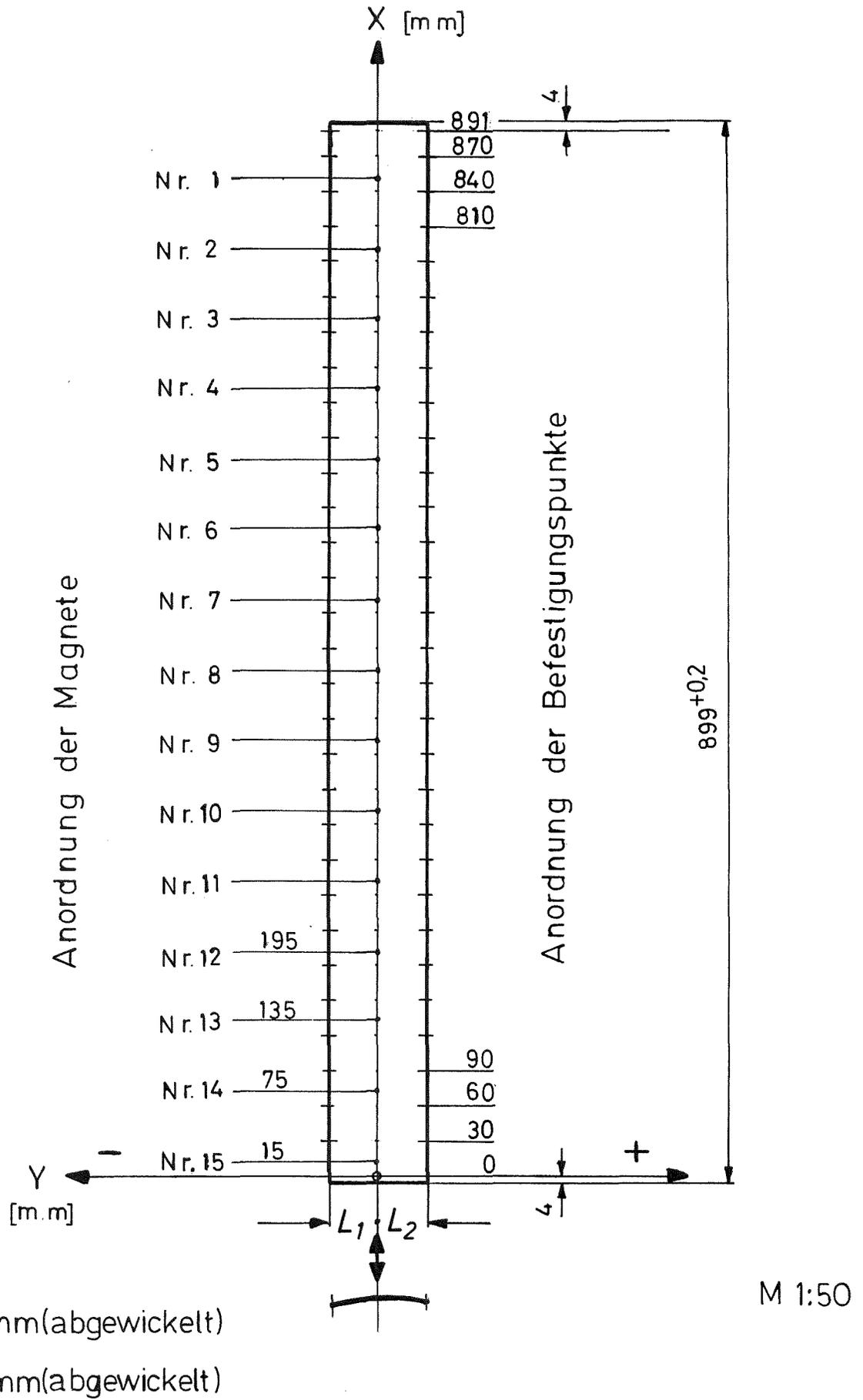


Bild 6 : Anordnung der Magnete und Befestigungspunkte im Koordinatensystem der Versuchsplatte

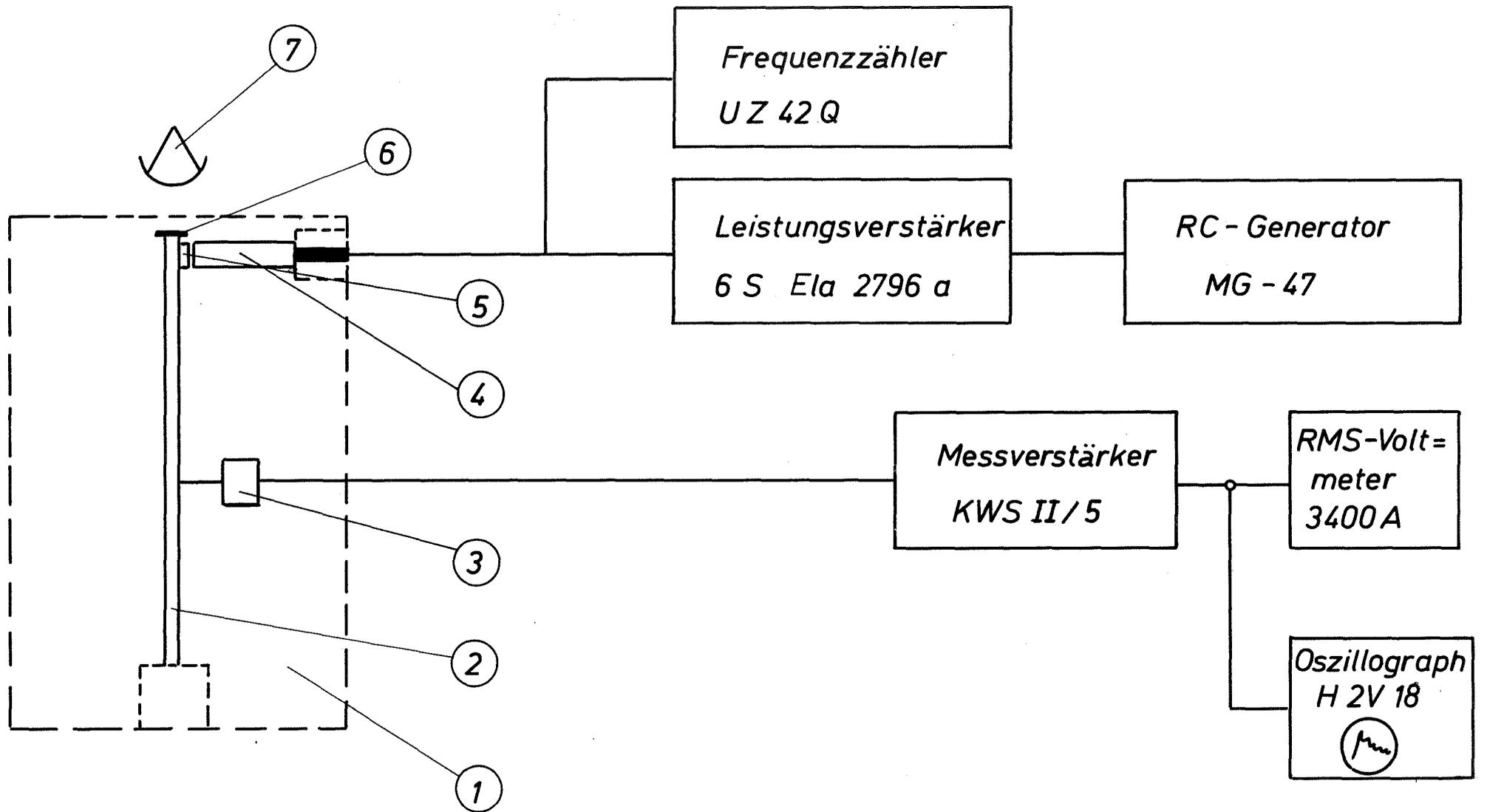


Bild 7 : Schema der Kalibriervorrichtung für Wegaufnehmer

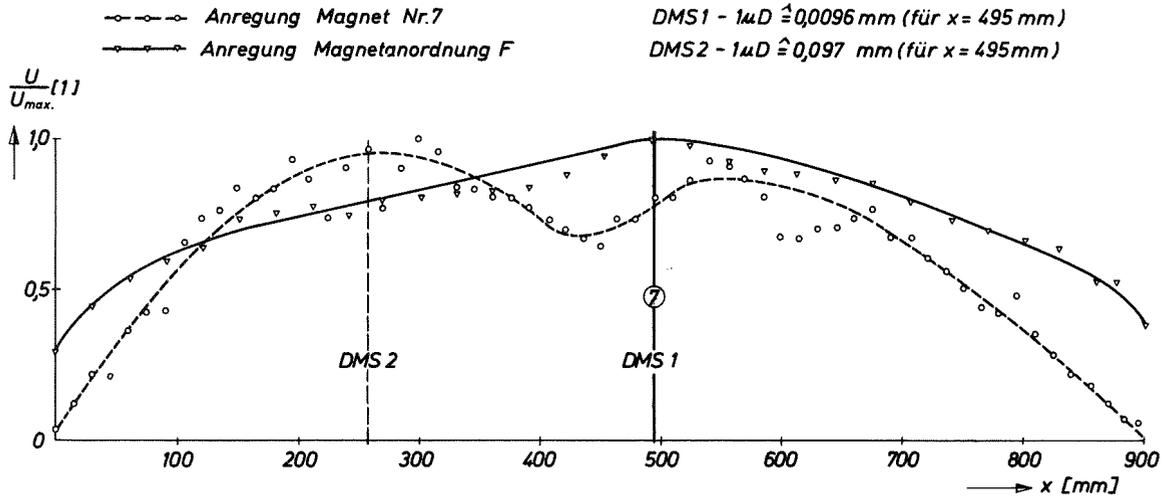


Bild 8a : Längsprofil der Schwingungsform
für $\nu=302,5\text{Hz}$, Position $y=-10\text{ mm}$

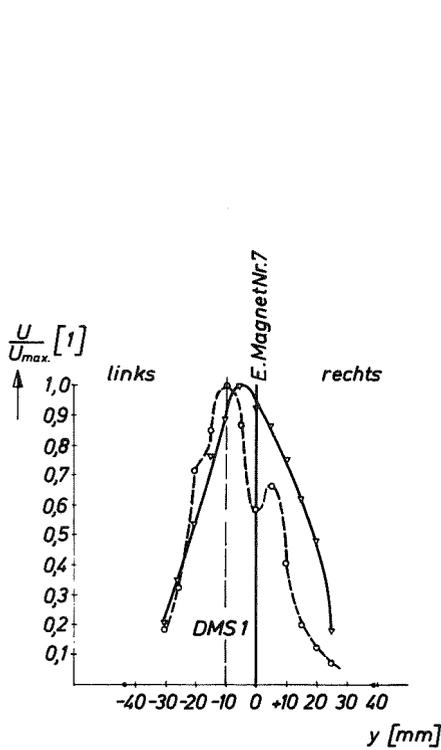


Bild 8b : Querprofil der Schwingungsform
für $\nu=302,5\text{ Hz}$ Position $x=495\text{ mm}$

