

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

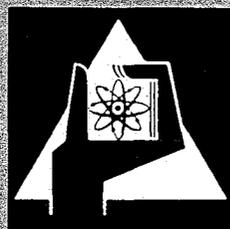
Dezember 1970

KFK 1337
EUR 4572 d

Institut für Reaktorentwicklung
Projekt Schneller Brüter

Untersuchung der Eigenfrequenzen, der Normal- und Dehnungsfunktionen
und der Dämpfung der instrumentierten Modellbrennstäbe
des Na 1/2 - Modellsubassemblies

W. Krüger, R. Schwemmler



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Dezember 1970

KFK 1337

EUR 4572 d

Institut für Reaktorentwicklung

Projekt Schneller Brüter

Untersuchung der Eigenfrequenzen,
der Normal- und Dehnungsfunktionen
und der Dämpfung der instrumentier-
ten Modellbrennstäbe des Na 1/2 -
Modellsubassemblies

W. Krüger

R. Schwemmlé *

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

* CCR - Euratom, Ispra

Département Engineering - Technologie

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit Untersuchungen der freien Biegeschwingung der instrumentierten Brennstäbe des Modellsubassemblies des natriumgekühlten schnellen Brutreaktors der Na 1 Studie. Der Einfluß der axialen Verteilung der Gitterabstandshalter auf die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Normal- und Dehnungsfunktionen wurden rechnerisch untersucht und experimentell verifiziert. Der Einfluß des Abstandshalter-spiels auf die Änderung der Eigenschwingungsformen wurde experimentell untersucht. Die Frequenzgangfunktion der Miniaturdruckaufnehmer für Messungen der Grenzschichtdruckpulsationen im Brennstabbündel wurden aufgenommen. Die experimentelle Anordnung, die Resultate der Untersuchungen, sowie auch die Instrumentierung des Modellsubassemblies sind beschrieben.

Abstract

The report relates to investigations on free lateral vibration of fuel pins of the instrumented subassembly mock-up of the sodium-cooled fast breeder reactor design Na 1. The influence of the axial distribution of spacer grids on natural frequencies and the corresponding vibration modes was calculated and verified by experiments. The influence of the radial clearance in cells of spacer grids on the change of the normal modes was investigated experimentally. The frequency response functions of the miniature pressure transducers were measured which were mounted in one pin and in the subassembly sheath for the detection of the boundary layer pressure fluctuations in the subassembly. Experimental arrangements, results of investigations as well as instrumentation of the subassembly mock-up are described in detail.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	
1.0 Formulierung der Aufgabe	1
2.0 Rechnerische Untersuchungen	4
2.1 Berechnungsvariante I	
2.2 Berechnungsvariante II	
3.0 Experimentelle Untersuchungen	7
3.1 Aufbau der Versuche	
3.1.1 Instrumentierte Modellbrennstäbe	
3.1.2 Versuchsaufbau für die Messung der Resonanzkurven und der Eigen- schwingungsformen der instrumen- tierten Modellbrennstäbe.	
3.1.3 Versuchsanordnungen für die Auf- nahme der Frequenzgangfunktionen der Druckaufnehmer.	
3.2 Resultate der Untersuchungen	
3.2.1 Resonanzkurven	
3.2.2 Eigenschwingungsformen	
3.2.3 Frequenzgangfunktionen	
4.0 Schlußfolgerungen	20
Literatur	
<u>Anhang:</u>	
1. Na 1/2 - Modellsubassembly	23

1.0 Formulierung der Aufgabe

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Reaktorentwicklung im Kernforschungszentrum Karlsruhe und dem Département Engineering - Technologie, CCR-Euratom in Ispra wurde zur Feststellung des Einflusses der verschiedenen Versuchskreisläufe auf die Brennstabschwingung eine Reihe von Messungen durchgeführt. Die vorliegende Arbeit berichtet über die für dieses Vorhaben erforderlichen rechnerischen und experimentellen Untersuchungen an den Modellbrennstäben und anderen Teilen des Modells-
subassemblys.

Für die oben erwähnten Messungen wurde ein Modells-
subassembly benutzt, dessen Geometrie bis auf die reduzierte Brennstabzahl mit der Geometrie des Subassemblys der Na 1 - Studie [1] übereinstimmt. Das Modellbündel hat 37 hexagonal angeordnete Modellbrennstäbe mit dem Außendurchmesser von 6,7 mm, 2676 mm Länge und 8,42 mm Teilung. Die Stäbe sind an 8 Stellen von Gitterabstandshaltern abgestützt. Die innere Schlüsselweite des Subassemblykastens beträgt 53,1 mm. Die Einzelheiten über dieses Subassembly, das im weiteren Text "Modells-
subassembly Na 1/2" genannt wird, werden in den nachfolgenden Abschnitten dieser Arbeit erläutert.

Die geplanten Untersuchungen an verschiedenen Wasserkreisläufen sollten folgende Punkte einschließen:

- 1) Schwingungsuntersuchungen an Modellbrennstäben bei verschiedenen Wasserdurchsätzen.
- 2) Untersuchung des Profils der Druckpulsationen im Subassembly und zwischen zwei hintereinander folgenden Gitterabstandshaltern.
- 3) Untersuchung der Kreuzkorrelationen zwischen den Druckpulsationen und der Brennstabschwingung.

Zur Durchführung dieser Aufgabe wurde beschlossen, das Modells-
subassembly mit folgenden Meßstellen auszustatten:

12 Meßstellen für die Aufnahme der relativen Biegedehnungen der schwingenden Modellbrennstäbe.

1 Meßstelle für die Aufnahme der Druckpulsationen an der Außenwand eines Modellbrennstabes.

Je eine Meßstelle für die Aufnahme der Druckpulsationen vor und hinter dem Modellsubassembly.

26 Meßstellen für die Aufnahme der Druckpulsationen an der Innenwand des Subassemblykastens.

Für die Auswahl der Meßstellen zur Aufnahme der relativen Biegedehnungen an Modellbrennstäben und für die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Dehnungsmeßstreifen an diesen Meßstellen wurden die in den Arbeiten [2] und [3] beschriebenen Verfahren benutzt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden noch zusätzlich die folgenden speziellen Probleme behandelt:

- 1) Optimierung der Verteilung der Gitterabstandshalter entlang des Subassemblys.
- 2) Untersuchung des Einflusses des Spiels zwischen dem Brennstab und dem Abstandshalter auf die Schwingungsformen des Brennstabes.

Ziel der ersten Aufgabe war es festzustellen, wie weit sich die Schwingungsformen des Brennstabes durch die axiale Verschiebung der Abstandshalter beeinflussen lassen, damit die durch die Schwingung verursachte Beanspruchung des Brennstabhüllrohres aus der heißen Zone des Brennstabes in die kalte Zone, dem Spaltgasraum, verlagert werden kann. Dieses Problem wird im Kapitel 2 und im Paragraphen 3.2.3 behandelt.

Bei der zweiten Aufgabe war zu untersuchen, bei welcher Größe des Spiels die in [2] angenommenen Randbedingungen am Brennstab so verändert werden, daß eine merkliche Änderung der Eigenschwingungsformen des Brennstabes stattfindet.

Dieses Problem, welches für die Festlegung von Untersuchungstoleranzen für die Gitterabstandshalter von Bedeutung ist, wird in den Paragraphen 3.1.2 und 3.2.2 behandelt.

Über die Untersuchungen der Frequenzgangfunktionen der Druckaufnehmer wird in den Paragraphen 3.1.3 und 3.2.3 berichtet. Die Instrumentierung der Modellstäbe, sowie des gesamten Modellsbassemblies, wird im Paragraph 3.1.1 und im Anhang erläutert. Das Kapitel 4 enthält die Schlußfolgerungen, sowie die Empfehlungen für die zukünftige Arbeit auf dem behandelten Gebiet.

2.0 Rechnerische Untersuchungen

Die Ausgangsvariante der Berechnungen war das Na 1 - Subassembly [4] mit neun Wabengitterabstandshaltern die in regelmäßigen Abständen von 320 mm in der Axialrichtung des Subassemblies verteilt sind. Die in der Arbeit [4] berechneten Eigenfrequenzen der Brennstäbe des genannten Subassemblies bilden eine Reihe von: 69,2; 79,1; 96,3; 117,8; 139,7 ... Hz. Die in der selben Arbeit berechnete Eigenschwingungsform (Normalfunktion $G_1(x)$) ist "divergent", d.h. die größten Amplituden treten am oberen Ende des Brennstabes auf, also im Bereich der höchsten Betriebstemperatur. Einen ähnlichen Verlauf hat auch die dazugehörige Dehnungsfunktion $\epsilon_1(x)$. Da ein solches Phänomen unerwünscht ist, wurde versucht, über die Neuverteilung der Abstandshalter eine andere konvergente Schwingungsform zu erreichen. Für diesen Optimierungsprozess wurde der Brennstab zuerst als homogener Stab angenommen. Das in Arbeit [2] beschriebene Rechenprogramm wurde so ergänzt, dass es möglich war, die berechneten Normalfunktionen $G_j(x)$ und Dehnungsfunktionen $\epsilon_j(x)$ automatisch zu plotten. Durch probeweise Verteilung der Gitterabstandshalter entlang des Stabes, wurde das Optimum nach fünf Schritten erreicht. In der neuen Version wurden, vom Fußstück des Brennstabes aus gesehen, je zwei Abstände mit 440 mm und je sechs Abstände mit 290 mm festgelegt. Ein Gitterabstandshalter wurde gespart. Mit der neuen Verteilung der Abstandshalter wurden zwei Berechnungsvarianten durchgeführt.

2.1 Berechnungsvariante I

In dieser Variante wurde sowohl die gegebene diskrete Verteilung der Biegesteifigkeit und der Masse entlang des Stabes, als auch die virtuelle Masse des Wassers berücksichtigt. Die Resultate der Berechnungen beschreiben die Eigenschwingungsformen des Modellbrennstabes im Wasser und sind mit den oben

erwähnten Resultaten der Rechnungsvariante I aus der Arbeit [6] direkt vergleichbar. Der Stab wurde in vierzehn Abschnitte mit konstanter Masse und konstanter Biegesteifigkeit unterteilt. Die berechneten Eigenfrequenzen ν_j bilden eine Reihe von: 70,27; 82,97; 91,17; 103,78; 119,68 Hz.

Die Diagramme der ersten vier Normalfunktionen $G_j(x)$ und der entsprechenden Dehnungsfunktionen $\mathcal{E}_j(x)$, $j = 1, 2, 3$ und 4 , zeigt das Bild 1. Aus den Diagrammen folgt, dass bei der ersten Frequenz, bei der die Schwingung mit der größten Amplitude zu erwarten ist, die größten Auslenkungen und Dehnungen im Bereich der niedrigsten Temperatur des Brennstabes, d.h. dem Spaltgasraum, auftreten werden. Aus dem Vergleich der Eigenfrequenzen folgt, dass trotz des Weglassens eines Gitterabstandshalters keine Verringerung der Eigenfrequenzen stattfand.

Da nach der Abschätzung in [5] die Schwingungsamplitude dem Ausdruck $\sqrt{\frac{3}{1}}$ direkt proportional ist, ist auch dieses Ergebnis günstig. Das Auslassen eines Gitterabstandshalters wird sich außerdem durch kleineren Druckverlust im Subassembly positiv auswirken.

2.2 Berechnungsvariante II

Die experimentellen Überprüfungen der Berechnungen im Labor werden der Einfachheit halber in Luft durchgeführt. Aus diesem Grund entfällt die virtuelle Masse des Wassers. Dies aber wird wiederum durch die zusätzliche Masse der für die elektromagnetische Erregung erforderlichen Anker kompensiert. Der Modellbrennstab dieser Rechnungsvariante wurde in dreißig Abschnitte mit konstanter Masse und konstanter Biegesteifigkeit unterteilt. Die berechneten Eigenfrequenzen bilden eine Reihe von: 69,65; 81,70; 90,27; 102,43; 116,61; Hz. Die ersten vier Normalfunktionen $G_j(x)$ und die entsprechenden Dehnungsfunktionen $\mathcal{E}_j(x)$; $j = 1, 2, 3$ und 4 , zeigt das Bild 2.

Aus dem Vergleich der sich entsprechenden Diagramme auf den Bildern 1 und 2 folgt, dass sich die Eigenfunktionen beider Varianten nur wenig voneinander unterscheiden. Besonders bei den niedrigeren Frequenzen ist ein Unterschied kaum feststellbar. Daraus folgt, dass die an dem Modellbrennstab in der Luft experimentell ermittelten Korrekturen der Berechnungen der Variante II auch auf die Berechnungsvariante I völlig übertragbar sind.