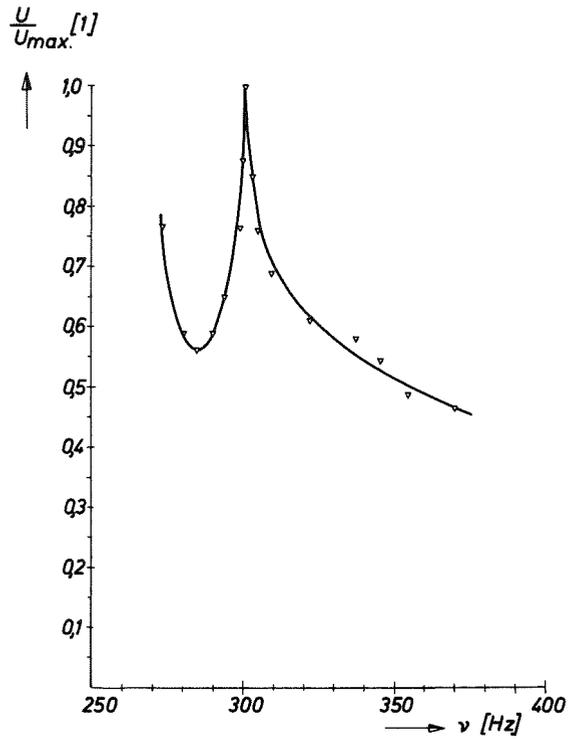


Bild 8c : Resonanzkurve, Aufnahme position
 $x=495\text{ mm}$
 $y=-10\text{ mm}$

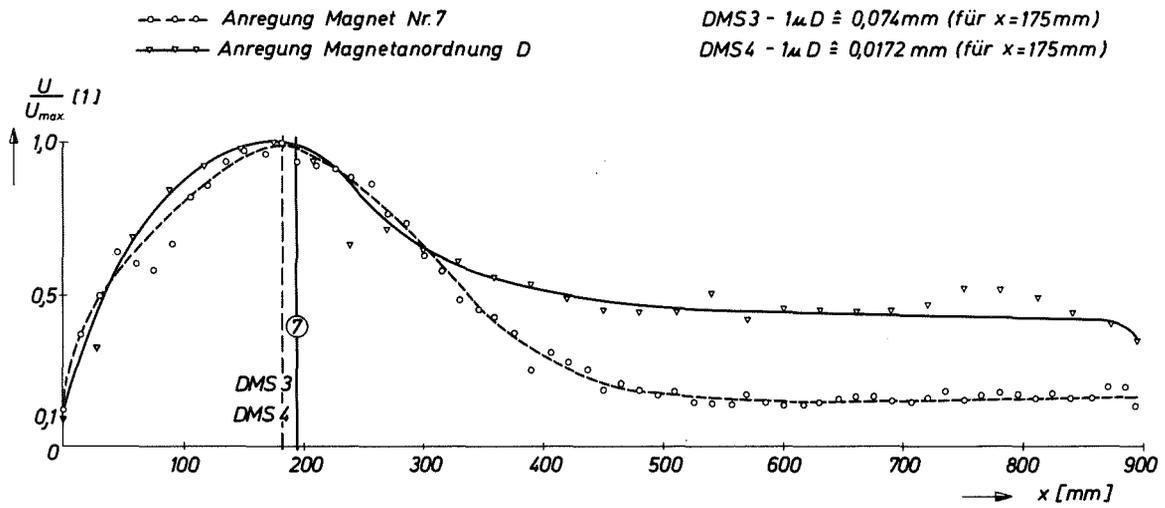


Bild 9a : Längsprofil der Schwingungsform für $\nu = 376,8 \text{ Hz}$, Position $y = 20 \text{ mm}$

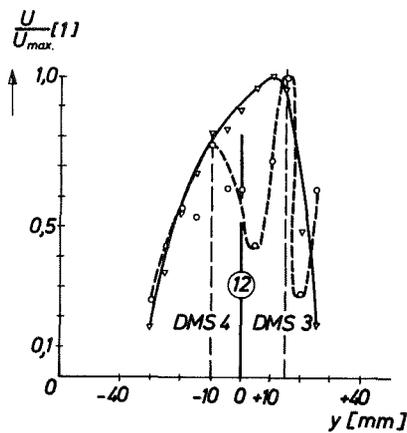


Bild 9b : Querprofil der Schwingungsform für $\nu = 376,8 \text{ Hz}$, Position $x = 185 \text{ mm}$

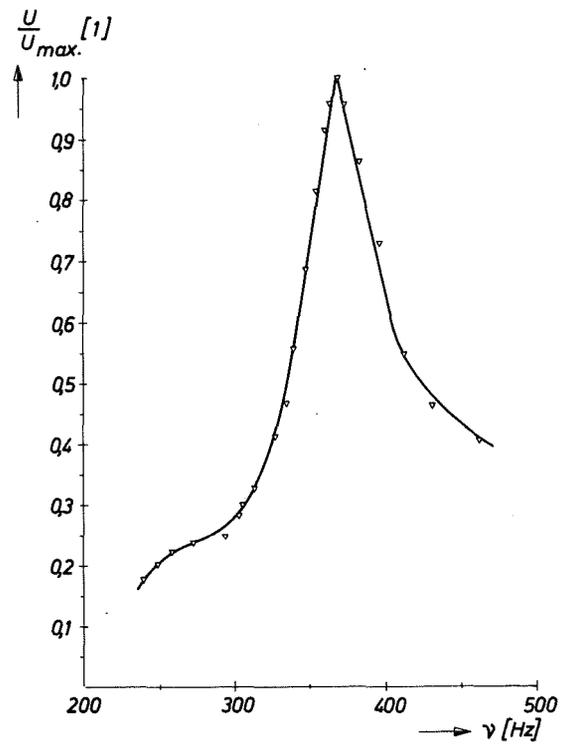


Bild 9c : Resonanzkurve, Aufnahme position $x = 175 \text{ mm}$; $y = +20 \text{ mm}$;

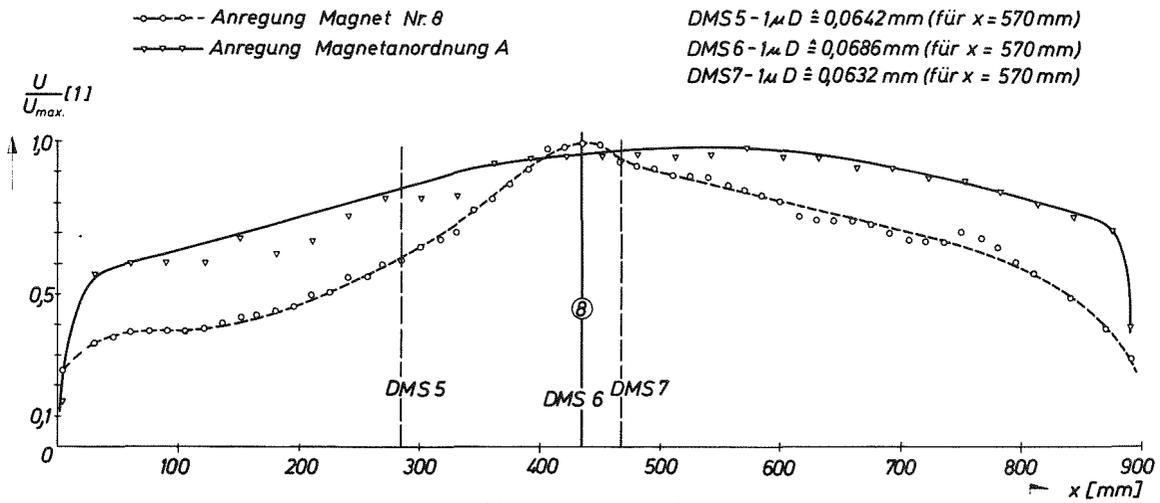


Bild 10a: Längsprofil der Schwingungsform für $\nu = 530,2 \text{ Hz}$; Position $y = 20 \text{ mm}$

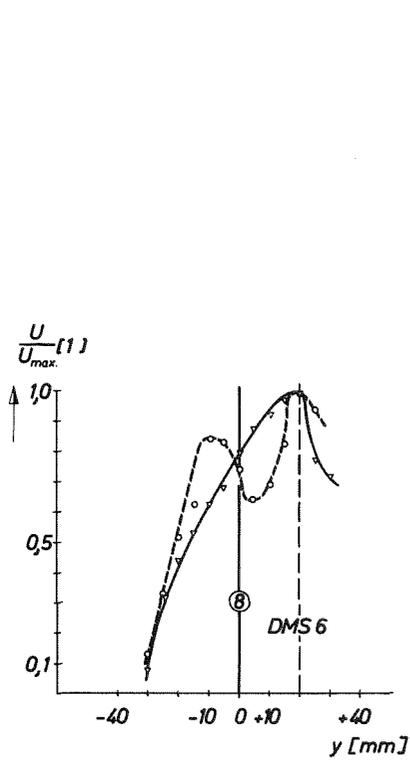


Bild 10b: Querprofil der Schwingungsform für $\nu = 530,2 \text{ Hz}$; Position $x = 435 \text{ mm}$

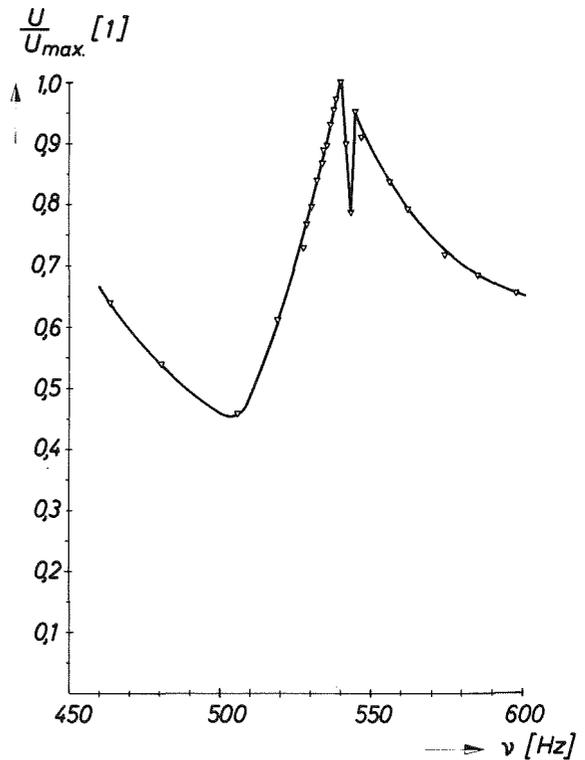


Bild 10c: Resonanzkurve; Aufnahme position $x = 570 \text{ mm}$, $y = 20 \text{ mm}$

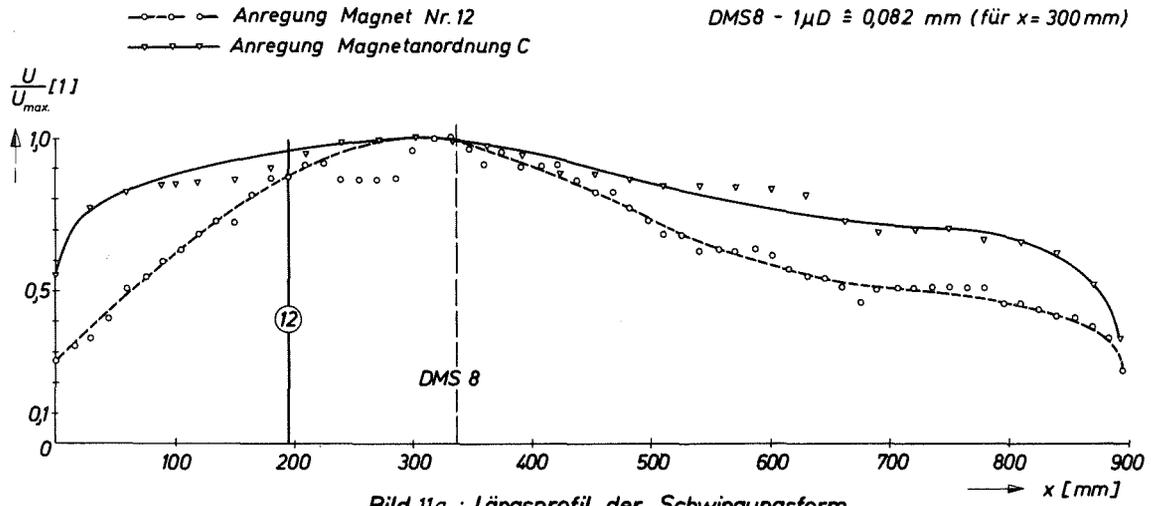


Bild 11a: Längsprofil der Schwingungsform
für $\nu = 603,0 \text{ Hz}$; Position $y = 10 \text{ mm}$