3.0 Experimentelle Untersuchungen

Im Na 1/2 - Modellsbassemble wurden drei Modellbrennstäbe mit Dehnmeßstreifen und ein Modellbrennstab mit einem Miniaturdruckaufnehmer instrumentiert. Außerdem wurden Miniaturdruckaufnehmer zur Messung der Druckpulsationen an der Innenwand des Modellsbassemblekastens verwendet. Vor der Montage des Modellsbassemblies wurden die rechnerischen Resultate des Kapitels 2.0 an den mit DMS instrumentierten Modellbrennstäben experimentell verifiziert und die Frequenzgangfunktionen der eingesetzten Miniaturdruckaufnehmer gemessen. Der Aufbau und die Resultate dieser Versuche sind in den nachfolgenden Punkten dieses Kapitels beschrieben.

3.1 Aufbau der Versuche

3.1.1 Instrumentierte Modellbrennstäbe

Der Modellbrennstab mit der Dehnmeßstreifeninstrumentierung ist im Bild 3 gezeigt. Das Hüllrohr, der obere und der untere Endstopfen entsprechen dem Brennstab der Na 1 - Studie. Der Brennstoff wurde durch Bleipellets mit der gleichen Masse pro Längeneinheit simuliert. Die Anordnung im Spaltgasraum wurde leicht abgeändert, um die Instrumentierung des Modellbrennstabes mit den DMS zu ermöglichen.

In der Arbeit [6] wurde vorgeschlagen, bei der Bestimmung des hydrodynamisch induzierten Schwingungszustandes des Brennstabes die Spektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{ref}}(x_0, \nu)$ der relativen Biegedehnung (Referenzdehnung) an einer bestimmten Stelle des Brennstabes (mit der Längskoordinate x_0) experimentell zu bestimmen, und daraus die erwünschten Spektraldichtefunktionen der Biegedehnung $S_{\epsilon}(x, \nu)$, sowie der Auslenkung $S_y(x, \nu)$ für andere interessante Stellen (mit der Koordinate x) zu rechnen. Falls die in Arbeit [6] formulierten Annahmen erfüllt sind, muß dann in jedem j -ten Frequenzband gelten:

$$S_{\epsilon}(x, \nu) = S_{\epsilon_{ref}}(x_0, \nu) \frac{\epsilon_j^2(x)}{\epsilon_j^2(x_0)}, \quad (1)$$

wobei ν die Frequenz bedeutet.

Um die Gültigkeit der Gleichung (1) prüfen zu können, wurden im Spaltgasraum des Modellbrennstabes zwei Ebenen mit den Koordinaten $x_0 = 213$ mm und $x_1 = 603$ mm (gemessen von der Mitte der Aufnahmebohrung des unteren Endstopfens) für die Messung der relativen Biegedehnungen in zwei aufeinander senkrechten Schwingungspositionen vorgesehen. Wie in den Bildern 1 und 2 zu sehen ist, sind an diesen Stellen relativ große Biegedehnungen zu erwarten. Ziel der Instrumentierung in zwei senkrechten Ebenen war es die Möglichkeit zu schaffen das Maß der Korrelation zwischen den Schwingungen in diesen Ebenen zu späteren Versuchen im strömenden Wasser festzustellen.

Die vier Meßstellen wurden mit den Nummern 1 bis 4 bezeichnet. Für die Aufnahme der relativen Biegedehnungen, wurden die Dehnungsmeßstreifen des Types PLS-10 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co. verwendet. Pro Meßstelle wurde eine DMS-Paarung in Halbbrückenschaltung benutzt.

Um je vier DMS pro Ebene im Innern des Modellbrennstabes in definierter x - und y - Richtung in zwei Positionen applizieren zu können, wurde im IRE in der Abteilung Reaktorentwurf ein spezielles "Pneumaxverfahren" entwickelt. Technische Schwierigkeiten ergaben sich durch den kleinen Innendurchmesser von 6 mm, die Abstützung der Bleipelletsäule und die Herausführung der Anschlußleitungen. Nach längeren Versuchen war es möglich, diese Applikationstechnik mit Erfolg durchzuführen. Die Anordnung der DMS und der erforderlichen Montageteile im Spaltgasraum sind im Bild 3 dargestellt. Die Herausführung der Meßleitungen erfolgte am Fussendstopfen des Modellbrennstabes in eingegossenen Kappillarröhrchen. Zur Überprüfung der inneren DMS - Paarungen 3 und 4 in der ersten Ebene ($x_0 = 213$ mm), wurde außerdem an den gleichen Stellen außen am Hüllrohr die DMS-Paarungen 5 und 6 des gleichen Types appliziert. Zur Überprüfung der DMS-Paarungen 1 und 2 in der zweiten Ebene ($x = 603$ mm), wurden außen die DMS-Paarungen

7 und 8 aufgebracht. Für die Aufnahme der Druckpulsationen in der Strömungsgrenzschicht des Brennstabbündels wurde ein Modellbrennstab mit einem Miniaturdruckaufnehmer des Typs XFL-070-100 von der Firma Kulite Semiconductor Products, Inc. instrumentiert. Der Druckaufnehmer wurde in ein spezielles Adapterteil, Bild 4, eingebracht und mit Araldit D und mit Silikonkautschuk vergossen. Der Membrandurchmesser des Druckaufnehmers beträgt 1,8 mm. Die Membrane bildet mit der Hüllwand des Modellbrennstabes eine Ebene. Das Meßsystem des Miniaturdruckaufnehmers besteht aus vier DMS mit 670Ω , die auf die erwähnte Siliziummembrane aufgebracht sind. Die Position der Membranmitte am Modellbrennstab liegt bei $x = 213$ mm, dort wo die maximalen Schwingungsauslenkungen zu erwarten sind. Die Herausführung der Meßleitungen wurde analog zur DMS-Applikationsmethode durchgeführt.

Für die Aufnahme der Druckpulsationen in der Strömungsgrenzschicht des Subassemblykastens wurden Miniaturdruckaufnehmer des Typs CPL-070-100 S der Firma Kulite verwendet. Der Membrandurchmesser beträgt ebenfalls 1,8 mm. Eine Detailaufnahme des Druckaufnehmers in einem Spezialhalter und einen Gesamtblick auf den komplettierten Druckaufnehmer mit Anschlußkabel zeigt das Bild 5 a) und b).

3.1.2 Versuchsaufbau für die Messung der Resonanzkurven und der Eigenschwingungsformen der instrumentierten Modellbrennstäbe.

Für die Messung der Resonanzkurven und der Eigenschwingungsformen der instrumentierten Modellbrennstäbe wurde eine verbesserte Variante der in Arbeit [3] beschriebenen Versuchsanlage benutzt. Die Anlage besteht aus einem Gestell für die Befestigung des Modellbrennstabes, der Abstandshalter und der elektromagnetischen Erregerspulen, die von einem Sinusgenerator über Leistungsverstärker gespeist sind, und einem Satz von Meßgeräten für die Aufnahme der Auslenkungen und der relativen Biegedehnungen der Brennstabschwingung.

Einen Gesamtblick auf die Versuchsanlage zeigt das Bild 6. Zur Fixierung des Fussendstopfens des Modellbrennstabes wurde eine spezielle Vorrichtung verwendet, die es gestattet, den Modellbrennstab um die eigene Achse beliebig zu drehen. Somit wurde eine schnelle Änderung der Einstellung der Schwingungsebene ermöglicht, was besonders für die Kontrolle der Meßebenen der inneren DMS wichtig war.

Der benutzte Abstandshalter ist auf Bild 7 dargestellt. Dieser Abstandshalter mit Dreipunktstützung des Modellbrennstabes, der auf dem Wabengitterabstandshalter basiert, gestattet mittels dreier Stellschrauben ein beliebiges, definiertes Abstandshalterspiel einzustellen. Für die Einstellung des Abstandshalterspieles wurden Fühllehren verwendet.

Zur Erregung der Schwingung wurden acht in Serie geschaltete Elektromagnete benutzt. Die Spulen mit der Abmessung 90 mm \varnothing x 34 mm sind aus 0,9 mm dickem lackisolierten Kupferdraht gewickelt. Die Windungszahl der einzelnen Spulen ist der im Kapitel 2 berechneten Amplitude der Auslenkung $G_1(x)$ an der Stelle des Ankers direkt proportional. Die Kerne der Spulen sind aus 0,3 mm dickem Transformatorenblech zusammengesetzt, die Höhe des Kernpaketes beträgt 16 mm. Die Anker aus St 37 haben die Abmessung 10 x 10 x 15 mm und sind mit einer Madenschraube am Modellbrennstab befestigt. Eine Detailaufnahme der Versuchsanlage mit einer Erregerspule, Anker, Modellbrennstababschnitt und zwei Abstandshaltern zeigt Bild 8. Die Verteilung der Abstandshalter und der Anker entlang des Modellbrennstabes ist auf Bild 9 dargestellt.

Die Spulen wurden von einem RC -Generator Typ MG-47 der Firma Wandel und Goltermann über einen 250 Watt Endverstärker Typ 6 S ELA 2796 a der Firma Siemens und Halske gespeist. Die Frequenz des Erregersignals wurde mit einem Universalzähler Typ UZ 42 Q der Firma Grundig gemessen.

Die DMS-Halbbrücken wurden an die Meßverstärker Typ KWS II/5 der Firma Baldwin Hottinger angeschlossen. Die Ausgangsspannung

von den Meßverstärkern wurde mit dem Effektivvoltmeter Typ 3400 A der Firma Hewlet-Packard gemessen. Parallel dazu wurden die Signale auf dem Schirm eines Zweikanal - Oszillographen Typ H2 V18 System Tönnies der Firma Baldwin Hottinger beobachtet.

Zur Kontrolle der Phase der Auslenkungen wurden die tastlosen induktiven Wegaufnehmer Typ Tr 2-5 der Firma Baldwin Hottinger benutzt, die ebenfalls an die Meßverstärker Typ KWS II/5 angeschlossen wurden. Zur Messung der Amplitude der Auslenkungen, wurden "Meßkeile" in Verbindung mit einem Stereomikroskop Typ III der Firma Karl Zeiss verwendet. Die Einzelheiten des Meßvorganges sind in der Arbeit [3] beschrieben.

3.1.3 Versuchsordnung für die Aufnahme der Frequenzgangfunktionen der Druckaufnehmer

Betrachtet man den Druckaufnehmer als ein lineares System mit konstanten Parametern, dann gilt zwischen der Spektraldichtefunktion $S_p(\nu)$ der Druckpulsationen (vorausgesetzt daß sie im stochastischen Sinne stationär auftreten) und der Spektraldichtefunktion des Signals des Druckaufnehmers $S_{PDA}(\nu)$ die bekannte Relation [7].

$$S_{PDA}(\nu) = |H(\nu)|^2 \cdot S_p(\nu), \quad (2).$$

wobei $H(\nu)$ die Frequenzgangfunktion des Druckaufnehmers darstellt. Da die im Paragraph 3.1.1 beschriebenen Druckaufnehmer für die experimentelle Bestimmung der Spektraldichtefunktionen der Druckpulsationen vorgesehen sind, ist die Kenntnis ihrer Frequenzgangfunktion von prinzipiellem Interesse. Die Versuchsordnung für die Messung der Frequenzgangfunktion des Druckaufnehmers des instrumentierten Modellbrennstabes ist auf Bild 10 schematisch dargestellt. Zur Erzeugung des harmonischen Kalibrierungs-Drucksignals wurde ein Pistophon

Typ 4220 der Firma Brüel und Kjaer verwendet. Das Pistonphon erzeugt ein harmonisches Drucksignal mit dem RMS - Wert 124 dB bezogen auf $2 \cdot 10^{-10}$ bar. Die Amplitude des Pistonphon soll im Frequenzbereich 30 ÷ 800 Hz von der Frequenz unabhängig sein (nach Angabe des Herstellers). Die Änderung der Frequenz geschieht über die Änderung der Speisespannung des Antriebmotors des Pistonphons.

Der Druckaufnehmer wurde an dem Meßverstärker Typ KWS II/5 angeschlossen. Das Ausgangssignal wurde mit dem Effektivvoltmeter Typ 3400 A aufgenommen. Für die Bestimmung der Frequenz wurde der Universalzähler Typ UZ 42 Q von Grundig verwendet.

Die gleiche Anlage wurde auch für die Aufnahme der Frequenzgangfunktionen der übrigen Druckaufnehmer verwendet. Der einzelne Druckaufnehmer wurde an die Meßkammer des Pistonphons mit einem angepassten Adapter angeschlossen.

3.2 Resultate der Untersuchungen

Es wurden insgesamt 3 mit DMS instrumentierte Modellbrennstäbe (Nr. III, IV und VI, die Bezeichnung ist im Anhang erläutert) und ein mit einem Druckaufnehmer instrumentierter Modellbrennstab (Nr. V) untersucht. Ausführlich untersucht wurden die Stäbe III und V. Bei den Stäben IV und VI wurden nur Orientierungsmessungen durchgeführt. Die Einzelheiten der Untersuchungen sind in den folgenden drei Paragraphen diskutiert.

3.2.1 Resonanzkurven

Die bei vier verschiedenen Niveaus der Speisespannung der Elektromagneten U^* aufgenommenen Resonanzkurven des Stabes Nr. III sind auf Bild 11 dargestellt. Die relative Biege-
dehnung wurde dabei mit den DMS-Pärchen 5 und 6 aufgenommen. Auf dem Diagramm ist die relative Größe der Ausgangsspannung von der Messbrücke über die Frequenz aufgetragen. Die Resonanzfrequenzen $\nu_{1\text{res}}$ liegen im Intervall 68,6 bis 68,9 Hz. Die berechnete erste Eigenfrequenz $\nu_1 = 69,65$ Hz ist im Diagramm mit einer vertikalen Linie angedeutet. Die Resonanzkurven von den Modellbrennstäben IV und VI haben einen ähnlichen Verlauf wie die Kurven auf dem Bild 11, und werden deshalb nicht mehr diskutiert. Die Resonanzfrequenzen $\nu_{1\text{res}}$, die entsprechenden Maximalwerte der Amplitude der Referenzdehnung $\epsilon_{\text{ref m}}$ sowie die aus den Resonanzkurven berechneten Werte des Dämpfungsquotienten ξ_1 von den Modellbrennstäben III, IV und VI sind zusammengefaßt in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Abweichung der gemessenen Resonanzfrequenzen $\nu_{1\text{res}}$ von der berechneten ersten Eigenfrequenz ν_1 sind am kleinsten bei dem Modellbrennstab Nr. III (weniger als 1,6 % in negativer Richtung), am größten bei dem Modellbrennstab Nr. VI (+ 6 %). Diese Resultate sind zufriedenstellend. Aus dem Vergleich der Eigenfrequenzen folgt, dass trotz gleichem Materials und den ziemlich eng vorgeschriebenen Fertigungstoleranzen sich die einzelnen Brennstäbe

in ihren mechanischen Eigenschaften nicht vernachlässigbar unterscheiden können. Aus diesem Grunde müssen die Abweichungen von den theoretischen Werten der Eigenfrequenzen auch in der Zukunft in Kauf genommen werden. In diesem Fall liegt die maximale Abweichung von ca. 6 % (bei Stab Nr. VI) noch in annehmbaren Grenzen.

Die Werte der Dämpfungsquotienten ζ_1 wurden berechnet nach der bekannten Gleichung:

$$\zeta_1 = \frac{\Delta \nu_1}{2 \cdot \nu_{1 \text{ res}}}, \quad (3)$$

wobei $\Delta \nu_1$ die Breite der Resonanzkurve bei einem Amplitudenabfall von 3 dB darstellt. Die Werte streuen in einem sehr breiten Intervall von 0,0065 bis 0,0256. Im Gegensatz zu der Arbeit [4] ist keine Abhängigkeit des Dämpfungsquotienten ζ_1 von der Schwingungsamplitude (repräsentiert durch ϵ_{refm}) bemerkbar. Die Streuung des Dämpfungsquotienten wurde noch nicht geklärt. Wahrscheinlich kommen auch hier die Unterschiede zwischen den einzelnen Pellets, die als Dämpfer wirken, zur Geltung. In der Arbeit [4] wurde ein Originalbrennstab mit einvibriertem Brennstoff untersucht und die Resultate der Messung der Dämpfung sind deswegen viel homogener. Wegen Zeitmangel war es nicht möglich, die Dämpfung ausführlicher zu untersuchen, Dies wurde zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

3.2.2 Eigenschwingungsformen

Die erste Schwingungsform (die Normalfunktion $G_1(x)$) wurde an acht Stellen des Modellbrennstabes Nr. III bei vier verschiedenen Werten des Spiels zwischen dem Modellbrennstab und den Abstandshaltern ausführlich untersucht. Sämtliche Messungen wurden mit 69,4 Hz durchgeführt.

Auf den Bildern 12a-d ist die experimentell ermittelte lineare Abhängigkeit zwischen der Amplitude der relativen Dehnung ϵ_{lref}

(aufgenommen mit DMS 5 und 6) und der entsprechenden Amplitude der Auslenkung $G_1(x)$ für vier verschiedene Meßstellen ($x = 23,85; 63,8; 100,55$ und $130,05$ cm) aufgetragen. Das eingestellte Spiel zwischen dem Modellbrennstab und den Abstandshaltern betrug $0,025$ mm. Als Spiel wird in dieser Arbeit der Spielraum zwischen dem Modellbrennstab und jeder der drei Stellschrauben des Abstandshalters (bei angepresstem Stab an die übrigen zwei Stellschrauben) bezeichnet. Die berechneten Werte der Normalfunktion $G_1(x)$, normiert auf den Wert der Referenzdehnung $\epsilon_{1 \text{ ref}} = 10^{-4}$, sind auf den Diagrammen mit dem Symbol * gekennzeichnet. Aus den Diagrammen folgt, daß die Abweichung der gemessenen von den berechneten Werten praktisch vernachlässigbar ist. Ein ähnliches Resultat haben auch die Untersuchungen mit dem Spiel $0,05$ mm erbracht (Bild 13a - d). Im Fall des Spieles mit $0,075$ mm sind die Resultate nicht mehr so günstig (Bild 14a-d). Die Abweichung beträgt ca. 10% in den Abschnitten des Modellbrennstabes mit grosser Amplitude (Bild 14a und b), und etwa 40% im Abschnitt mit kleiner Amplitude (Bild 14e). Ähnliche, etwas günstigere Resultate wurden im Fall des Spieles mit $0,1$ mm erzielt (Bild 15a-c). Die Resultate der Messung des Einflusses des Spiels auf die Amplitude der Auslenkung sind in der Tabelle 2 zusammengefasst und im Diagramm der Werte $G_1(x)$ auf Bild 16 eingetragen. Aus den Resultaten folgt, daß mit dem zunehmenden Spiel die Abweichungen von dem theoretischen Modell zunehmen. Was die Genauigkeit der Schwingungsuntersuchungen anbelangt, sind diese Abweichungen noch akzeptabel. Da in praktischen Fällen die Schwingungen nur in Abschnitten mit grossen Amplituden von Interesse sind, kann man sagen, daß in diesen Abschnitten der Meßfehler klein bleibt. Ein anderes Problem ist die Erhaltung der Funktionstüchtigkeit des Abstandshalters vom Gesichtspunkt der Verhinderung der Brennstabschwingung, wenn das Spiel zu groß wird. In diesem Fall wird der Brennstab an wenigen Abstandshaltern nicht mehr unterstützt, die Schwingungsformen werden sich ändern, und die entsprechenden Eigenfrequenzen werden kleiner. Das wird eine Zunahme der

Schwingungsamplitude im Reaktorbetrieb zur Folge haben. Von dieser Sicht aus ist das Spiel von 0,1 mm wohl die oberste annehmbare Grenze. Aus den Untersuchungen folgt, daß das Abstandshalterspiel im Fall des Subassembly Typ Na 1 kleiner als 0,07 mm gehalten werden soll. Nur so kann garantiert werden, daß die Abstandshalter ihre Funktion wirklich erfüllen.

Die mit dem Symbol ▲ bezeichneten Meßpunkte in Bild 16 gehören zu einer zusätzlichen Untersuchung, bei welcher der Modellbrennstab Nr. III am Fußendstopfen relativ fest eingespannt war. Das Spiel in den Abstandshaltern betrug $\approx 0,075$ mm. Die entsprechenden Diagramme sind auf den Bildern 17a-g dargestellt, die auf den Wert $\epsilon_{1 \text{ ref}} = 10^{-4}$ normierten Meßwerte sind in Tabelle 3 enthalten. Aus den Diagrammen und der Tabelle folgt, daß die Brennstabfußfixierung größere Abweichungen der gemessenen von den berechneten Werten zur Folge hat. Die berechneten Werte für den theoretischen Fall eines am Fußstück fest eingespannten Modellbrennstabes sind in den Diagrammen 17a-g mit dem Symbol ⊕ bezeichnet worden. Die experimentellen Punkte haben die Tendenz, zwischen den beiden extremen theoretischen Grenzen zu liegen, wie es zu erwarten war. Ausnahmen sind die Abschnitte 4, 6 und 8, da hier wahrscheinlich eine größere Biegesteifigkeit oder kleinere Masse als in der Wirklichkeit vorhanden in die Rechnung einbezogen wurden. Auffallend ist die relativ große Empfindlichkeit der Schwingungsform des Stabes in Bezug auf die Einspannung des Fußstückes.

Die Verifizierung der berechneten ersten Schwingungsform $G_1(x)$ wurde bei den Modellbrennstäben Nr. IV und VI an zwei Stellen mit den Koordinaten $x = 23,85$ cm und $x = 63,8$ cm informativ durchgeführt. Zur Aufnahme der relativen Biegedehnungen wurden bei dem Stab Nr. IV die DMS-Paarungen 4 und 2 verwendet, bei dem Stab Nr. VI die DMS-Paarungen 1 und 2, 3 und 4. Das eingestellte Spiel war 0,05 mm, die

Erregerfrequenz betrug 69,4 Hz. Die auf den Wert $\epsilon_{1 \text{ ref}} = 10^{-4}$ normierten Meßwerte, wie auch die berechneten Werte der Normalfunktion $G_1(x)$, sind in der Tabelle 4 aufgeführt. Die Resultate sind in diesem Fall nicht mehr so befriedigend, wie im Fall des Modellbrennstabes Nr. III. Der Maximalwert der relativen Abweichung beträgt bei dem Stab Nr. IV 27 %, bei dem Stab Nr. VI sogar 87 %. Als Ursache für dieses Phänomen wird die örtliche Vergrößerung der Biegesteifigkeit der Brennstabhülle vermutet. Für das gleiche Argument spricht auch die schon früher erwähnte größere Resonanzfrequenz des Modellbrennstabes Nr. VI. Da auch im Reaktorbetrieb mechanisch unterschiedliche Brennstäbe zum Einsatz kommen können, wurden die beiden Modellbrennstäbe zwecks weiterer Untersuchungen ebenfalls in das Na 1/2 Modellsbassembley eingebaut.

Die Verifizierung der berechneten Dehnungsfunktion $\epsilon_1(x)$ wurde bei allen drei Modellbrennstäben an zwei Stellen mit der Koordinate $x = 21,3$ cm und $x = 60,3$ cm (wo die DMS-Paarungen appliziert sind, siehe Paragraph 3.1.1) durchgeführt. Es handelt sich dabei um zwei Typen von Untersuchungen:

- a) Die gleichzeitige Aufnahme der Amplitude der relativen Biegedehnung an den Stellen der unterschiedlichen x - Koordinaten. Die Schwingungsebene und die mit DMS applizierte Oberfläche (innen oder außen) des Hüllrohres waren dabei identisch.
- b) Die gleichzeitige Aufnahme der Amplitude der relativen Biegedehnung an einer Stelle und in einer Schwingungsebene, aber auf unterschiedlichen Oberflächen des Hüllrohres.

Ein typisches Diagramm aus den Untersuchungen des Typ a) ist auf Bild 18 dargestellt. Die aufgetragene Amplitude der relativen Biegedehnung bezieht sich auf die DMS - Paarung 3 (horizontale Achse im Diagramm) und 1 (vertikale Achse im Diagramm) am Stab Nr. III. Der Rechenwert ist wieder mit Symbol \ast bezeichnet. Die Übereinstimmung zwischen dem

Experiment und der Theorie ist gut, die relative Abweichung ist dabei kleiner als 8 %. Ein Resultat aus den Untersuchungen des Types b) ist auf Bild 19 dargestellt. Die aufgetragene Amplitude der relativen Dehnung bezieht sich in diesem Fall auf die DMS-Paarung 5 (außen) und 3 (innen). Mit unterschiedlichen Symbolen werden die verschiedenen Messreihen bezeichnet. Der Theorie nach soll das Verhältnis zwischen den beiden Amplituden mit dem Verhältnis zwischen Außen- und Innendurchmesser des Brennstab-Hüllrohres identisch sein (Symbolpunkt \times). Aus dem Diagramm folgt eine sehr gute Übereinstimmung der Theorie mit dem Experiment, die relative Abweichung ist dabei kleiner als 2 %.

Die Resultate der Dehnungsuntersuchungen der Modellbrennstäbe Nr. III, Nr. IV und Nr. VI sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt. Grössere relative Abweichungen (bis zu 31 %) finden wieder bei dem Modellbrennstab Nr. VI statt. Die Resultate von den Modellbrennstäben Nr. III und Nr. IV sind zufriedenstellend.