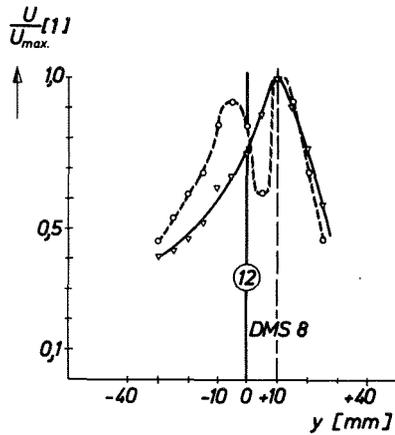


Bild 11b: Querprofil der Schwingungsform
für $\nu = 603,0 \text{ Hz}$; Position $x = 335 \text{ mm}$

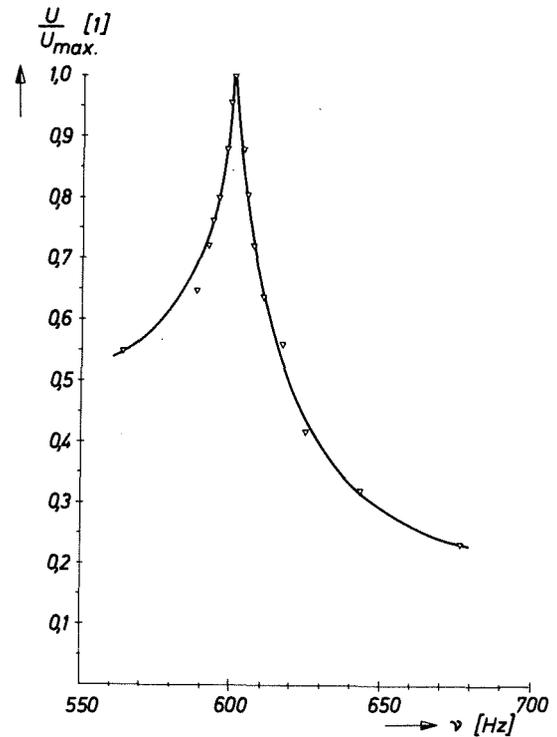


Bild 11c: Resonanzkurve ; Aufnehmer-
position
 $x = 335 \text{ mm}$;
 $y = +10 \text{ mm}$;

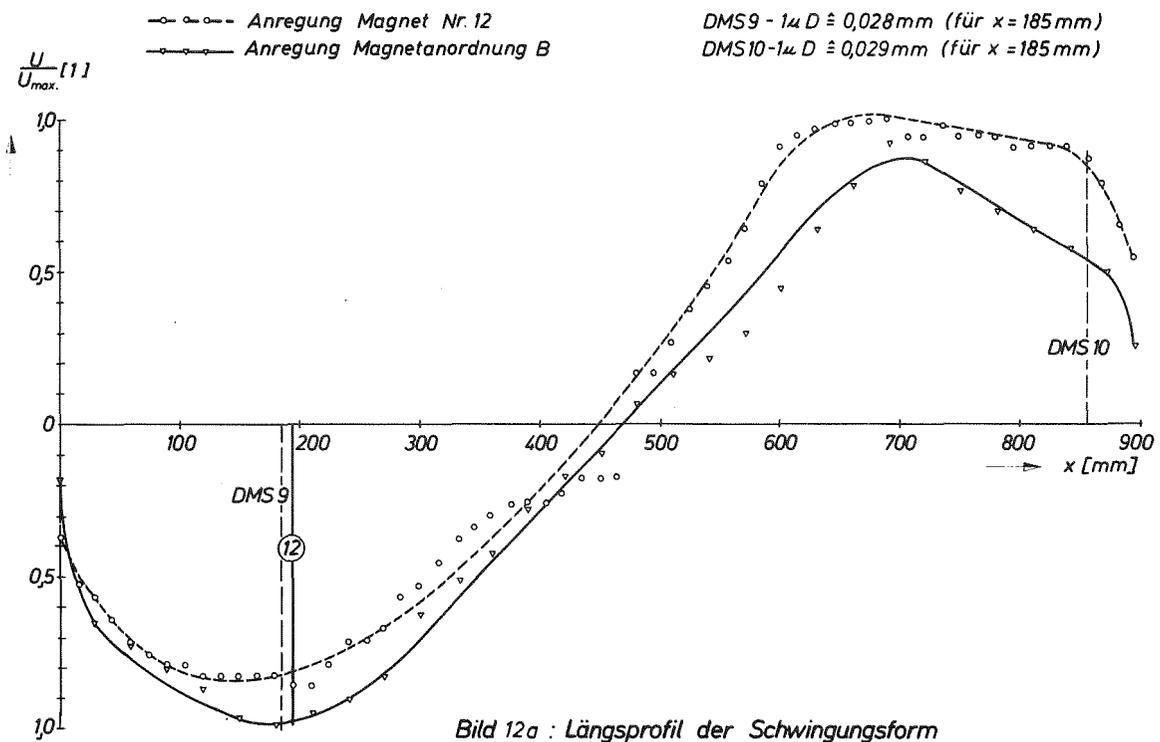


Bild 12a : Längsprofil der Schwingungsform für $\nu = 689,4 \text{ Hz}$, Position $y = 10 \text{ mm}$

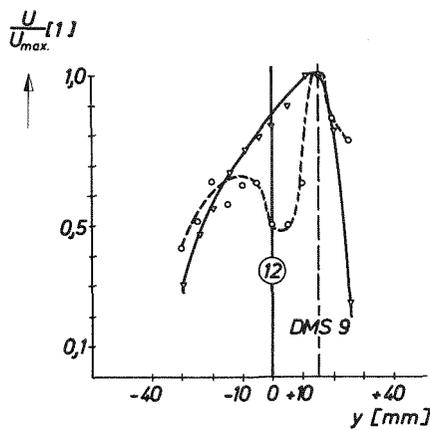


Bild 12b : Querprofil der Schwingungsform für $\nu = 689,4 \text{ Hz}$, Position $x = 185 \text{ mm}$

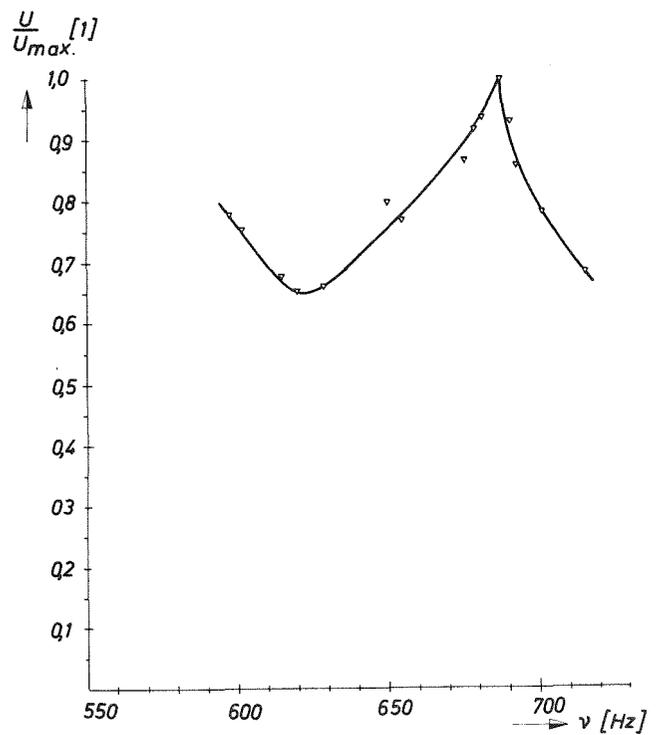


Bild 12c : Resonanzkurven, Aufnahmeerposition $x = 855 \text{ mm}$, $y = +10 \text{ mm}$

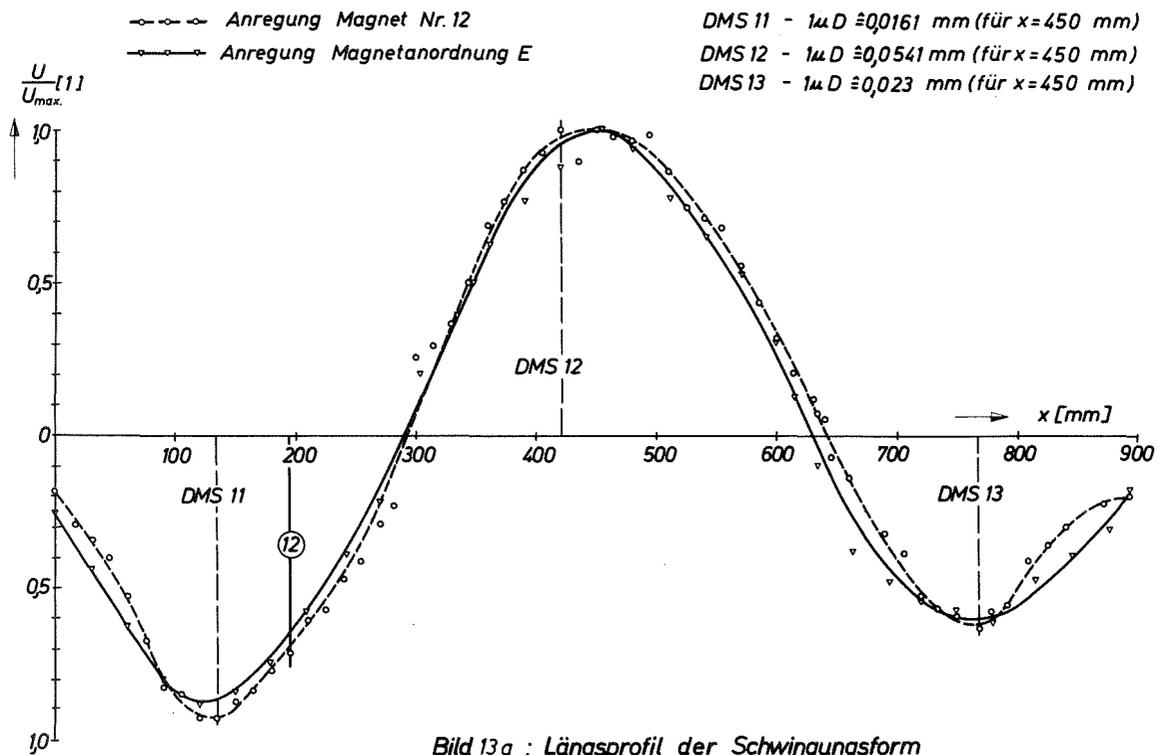


Bild 13a : Längsprofil der Schwingungsform für $\nu=760,4 \text{ Hz}$, Position $y=20\text{mm}$