3.2.3 Frequenzgangfunktionen

Der auf den Wert $|H(250)|$ normierte Betrag der Frequenzgangfunktion $|H(\nu)|$ ist auf Bild 20 graphisch dargestellt. Für Frequenzen kleiner als 250 Hz hat die Kurve einen leichten Abfall bis zu 3,5 %. Daraus folgt, dass die Spektraldichtefunktion $S_{PDA}(\nu)$ den aufgenommenen Druckpulsationen nach der Gleichung (2) korrigiert werden muss. Der Maximalwert der Korrektur beträgt 7 %. Für Frequenzen, die höher als 300 Hz liegen, findet ein starker Abfall der Frequenzgangkurve statt. Die Messungen in diesem Frequenzbereich wurden von Klirrgeräuschen begleitet und das Meßsignal wurde stark moduliert. Da es sich offensichtlich um Resonanzen im mechanischen Antriebsmechanismus des Pistophonns handelt, wurde die Fre-

quenzgangfunktion nicht bei höheren Frequenzen aufgenommen.
Die Frequenzgangfunktion der übrigen Druckaufnehmer wiesen
einen ähnlichen Verlauf der Frequenzgangkurve auf.

4.0 Schlußfolgerung

Für die Untersuchungen des Einflusses des Versuchskreislaufes auf die Brennstab-schwingung wurde ein Modell-subassembly mit 12 Meßstellen für die Aufnahme der relativen Biegedehnungen der schwingenden Modellstäbe und mit 29 Meßstellen für die Aufnahme der Druckpulsationen im strömendem Kühlmittel entworfen und instrumentiert. Die Funktionstüchtigkeit der Instrumentierung wurde überprüft, die Frequenzgangfunktionen der Druckaufnehmer wurden aufgenommen und die berechneten und die gemessenen Eigenfrequenzen, sowie die entsprechenden Eigenschwingungsformen, wurden verglichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden folgende ergänzende Resultate erzielt:

1. Ein Optimierungsverfahren zur Entlastung der heißen Zone des Subassemblys von den durch die Brennstab-schwingung verursachten Beanspruchungen wurde realisiert und mit positivem Ergebnis praktisch erprobt.
2. Aufgrund der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, daß eine einwandfreie Distanzierung der Brennstäbe im Bündel nur dann garantiert werden kann, wenn das Spiel zwischen dem Brennstab und dem Abstandshalter kleiner als 0,07 mm gehalten wird.

Zwischen künftigen Arbeiten auf dem Gebiet der hydrodynamisch induzierten Brennstab-schwingung wird empfohlen, folgende Arbeiten einzugliedern:

1. Untersuchung des Einflusses des während der Betriebszeit des Reaktors geänderten Abstandshalterspiels auf den Schwingungszustand.
2. Untersuchung des Einflusses der durch die Herstellungsfehler oder Abbrand verursachten Änderungen der Pellet-geometrie auf die Dämpfung und auf den gesamten Schwingungszustand.

L i t e r a t u r

- [1] Smidt, D., Müller, A.:
Referenzstudie für den 1000 MWe natriumgekühlten schnellen Brutreaktor (Na 1)
KFK-Bericht 299, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Dezember 1964
- [2] Kadlec, J.:
Rechnungsverfahren für die Bestimmung der Eigenfrequenzen, der Normalfunktionen und der Dehnungsfunktionen querschwingender Brennstäbe.
Externer Bericht 8/66-9, Institut f. Reaktorentwicklung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Sept. 1966.
- [3] Kadlec, J., Pfrommer, V.:
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.
- [4] Appelt, K.D., Kadlec, J.:
Untersuchungen der Eigenfrequenzen, der Normal- und der Dehnungsfunktionen, sowie der Dämpfung des querschwingenden Brennstabes der Na 1-Studie.
KFK-Bericht 923, EUR 3977d, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Januar 1969.
- [5] Kadlec, J., Pfrommer, V.:
Abschätzung der optimalen Anzahl der Gitterabstandshalter für Na 2-Subassembly.
Externer Bericht 8/67-2, Institut f. Reaktorentwicklung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Januar 1967.

[6]

Kadlec, J., Appelt, K.D.:

Methode für die experimentelle Untersuchung
des durch die Kühlmittelströmung hervorgeru-
fenen Schwingungszustandes der Brennstäbe.
KFK-Bericht 1082, Kernforschungszentrum
Karlsruhe, November 1969.

[7]

Bendat, J.S., Piersol, A.G.:

Measurement and Analysis of Random Data.
John Wiley u. Sons, Inc., New York -
London - Sydney, 1966

[8]

Gast, Ka., Schlechtendahl, E.G.:

Schneller natriumgekühlter Reaktor Na-2
KFK-Bericht 666, EUR 3706d, Kernforschungszentrum
Karlsruhe, Oktober 1967.

Anhang:

Das Na 1/2 - Modellsubassembly

Das Na 1/2 - Modellsubassembly mit der Positionierung der Druckaufnehmer, sowie ein mit Dehnungsstreifen instrumentierter Modellbrennstab sind im Bild A 1 dargestellt. Die Geometrie des Subassemblys stimmt mit der der Na 1 - Studie [1] überein, nur ist die Brennstabzahl auf 37 reduziert. Die acht eingebauten Abstandshalter entsprechen dem Wabengitterabstandshaltertyp der Na 2-Studie [8].

Wie das Bild A1 weiterhin zeigt, ist die Erfassung der Druckpulsationen in der Grenzschicht des strömenden Wassers an der Innenwand des Modellsubassemblys an 26 Druckaufnehmer-Positionen (A bis Alpha) möglich. Die Positionierung der Druckaufnehmer gestattet die Aufnahme der Druckpulsationen nach dem Eintritt des strömenden Wassers in das Modellsubassembly (Position A), im Abschnitt zwischen dem ersten und zweiten Abstandshalter (Positionen B bis U) und hinter allen folgenden Abstandhaltern (Position V bis Alpha). Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Änderungen der Druckpulsationen entlang des gesamten Modellsubassemblys zu untersuchen.

Außerdem ermöglichen die Meßstellen I eine Pulsationsuntersuchung vor dem Eintritt in das Subassembly, und die Meßstelle V nach dem Austritt aus dem Subassembly. Dadurch können eventuelle "eingeschleppte" Druckpulsationen in das Modellsubassembly, sowie irgendwelche "Rückkopplungen" von Kreislaufkomponenten analysiert werden.

Die Positionierung der instrumentierten Modellbrennstäbe im Bündel sind aus dem Bild A2 ersichtlich. Der Stab Nr. III mit DMS-Instrumentierung wurde in der zweiten Brennstabreihe von aussen gesehen positioniert. Der Stab Nr. IV mit DMS-Instrumentierung wurde in der Mitte des Bündels und der Stab Nr. VI, ebenfalls mit DMS-Instrumentierung, wurde in der Randzone des Bündels, Richtung Aufnehmerhalter für Druckaufnehmer entlang des Subassemblies positioniert. Hierdurch können die Biegeschwingungen der Modellbrennstäbe über die gesamte Schlüsselweite des Subassemblies gemessen werden.

Dem Stab Nr. VI wurde der Stab Nr. V mit Druckaufnehmerinstrumentierung zugeordnet. Es sollte somit die Möglichkeit geschaffen werden, das Zusammenwirken von Druckpulsationen und Biegeschwingungen im Bündel zu untersuchen. Die Bilder A3 und A4 zeigen den Einbau der instrumentierten Modellbrennstäbe in den Brennelementfuss. Die Meßleitungen wurden in weich geglühten austhenitischen Kapillarröhrchen mit 1,0 mm Außendurchmesser geführt. Am Brennelementfuss mußten diverse Kanäle gefräst werden, um die Kapillaren günstig durch zwei Quetschgummidichtungen zwischen den Flanschen aus dem Modellsubassembly herausführen zu können.

Das Bild A5 zeigt einen Gesamtblick auf das montierte Stabbündel mit dem Anschlußkasten für die instrumentierten Modellbrennstäbe und die äußere Sechskanthülle des Subassemblies mit den diversen Meßstellen für die Druckaufnehmer.

Stab Nr.	Spiel [mm]	ν_{res} [Hz]	$\xi \cdot 10^2$	ϵ_{refm} [10^{-6}]
III	0,075	68,6	1,86	30,20
III	0,075	68,8	1,53	35,05
III	0,075	69,4	1,26	15,02
III	0,075	69,8	1,97	6,80
IV	0,05	69,8	0,65	15,51
IV	0,05	67,6	2,22	23,65
IV	0,05	67,4	2,56	30,30
IV	0,05	67,2	1,72	36,6
VI	0,05	73,8	1,06	12,21
VI	0,05	72,8	0,89	19,5
VI	0,05	72,6	0,78	27,12
VI	0,03	71,4	0,12	71,4

Tabelle 1: Charakteristische Werte aus den Resonanzkurven für Stab Nr. III, IV und VI.

Koordinate x	G (x) theor.	Gemessene Werte von G (x) für variirtes Abstandshalterspiel			
[cm]	[mm]	[mm]			
		0,025	0,05	0,075	0,1
23,85	0,535	0,515	0,535	0,505	0,525
63,80	0,440	0,415	0,420	0,400	0,420
100,55	0,140	0,140	0,140	0,100	0,122
130,05	0,071	0,071	0,07	0,065	
		◇	□	○	■
		S y m b o l e			

Tabelle 2: Vergleich theoretischer Werte G (x) mit experimentellen Werten G (x) für variirtes Abstandshalterspiel, für Stab Nr. III.

Koordinate x	G (x) theor.	G (x) experim., mit Brennstab- fussfixierung, 0 075 mm Ab- standshalterspiel
[cm]	[mm]	[mm]
20,45	0,540	0,420
23,85	0,535	0,565
27,03	0,515	0,480
59,87	0,405	0,5650
63,80	0,440	0,980
67,90	0,430	0,590
100,55	0,140	0,215
130,05	0,071	0,150
		S y m b o l : ▲

Tabelle 3: Experimentell ermittelte Werte für G (x) bei
Brennstabfussfixierung für Stab Nr. III

Stab.Nr.	Abschnitt	Koordinate x [cm]	Meßstelle	Gem. Werte $G_1(x)$ [mm]	Ber. Werte $G_1(x)$ [mm]
IV	4	23,85	DMS 2	0,670	0,539
IV	4	23,85	DMS 4	0,675	0,539
IV	7	63,80	DMS 2	0,605	0,441
IV	7	63,80	DMS 4	0,625	0,441
VI	4	23,85	DMS 1	0,815	0,539
VI	4	23,85	DMS 2	0,720	0,539
VI	4	23,85	DMS 3	0,655	0,539
VI	4	23,85	DMS 4	0,645	0,539
VI	7	63,80	DMS 1	1,15	0,441
VI	7	63,80	DMS 2	1,15	0,441
VI	7	63,80	DMS 3	0,745	0,441
VI	7	63,80	DMS 4	0,610	0,441

Tabelle 4: Gemessene und berechnete Werte $G_1(x)$
für Stab Nr. IV und VI

Stab Nr.	Messtelle	Gem. Dehnung $\epsilon_i \cdot 10^6$	Ber. Dehnung $\epsilon_i \cdot 10^6$
III	DMS 5/DMS 3	1,132	1,117
III	DMS 7/DMS 1	1,310	1,117
III	DMS 5/DMS 7	1,264	1,19
III	DMS 3/DMS 1	1,281	1,19
IV	DMS 4/DMS 2	1,14	1,19
VI	DMS 4/DMS 2	1,56	1,19
VI	DMS 3/DMS 1	1,25	1,19

Tabelle 5: Gemessene und berechnete Dehnungen an den
Stäben Nr. III, IV und VI.



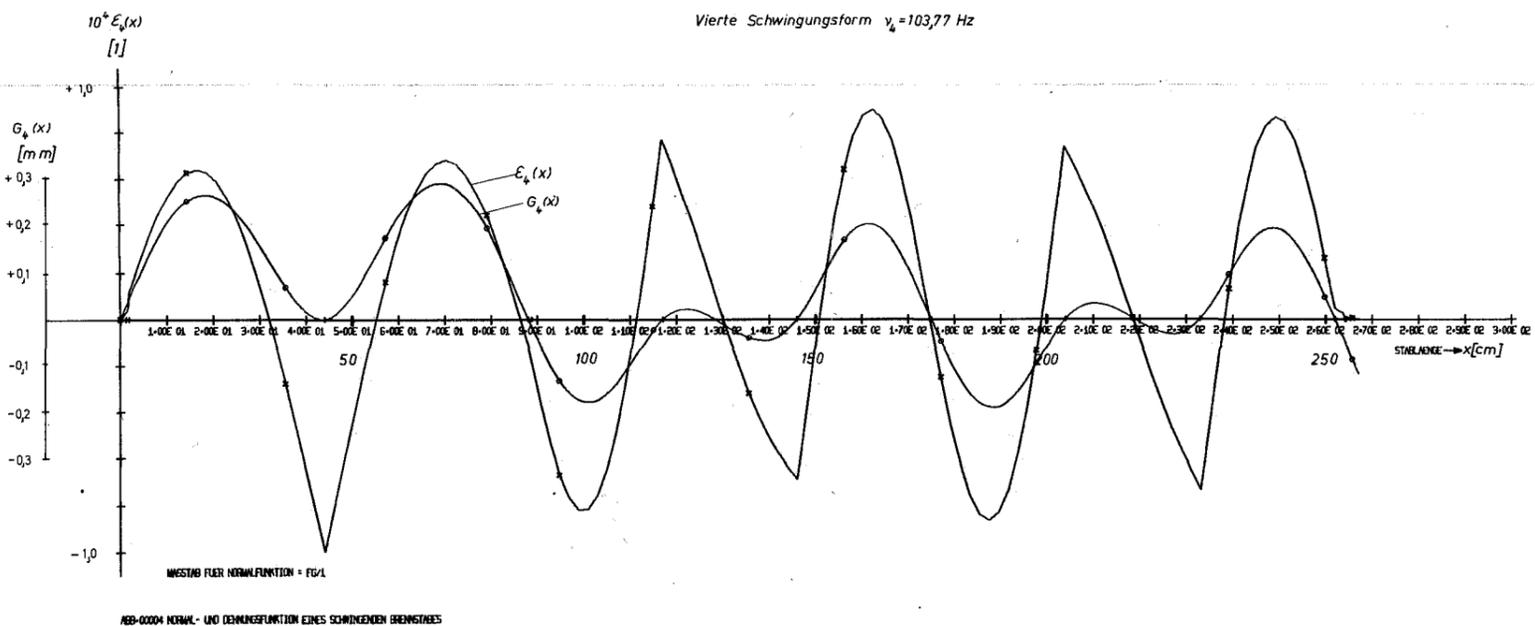
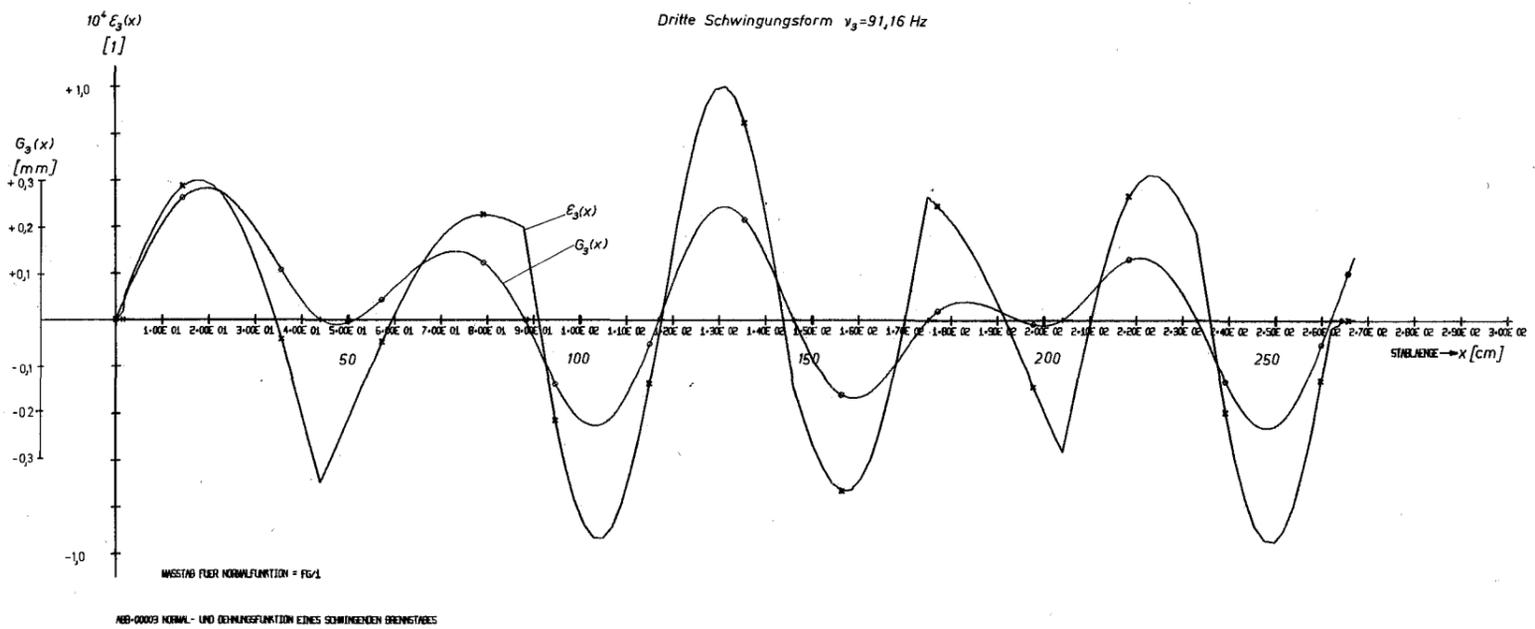
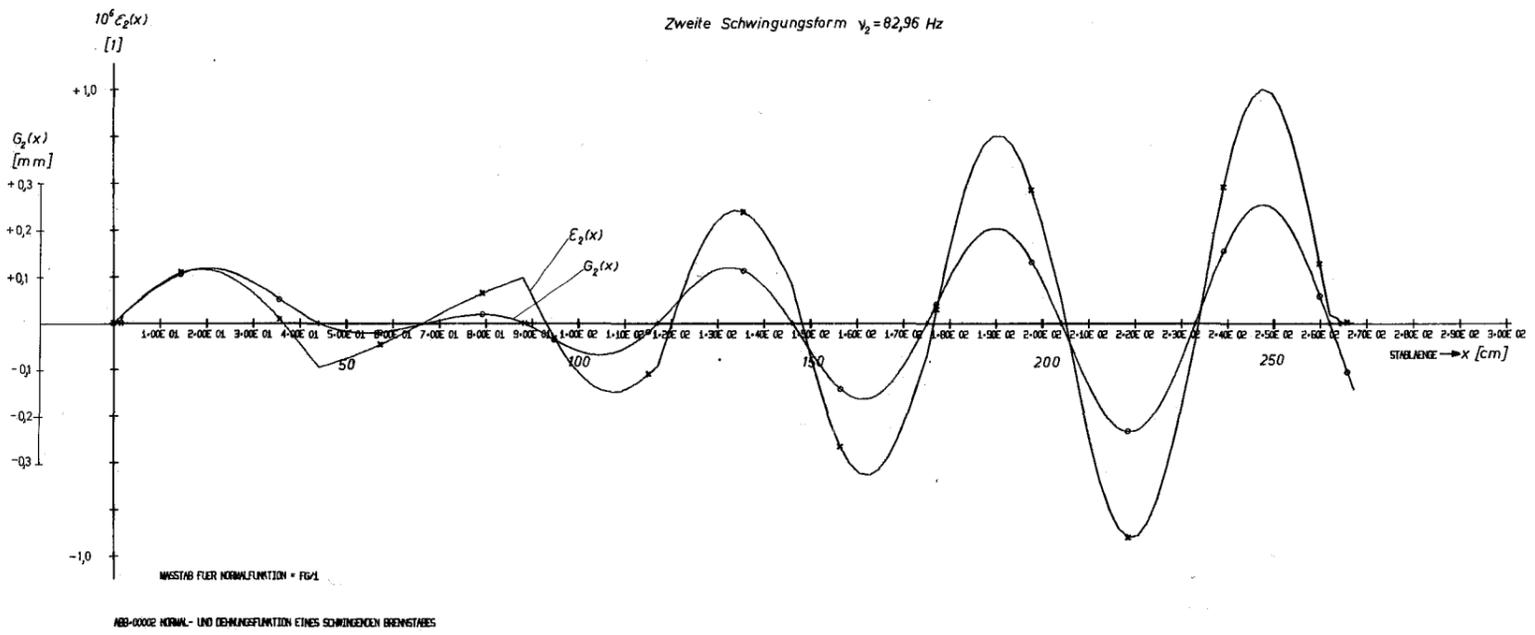
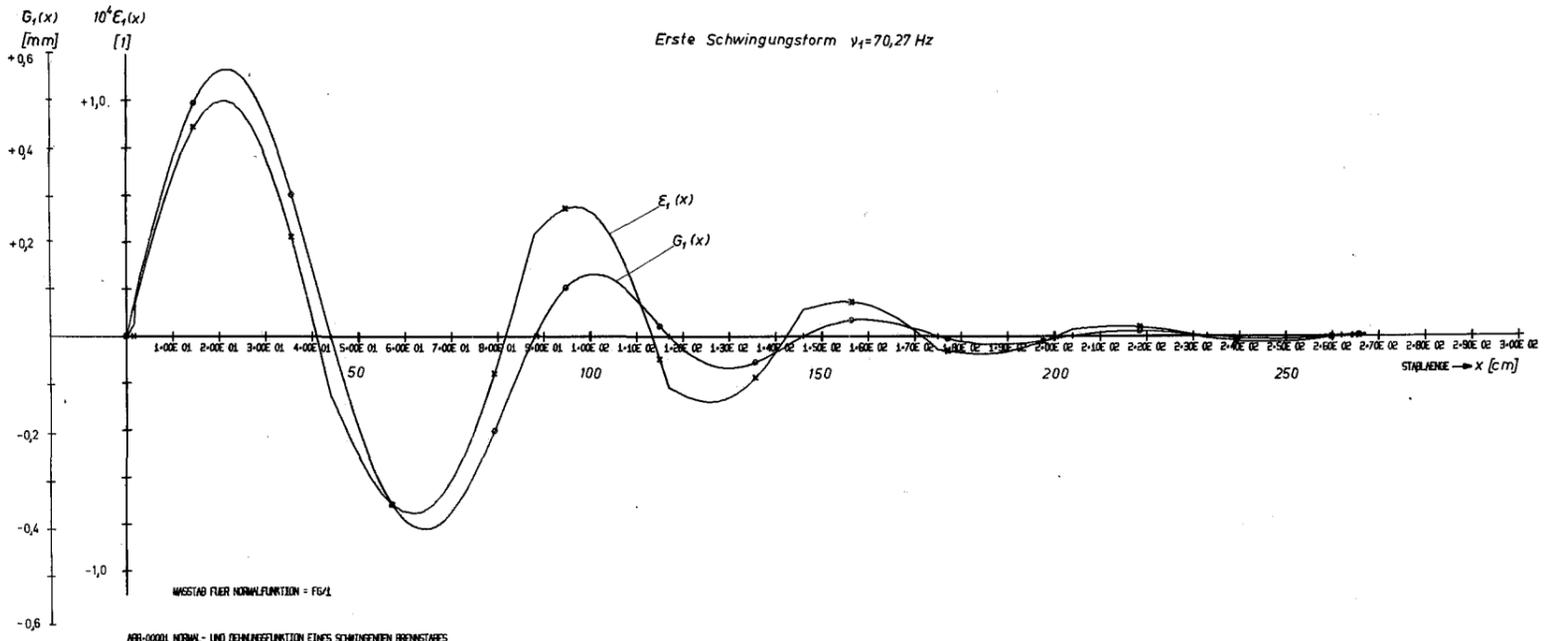


Bild 1: Resultate der Berechnungen (Variante I)