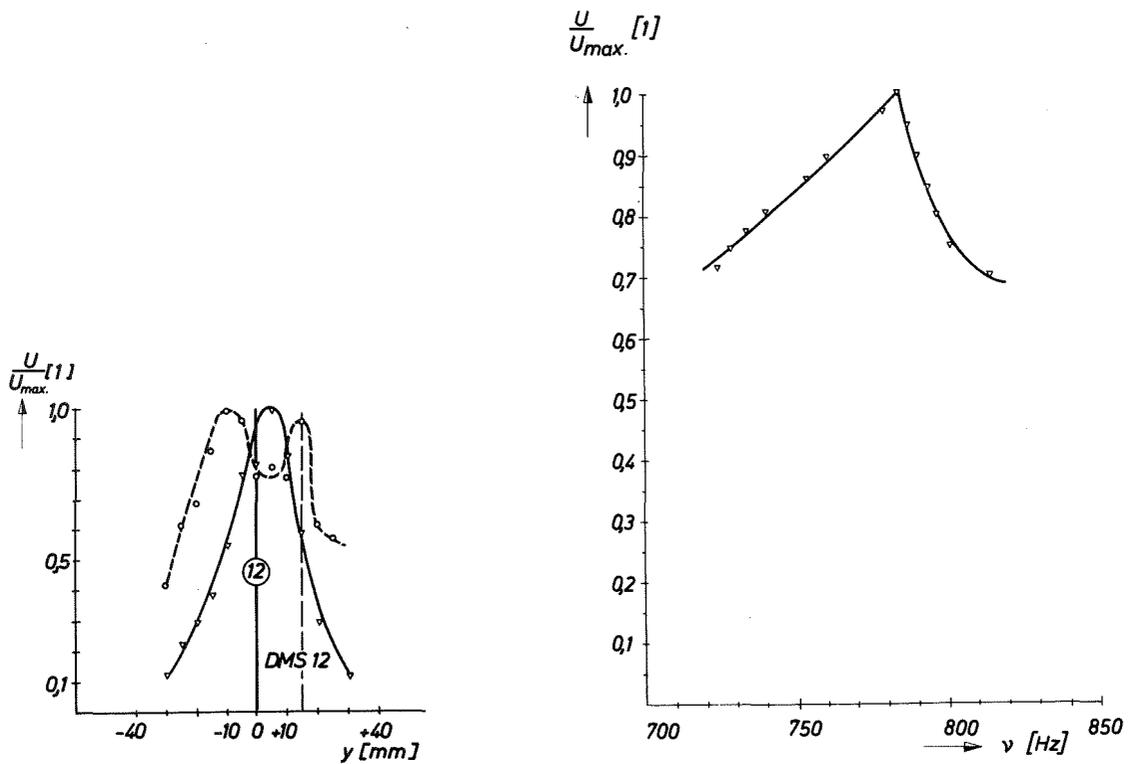


Bild 13b : Querprofil der Schwingungsform für $\nu=760,4 \text{ Hz}$, Position $x=420\text{mm}$

Bild 13c : Resonanzkurve, Aufnahmeposition $x = 135 \text{ mm}$
 $y = 15 \text{ mm}$