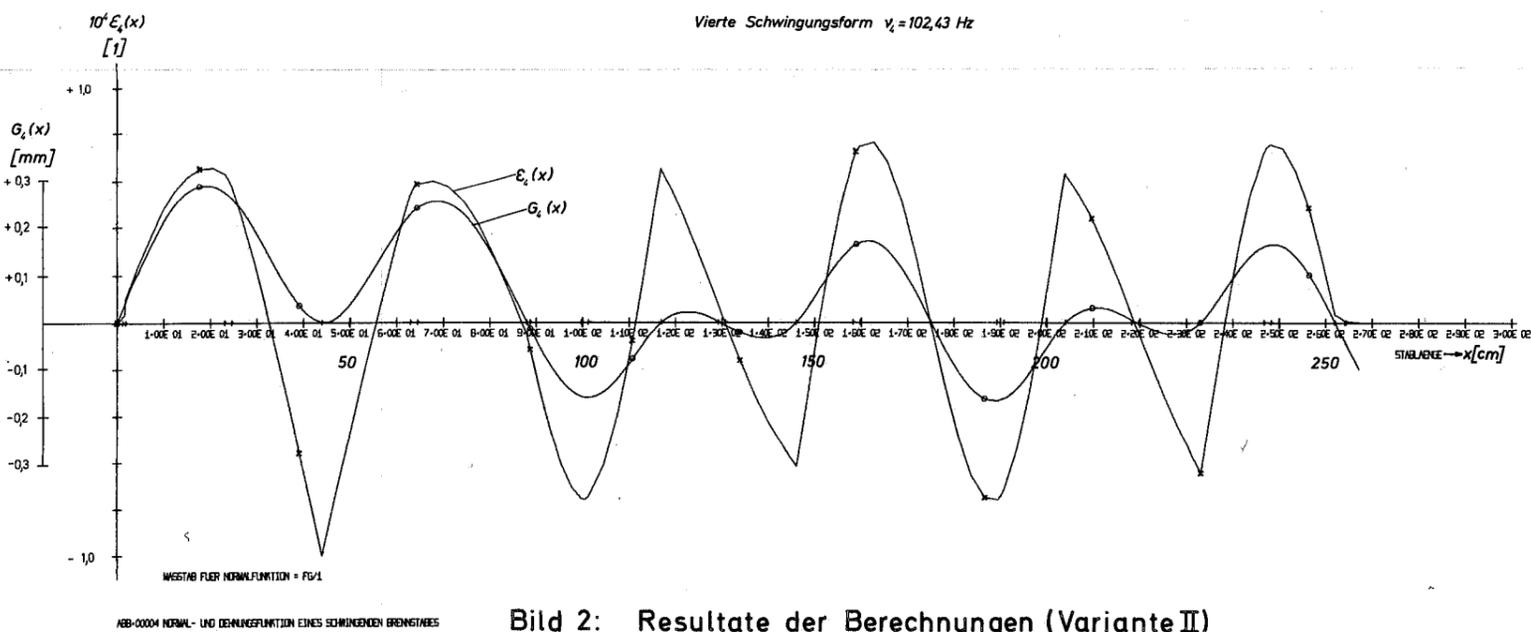
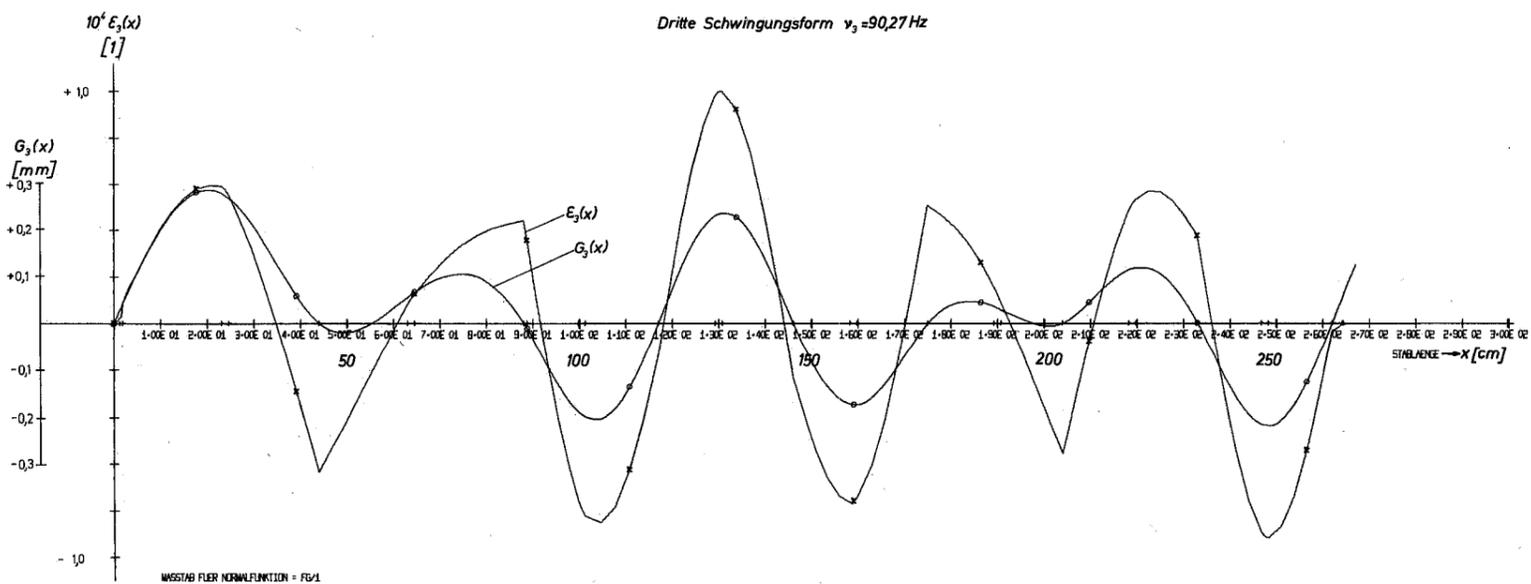
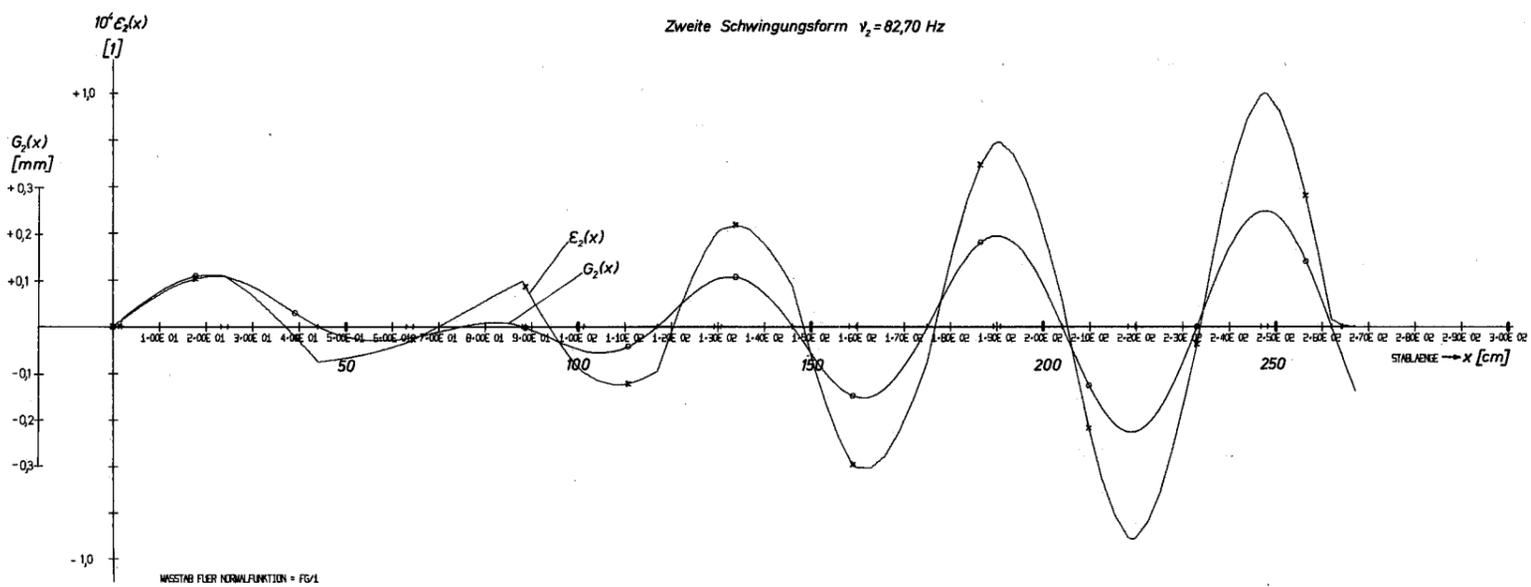
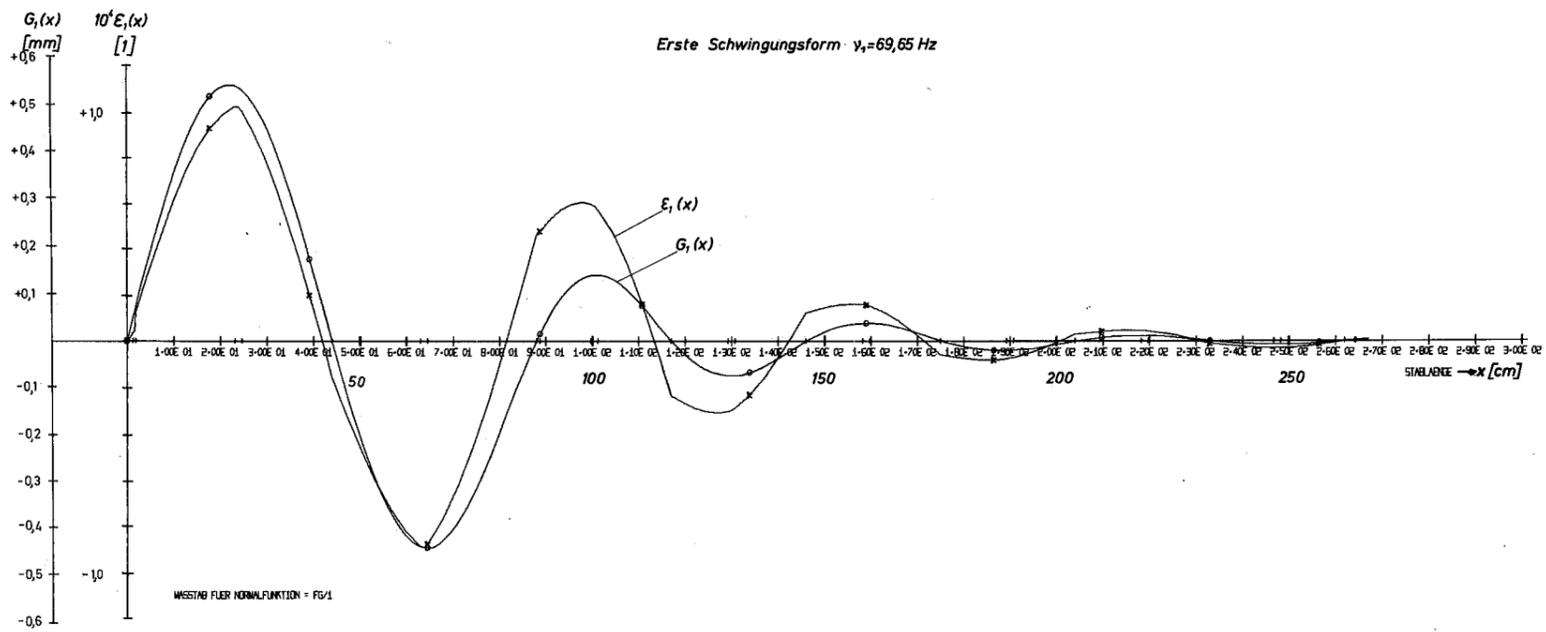
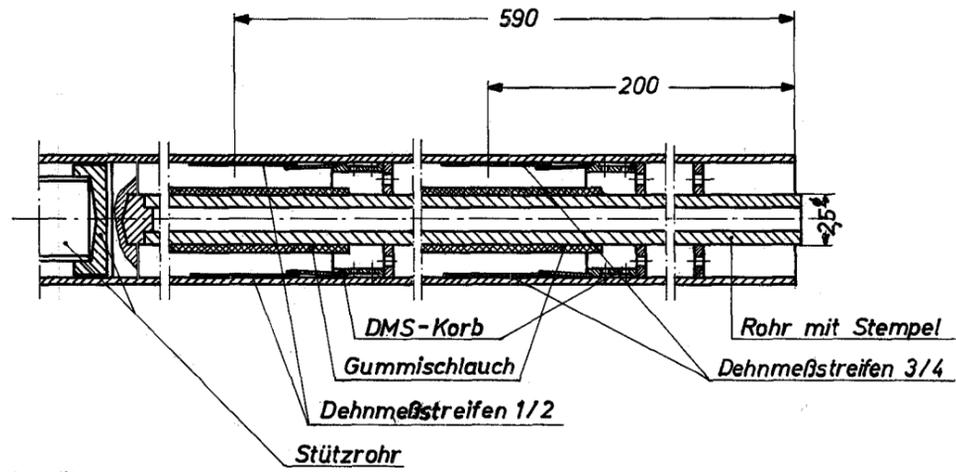
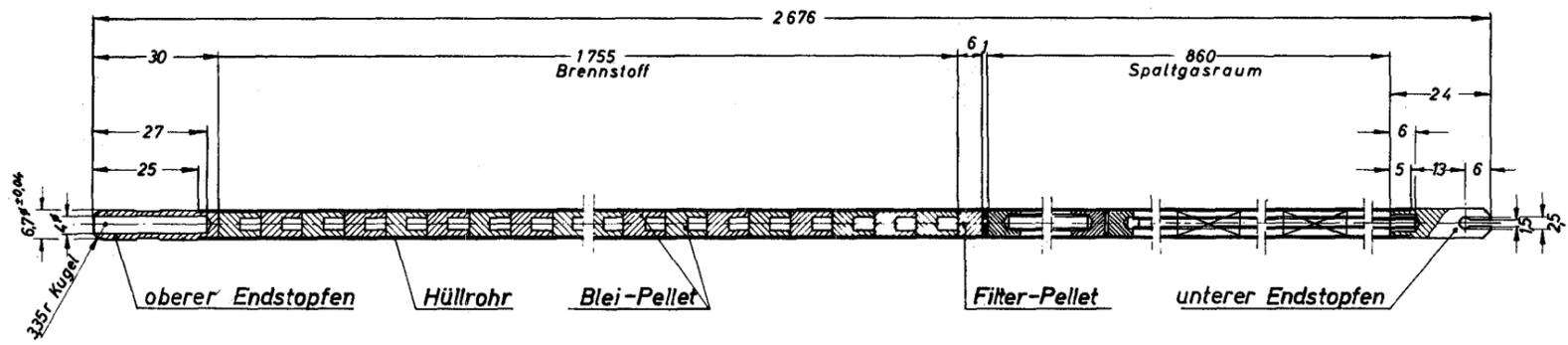


Bild 2: Resultate der Berechnungen (Variante II)



**Bild 3: Modellbrennstab mit
Dehnmeßstreifeninstrumentierung**

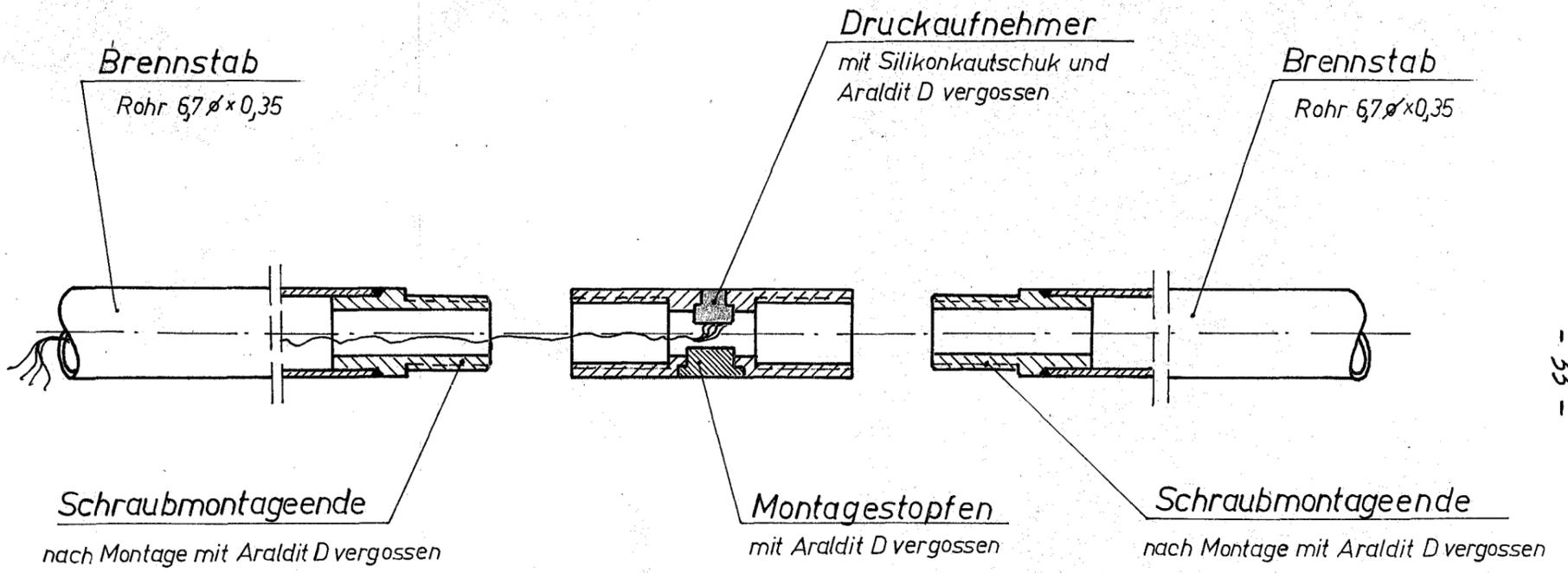


Bild 4: Druckaufnehmermontage im Modellbrennstab

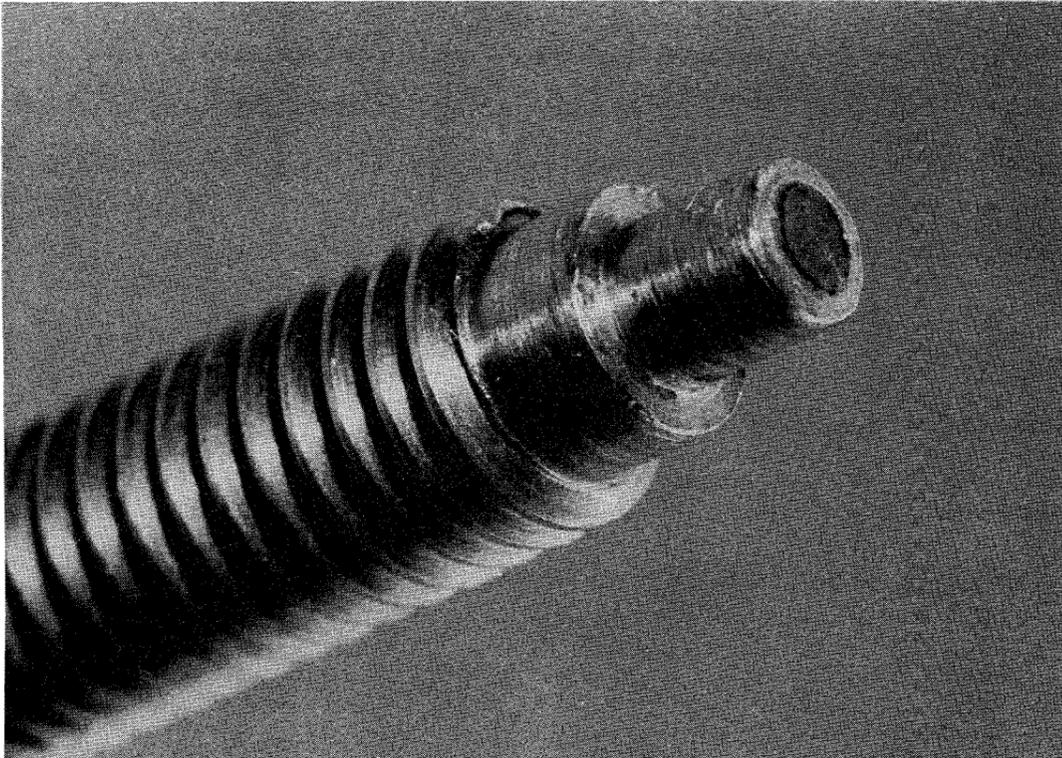


Bild: 5 a Druckaufnehmer

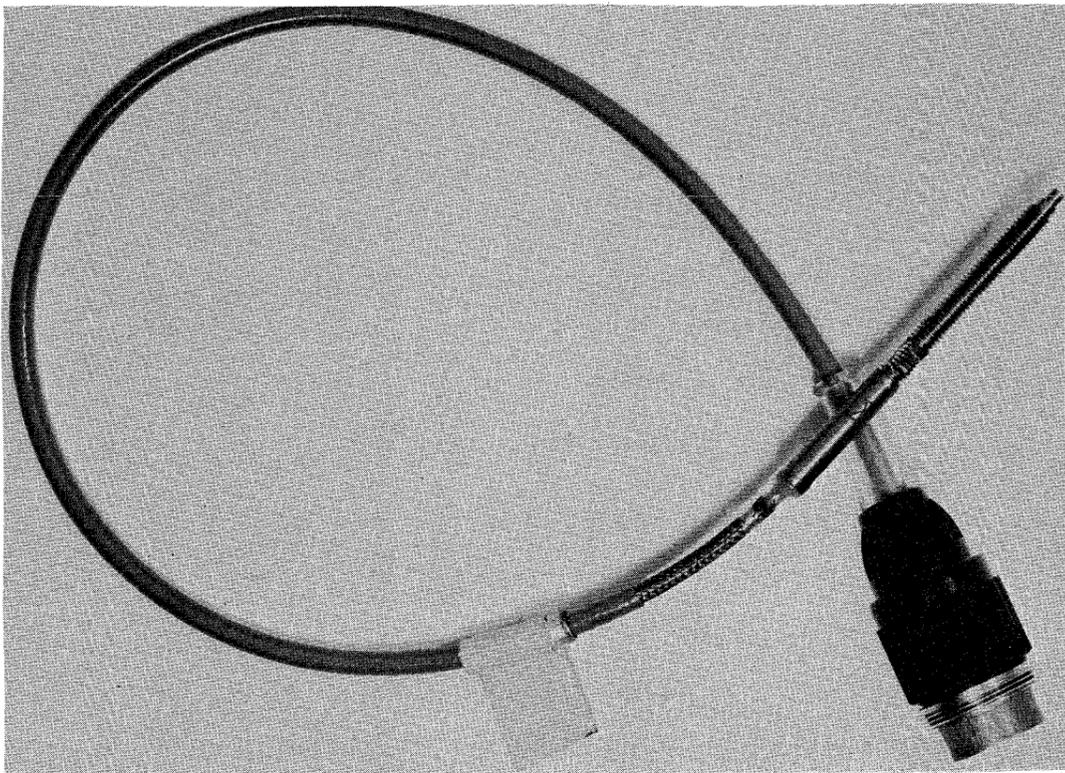


Bild: 5 b : Kompletter Druckaufnehmer

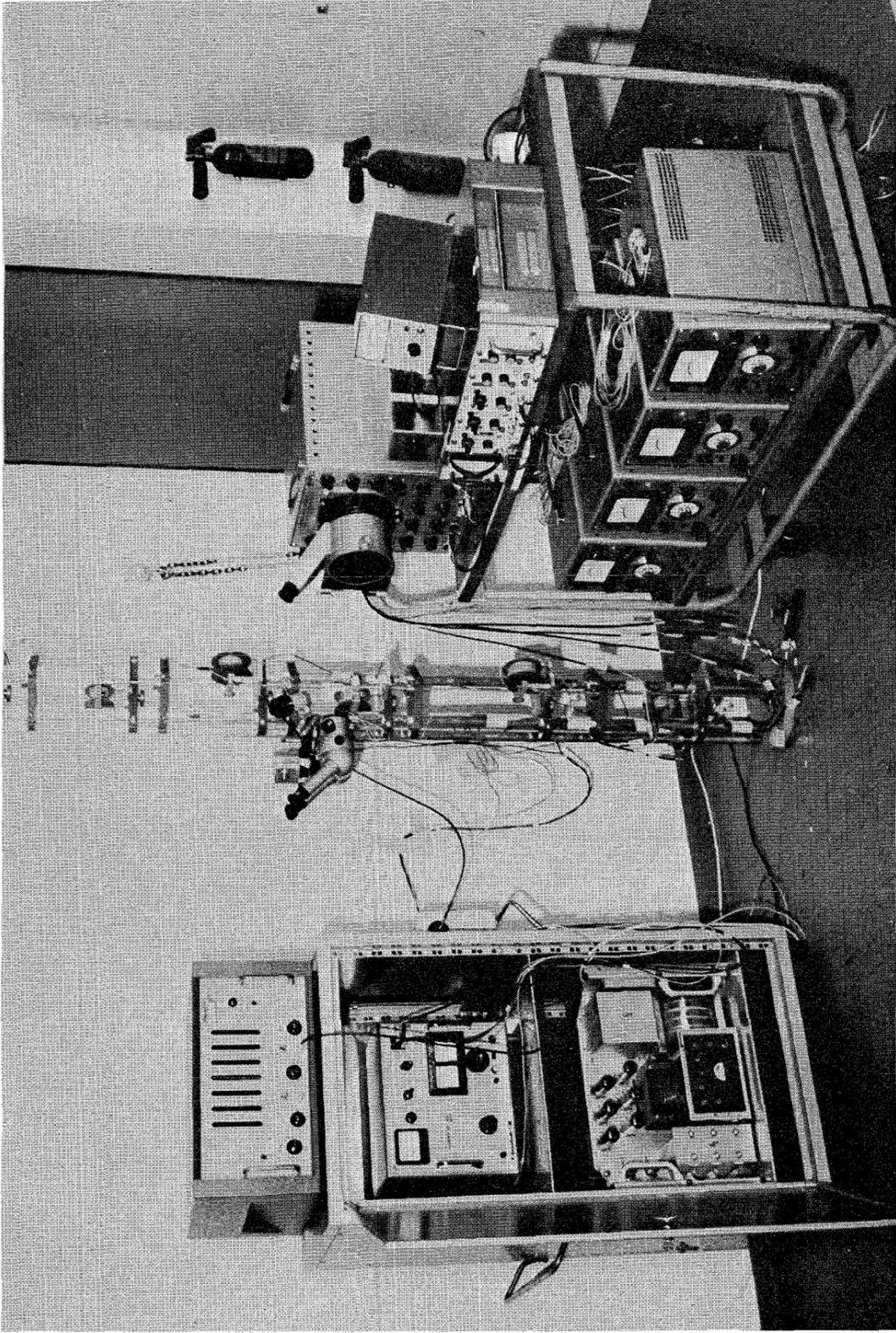


Bild 6: Versuchsaufbau