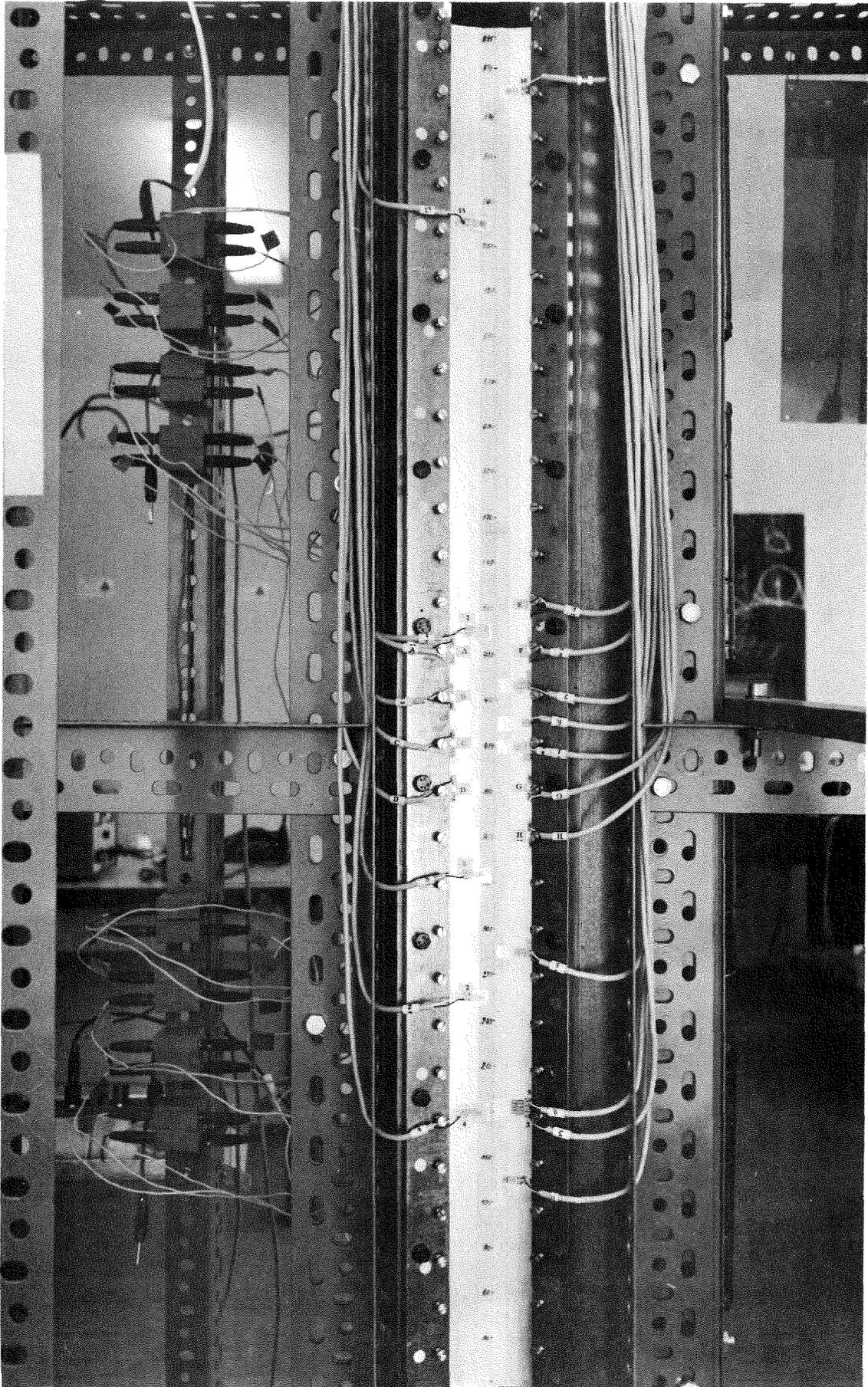


Bild 14: Detailaufnahme der Schwingungsvorrichtung mit der Versuchsplatte

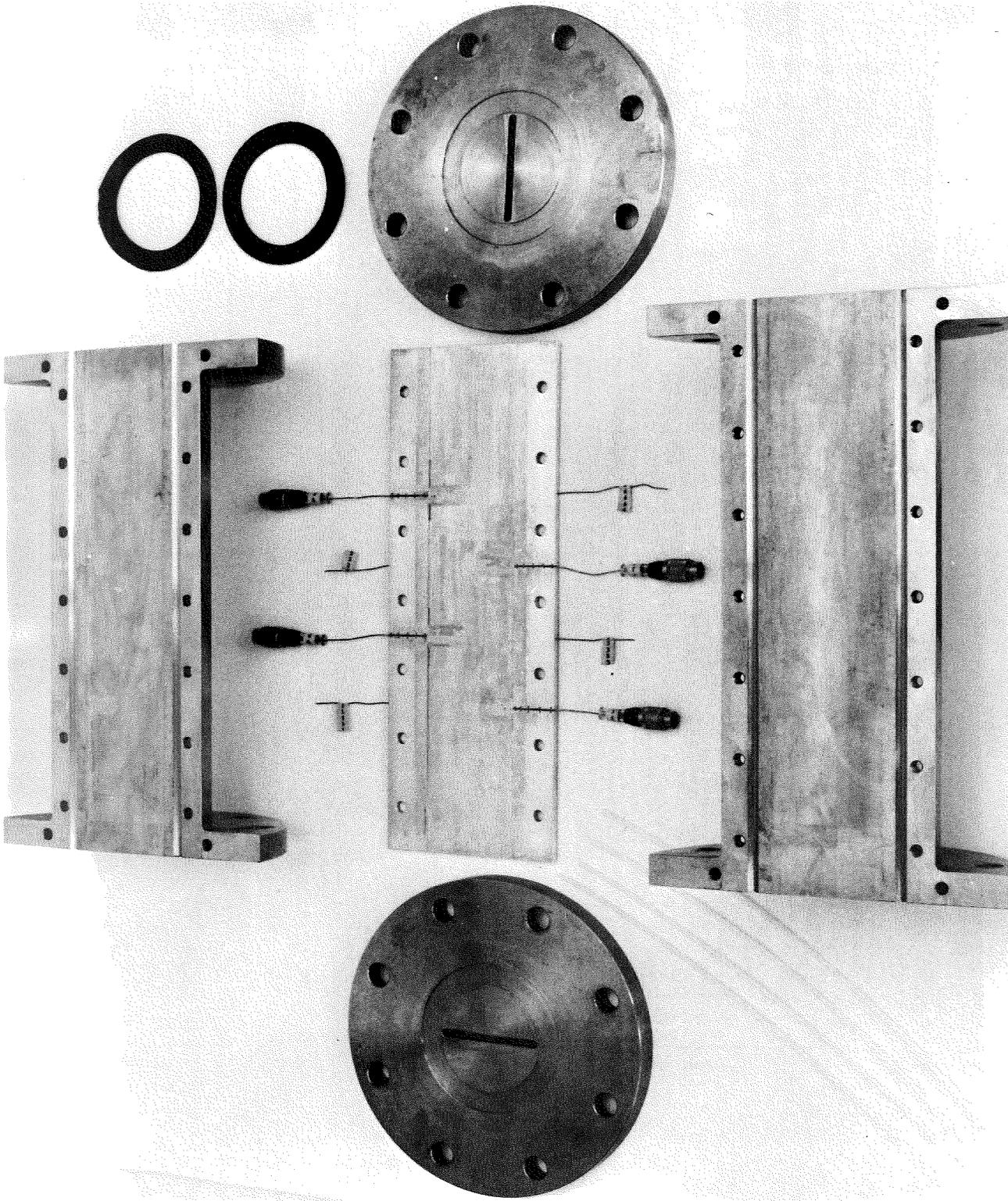


Bild 15: Stromungskanal mit Modellplatte

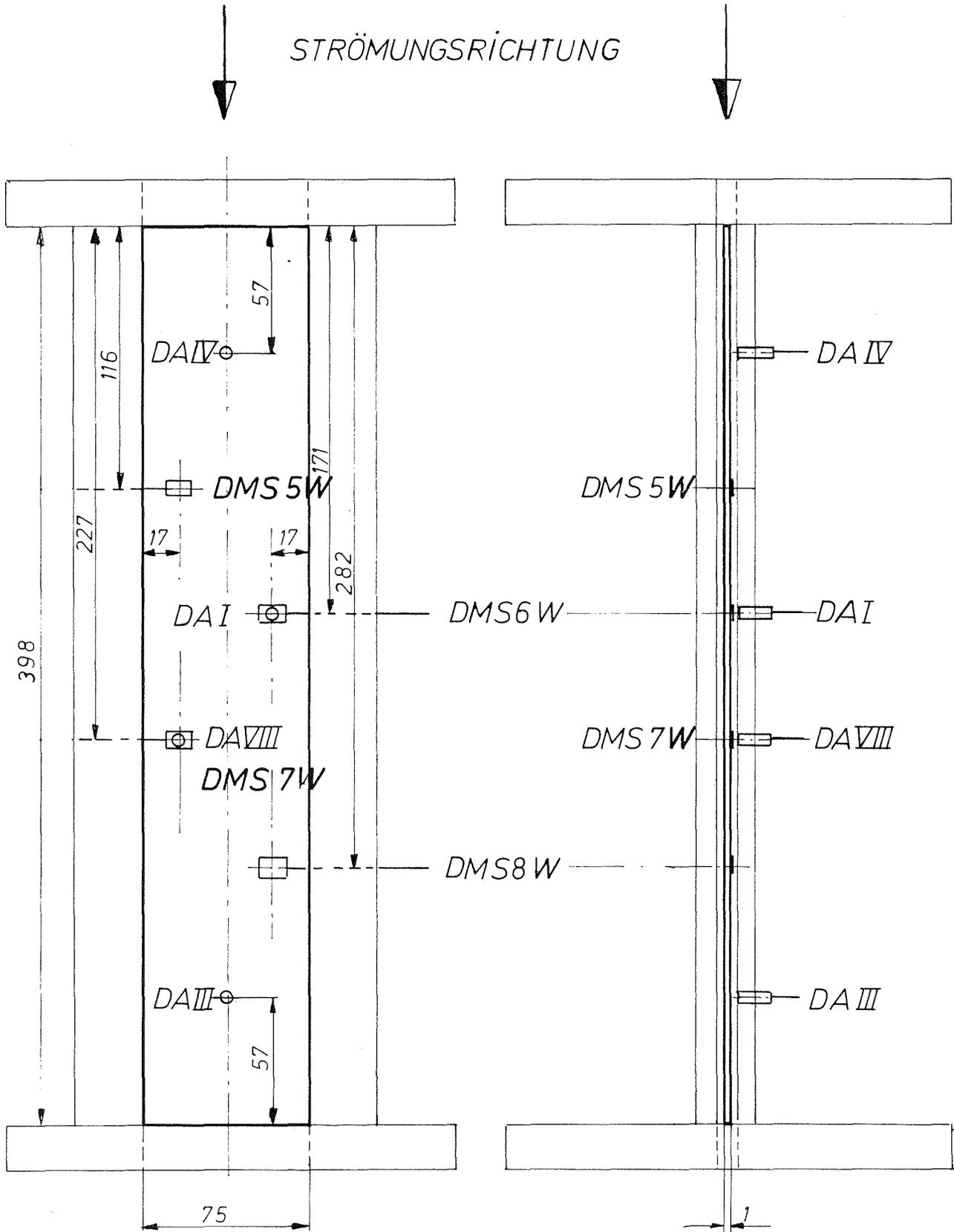


Bild 16 : Schema der Instrumentierung für die Vorversuche an der Modellplatte im strömenden Wasser

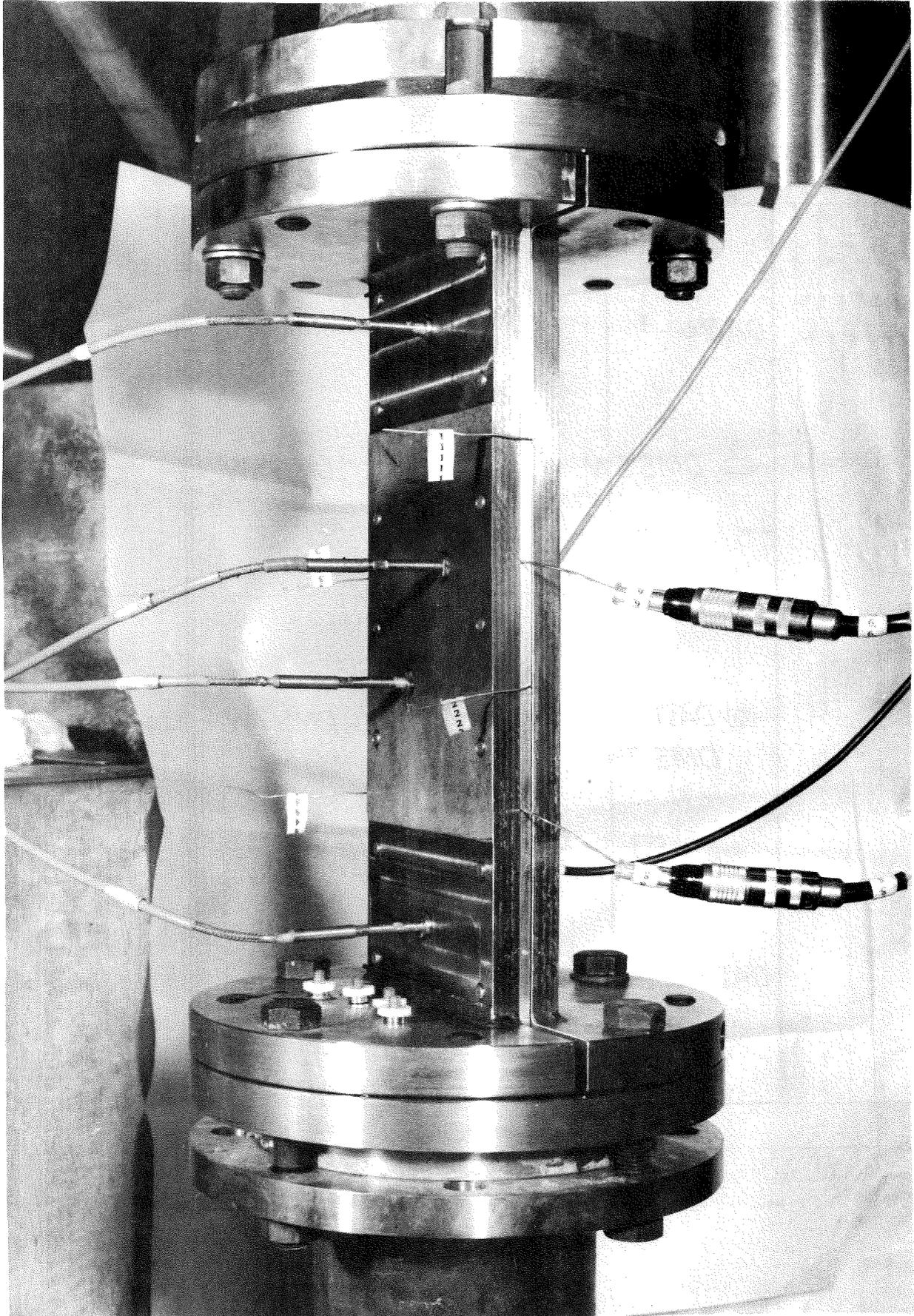


Bild 17: Teststrecke für die Vorversuche im strömenden Wasser

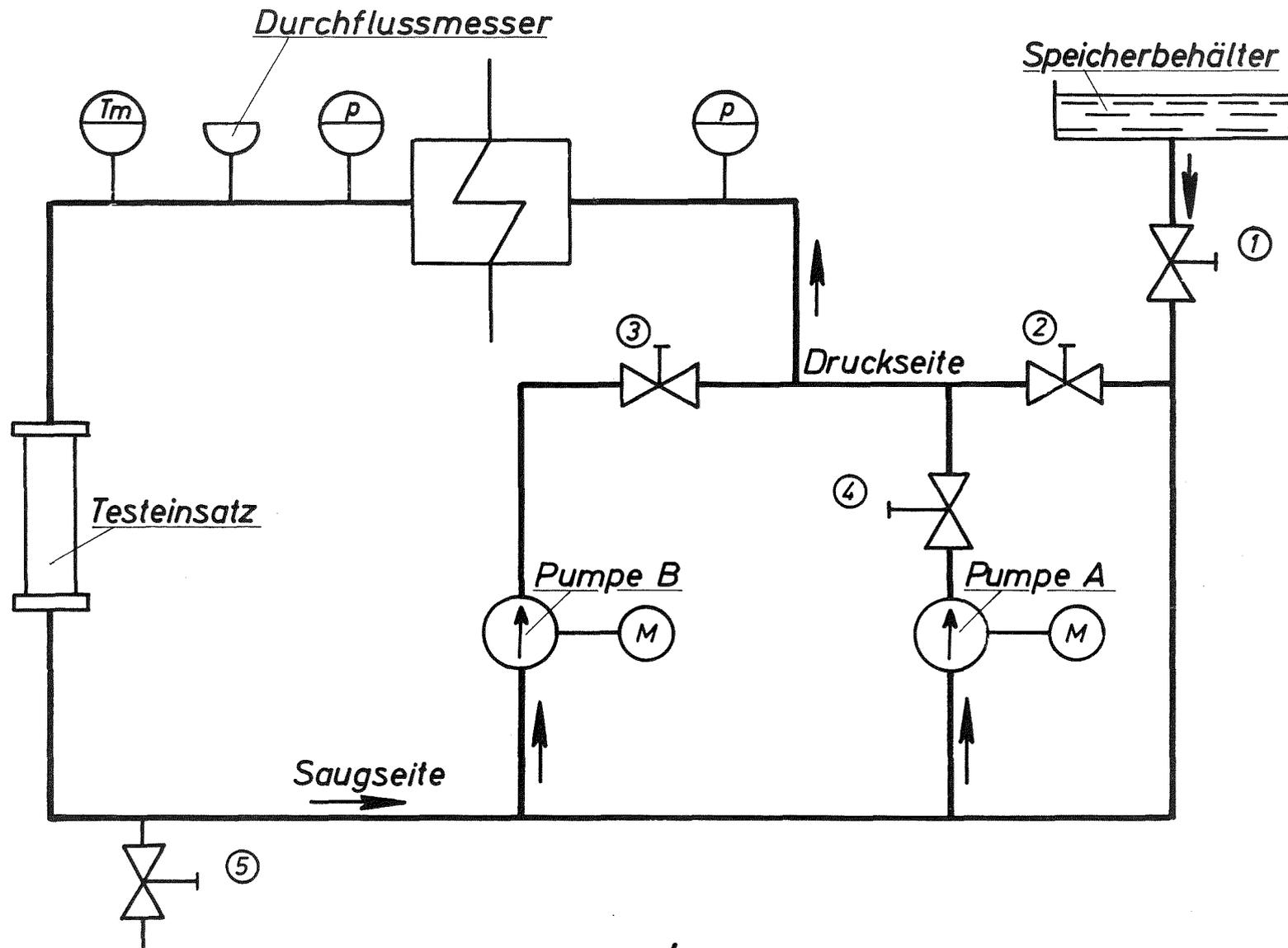


Bild 18 : Schema des IRB/I - Wasserkreislaufes

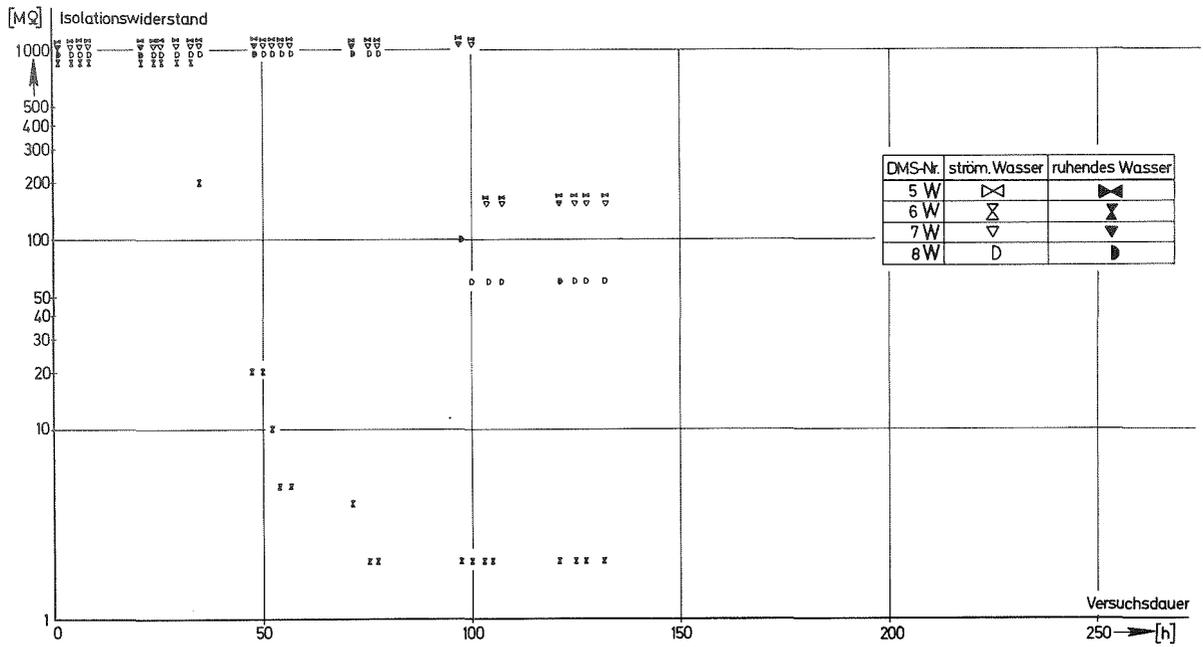


Bild 19 : Zeitliche Änderung des Isolationswiderstandes der DMS im strömenden Wasser (IRE - Modellplatte)

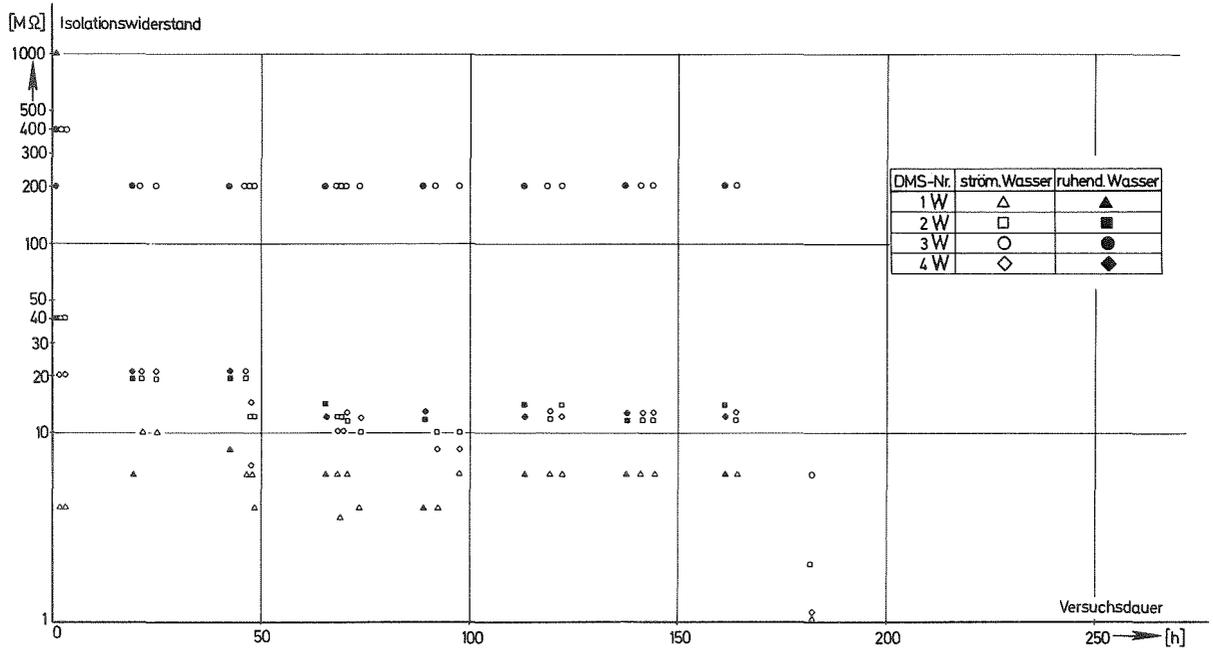
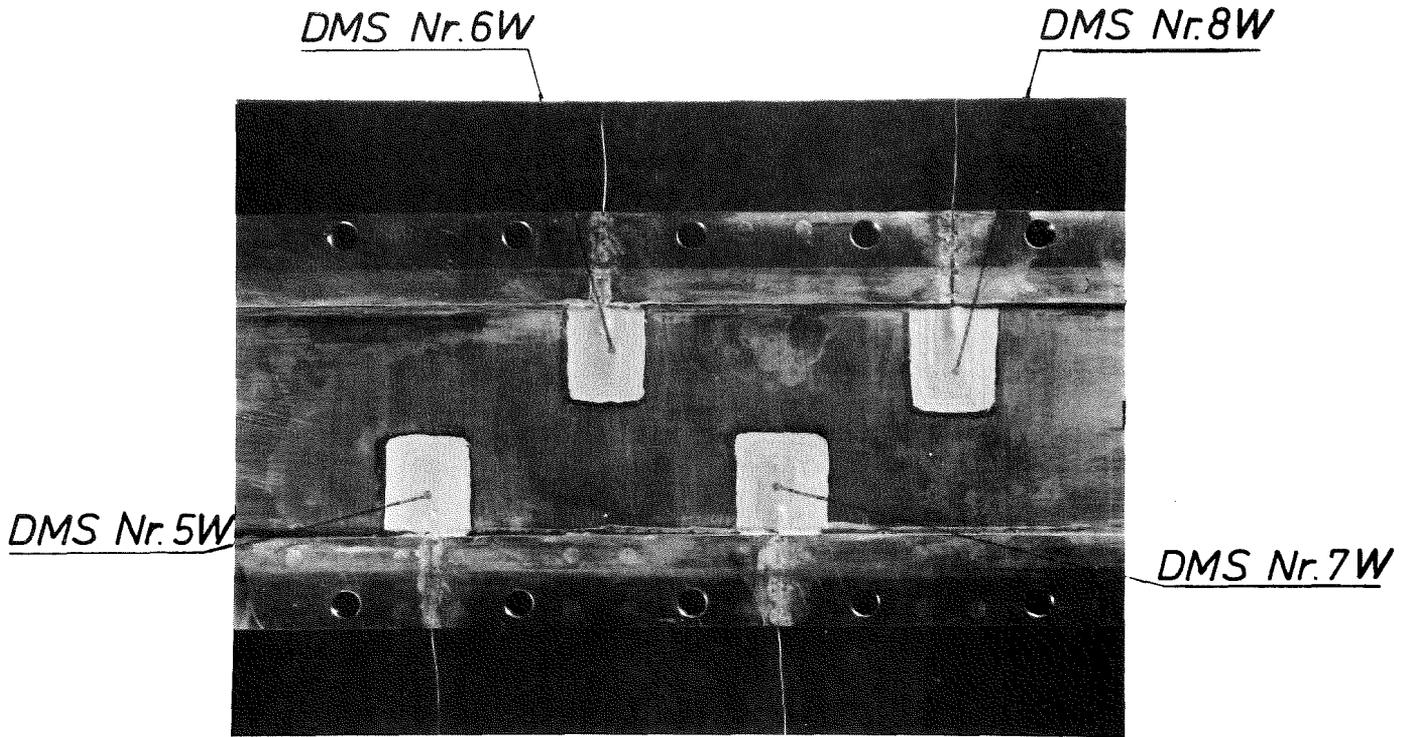
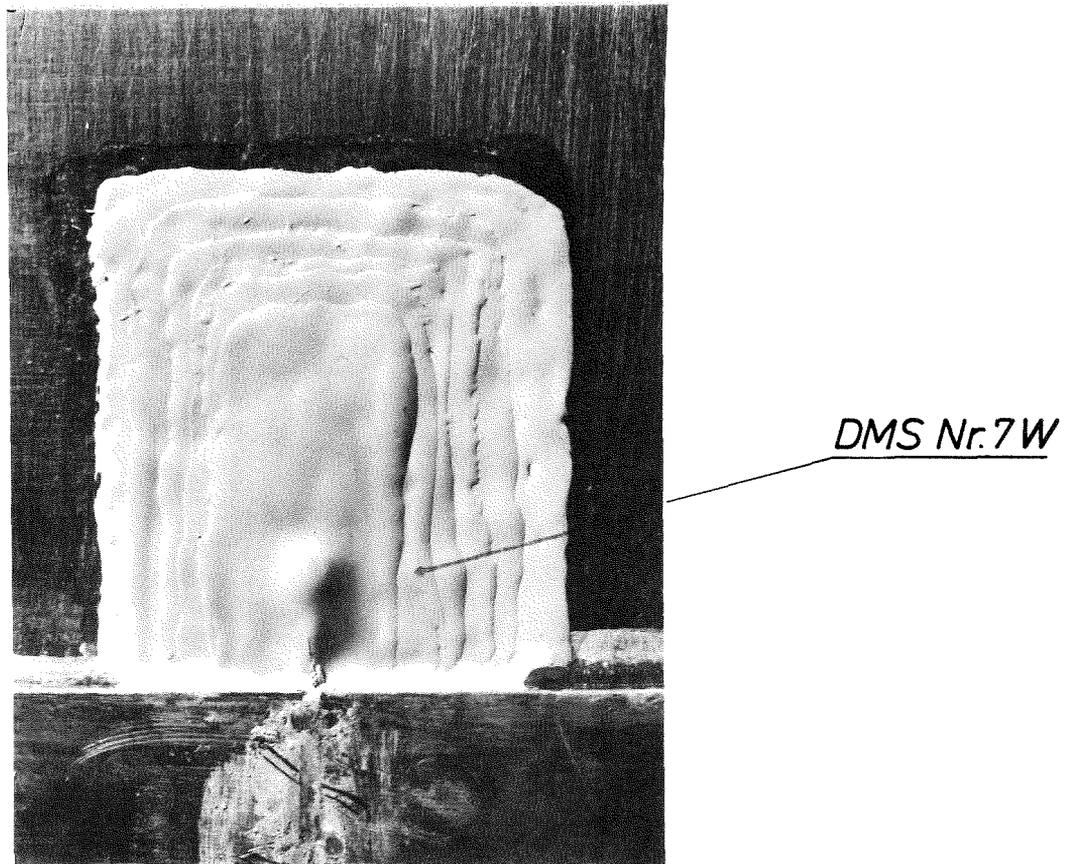


Bild 20 : Zeitliche Änderung des Isolationswiderstandes der DMS im strömenden Wasser (CERCA - Modellplatte)

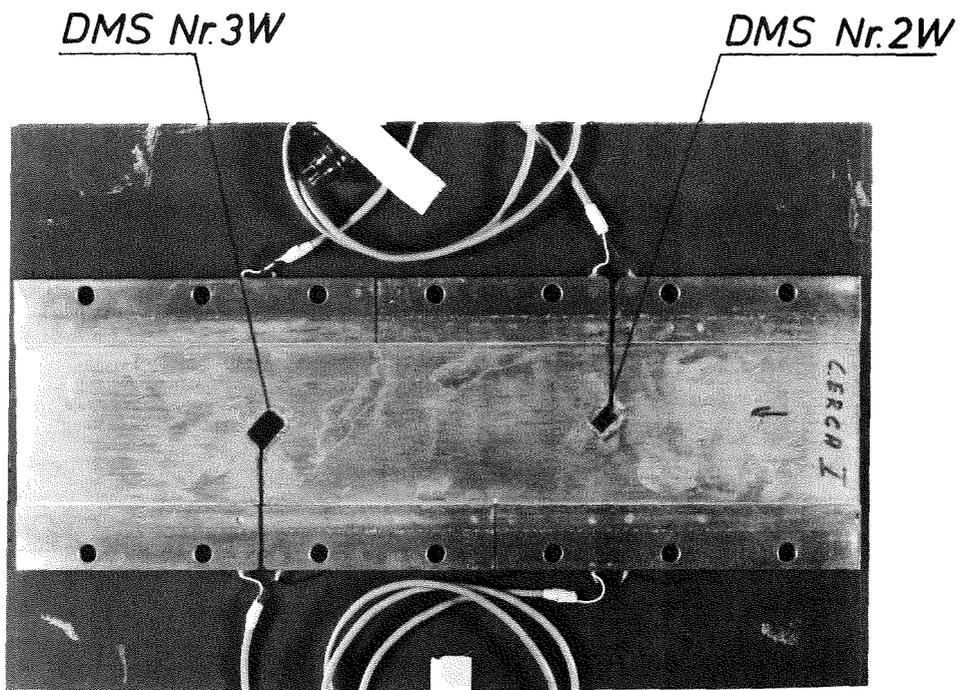


a) Gesamtaufnahme der Modellplatte

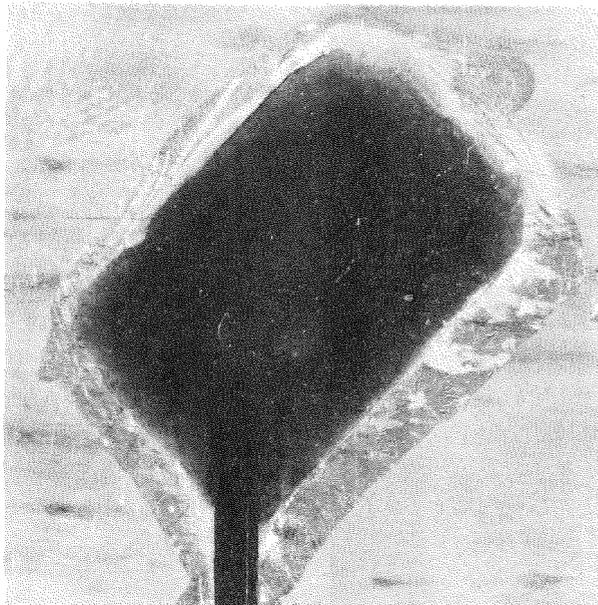


b) DMS- Detailaufnahme

Bild 21 : Aussehen der
DMS- Nr. 5W, 6W, 7W u. 8W nach Einsatz im
strömenden Wasser (IRE- Modellplatte)
a) Gesamtaufnahme der Modellplatte
b) DMS- Detailaufnahme



a) Gesamtaufnahme der Modellplatte



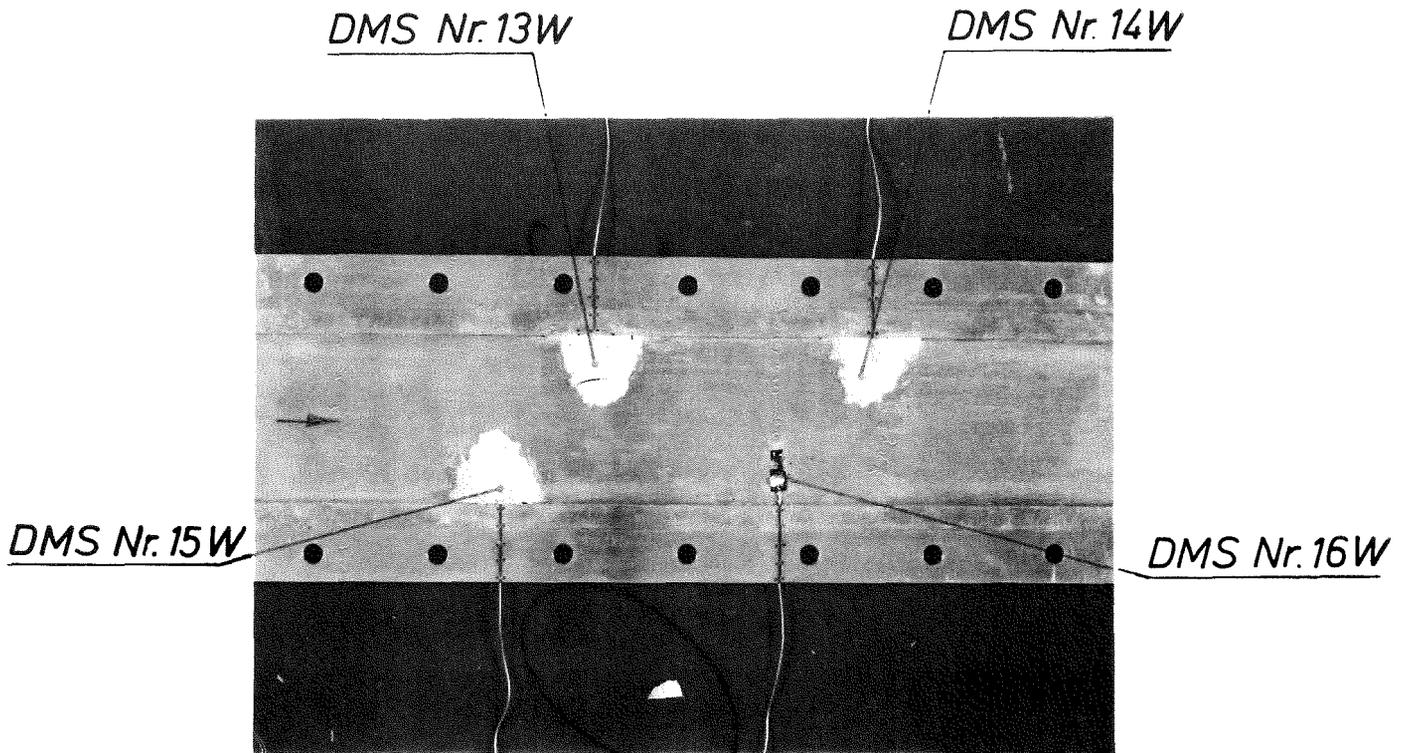
DMS- Nr. 3W



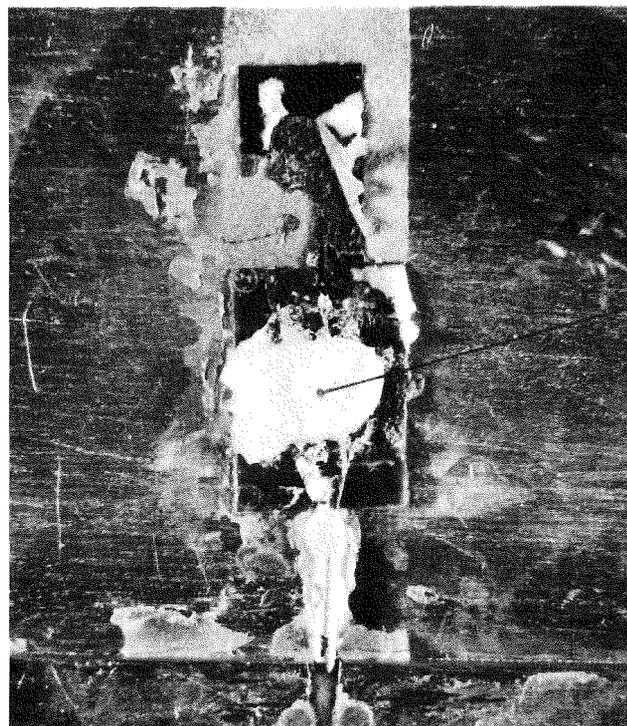
DMS- Nr. 2W

b) DMS- Detailaufnahme (DMS- Nr. 3W u. 2W)

Bild 22: Aussehen der
DMS - Nr. 2W, 3W nach Einsatz im strömenden
Wasser (CERCA - Modellplatte)
a) Gesamtaufnahme der Modellplatte
b) DMS- Detailaufnahme (DMS- Nr. 3W u. 2W)



a) Gesamtaufnahme der Modellplatte



DMS Nr. 16W

b) DMS - Detailaufnahme

Bild 23: Aussehen der
DMS- Nr. 13W, 14W, 15W und 16W nach Einsatz im strömenden Wasser
a) Gesamtaufnahme der Modellplatte
b) DMS- Detailaufnahme

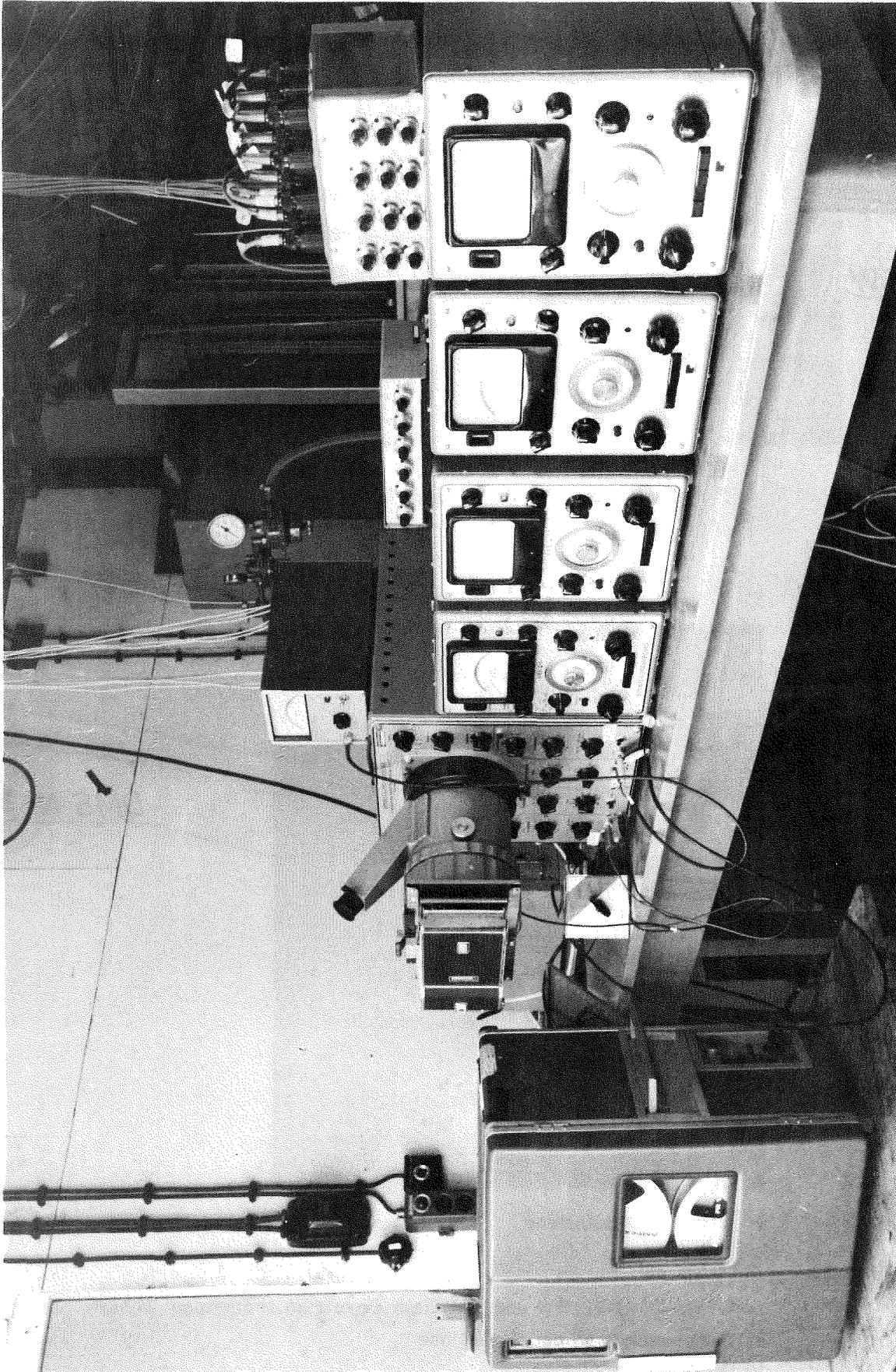


Bild 24 : Messgeräteanordnung für die Versuche im strömenden Wasser

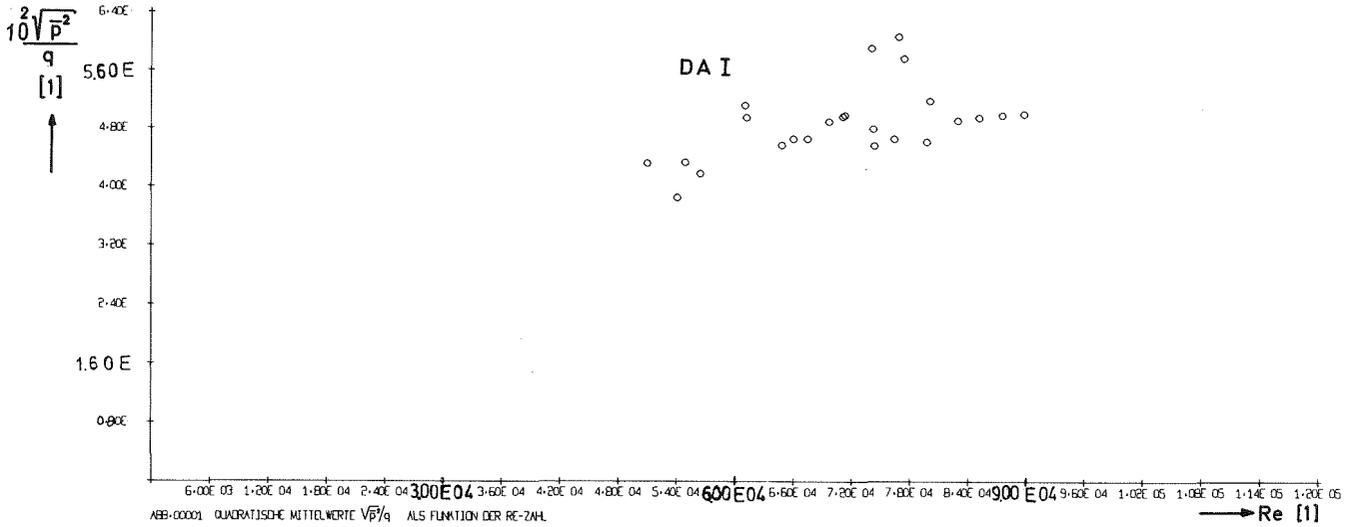


Bild 25 : Quadratische Mittelwerte der Druckpulsationen

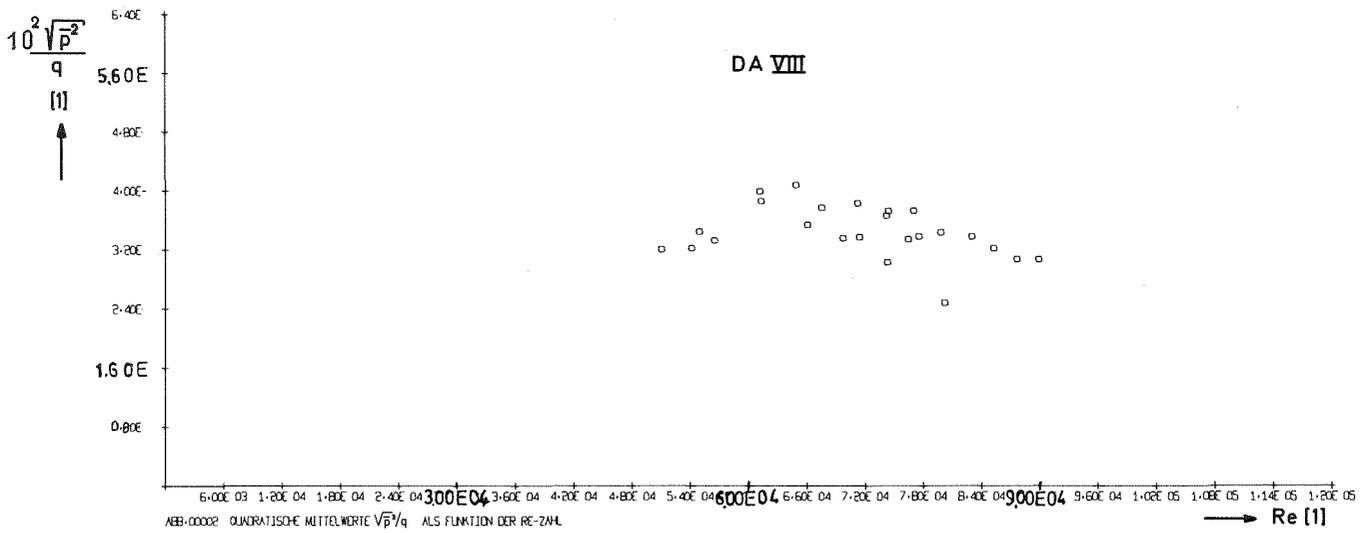


Bild 25 : Quadratische Mittelwerte der Druckpulsationen

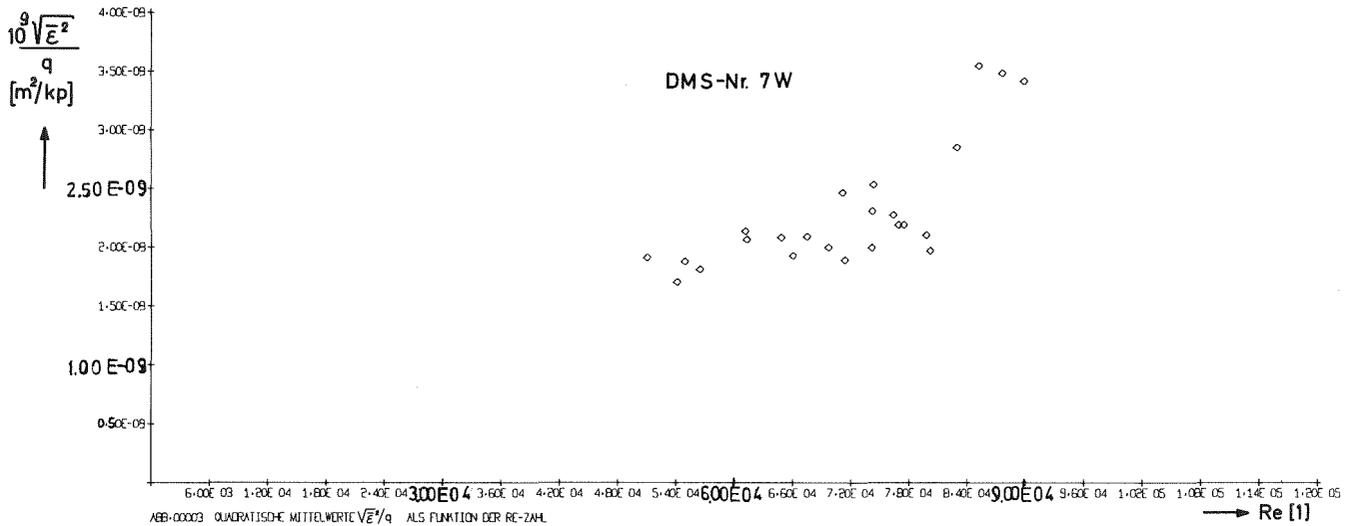


Bild 25 : Quadratische Mittelwerte der relativen Dehnungen

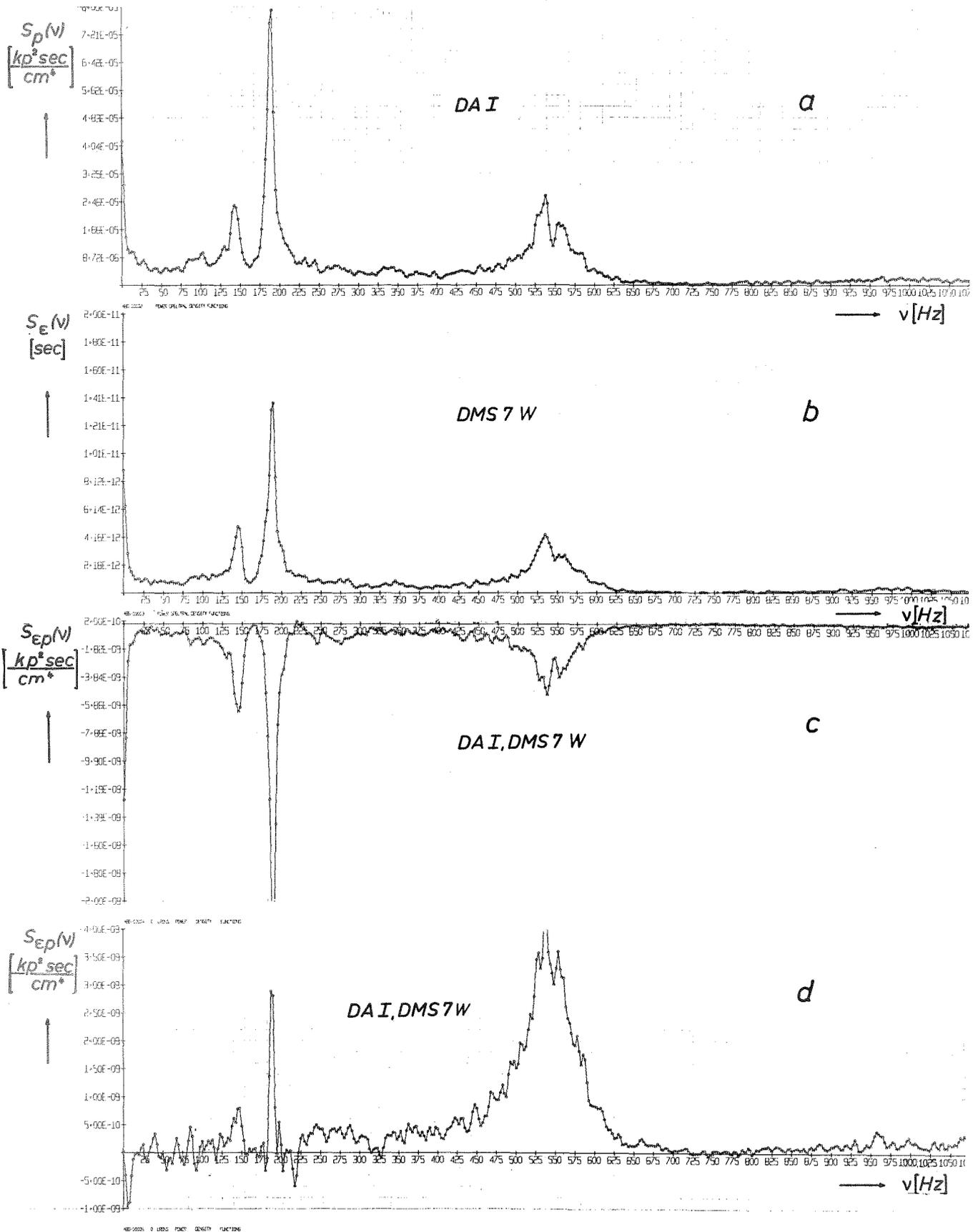


Bild 26: Spektraldichtefunktionen