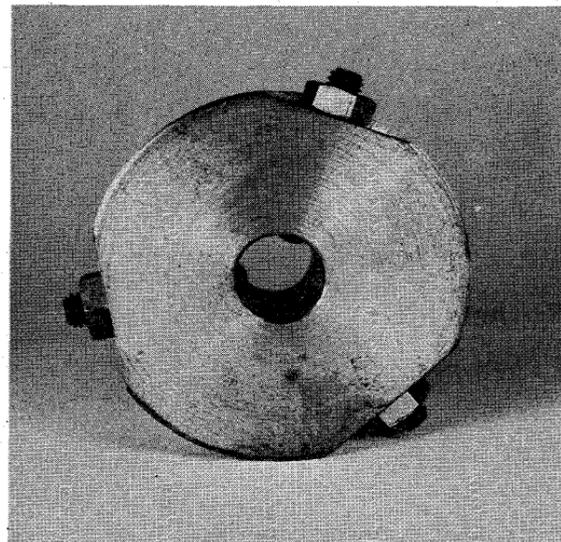
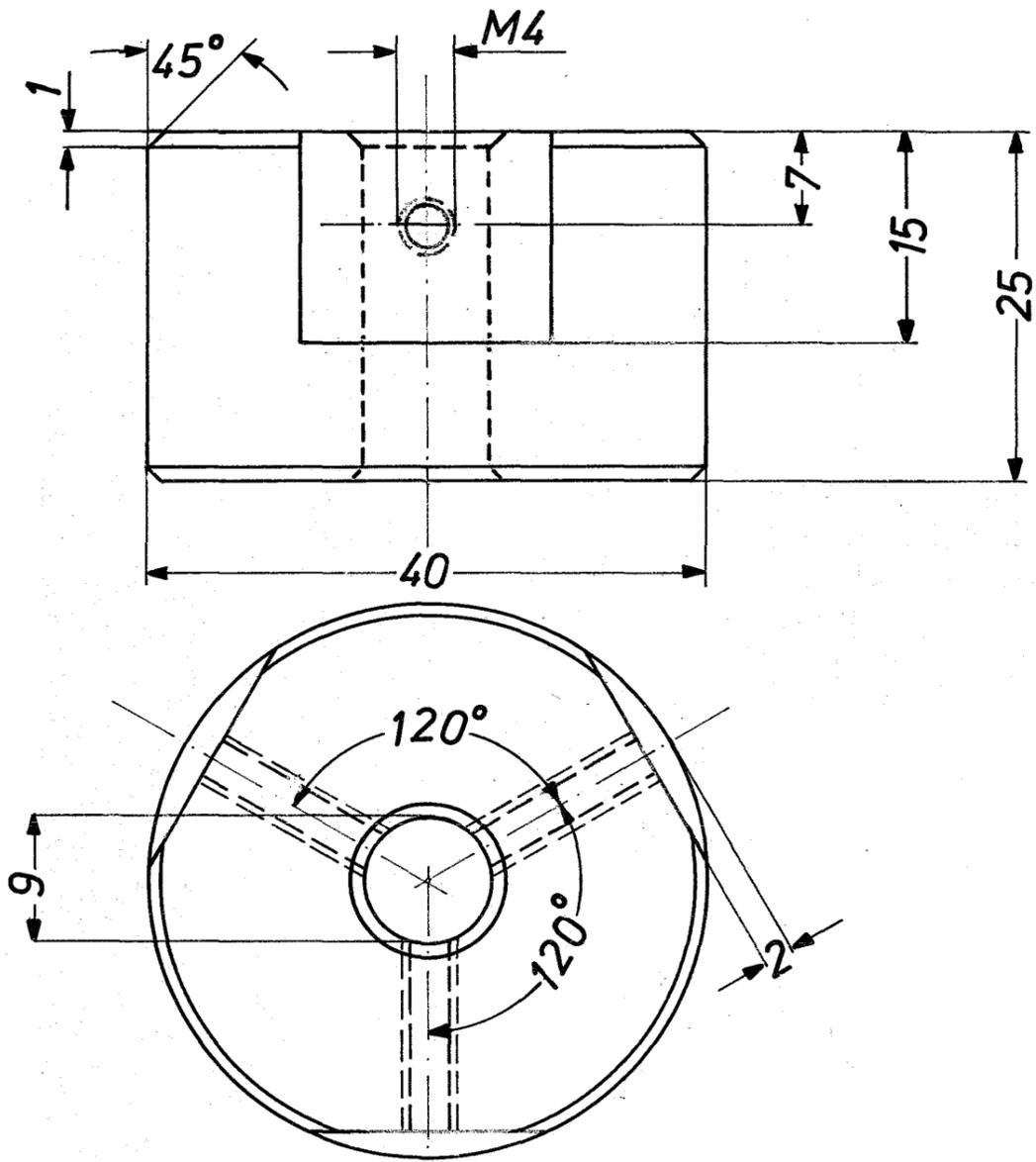


Bild 7: Abstandshalter

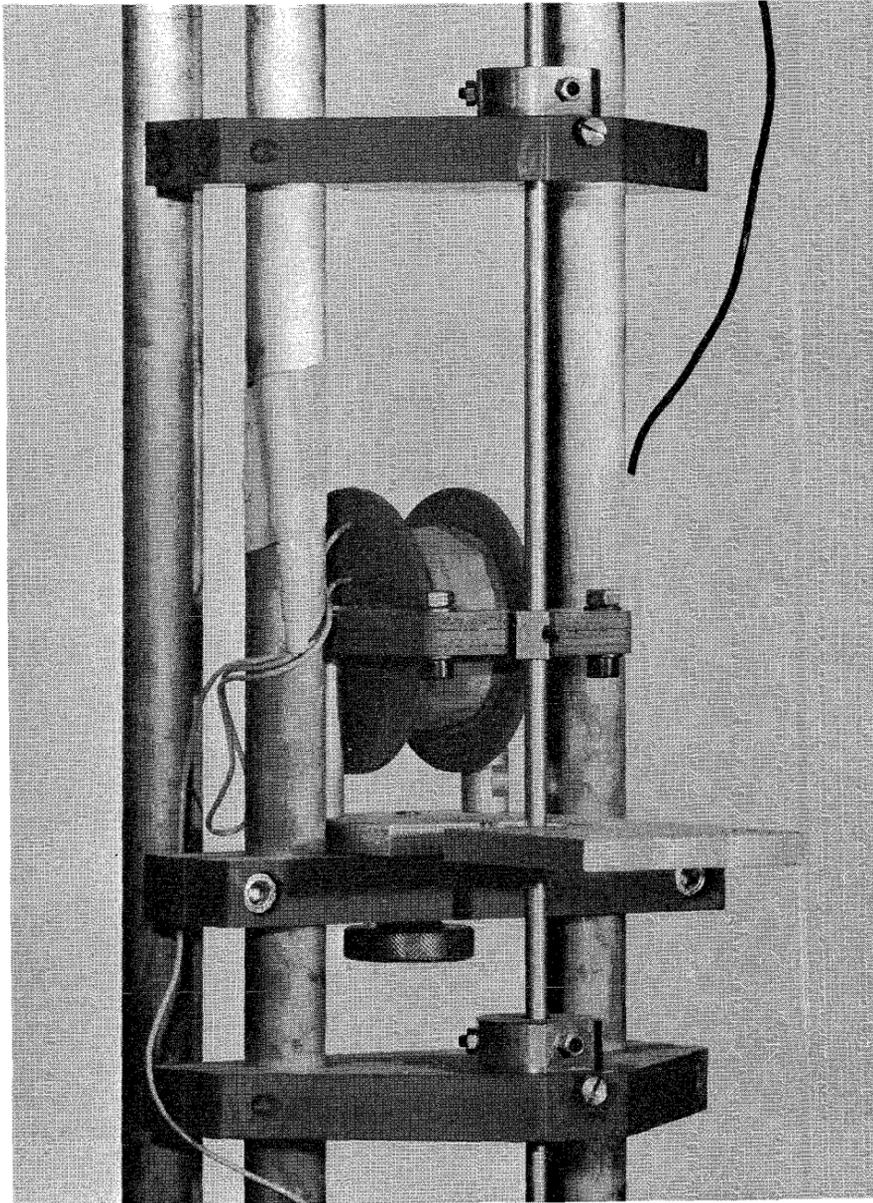


Bild 8: Ansicht von Erreger-Spule mit Anker
und Abstandshaltern

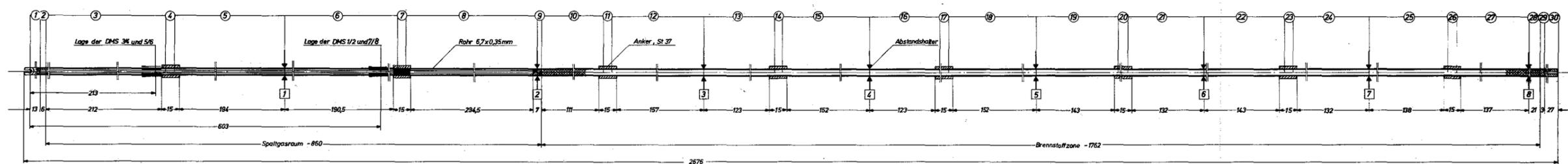


Bild 9: Feldeinteilung des Versuchstabes

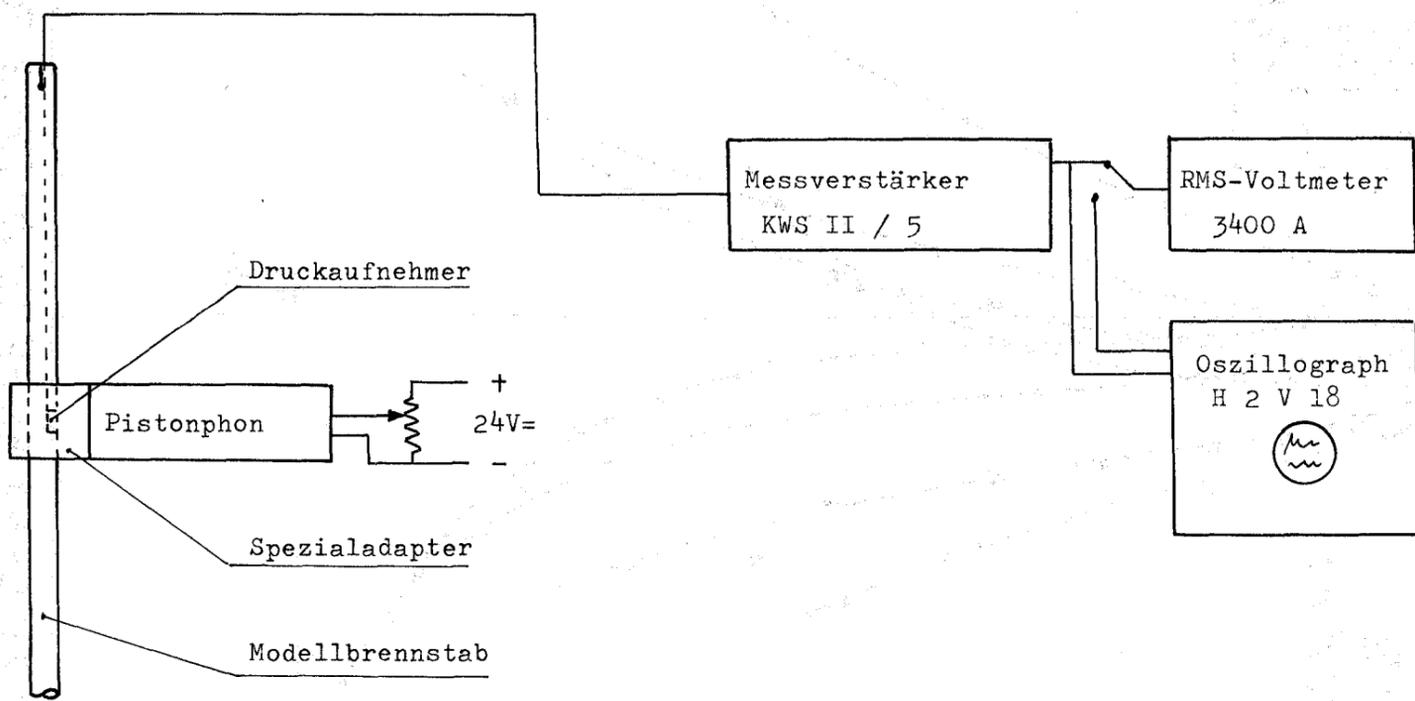


Bild 10: Schematische Darstellung der Messung der Frequenzgangfunktion der Druckaufnehmer.

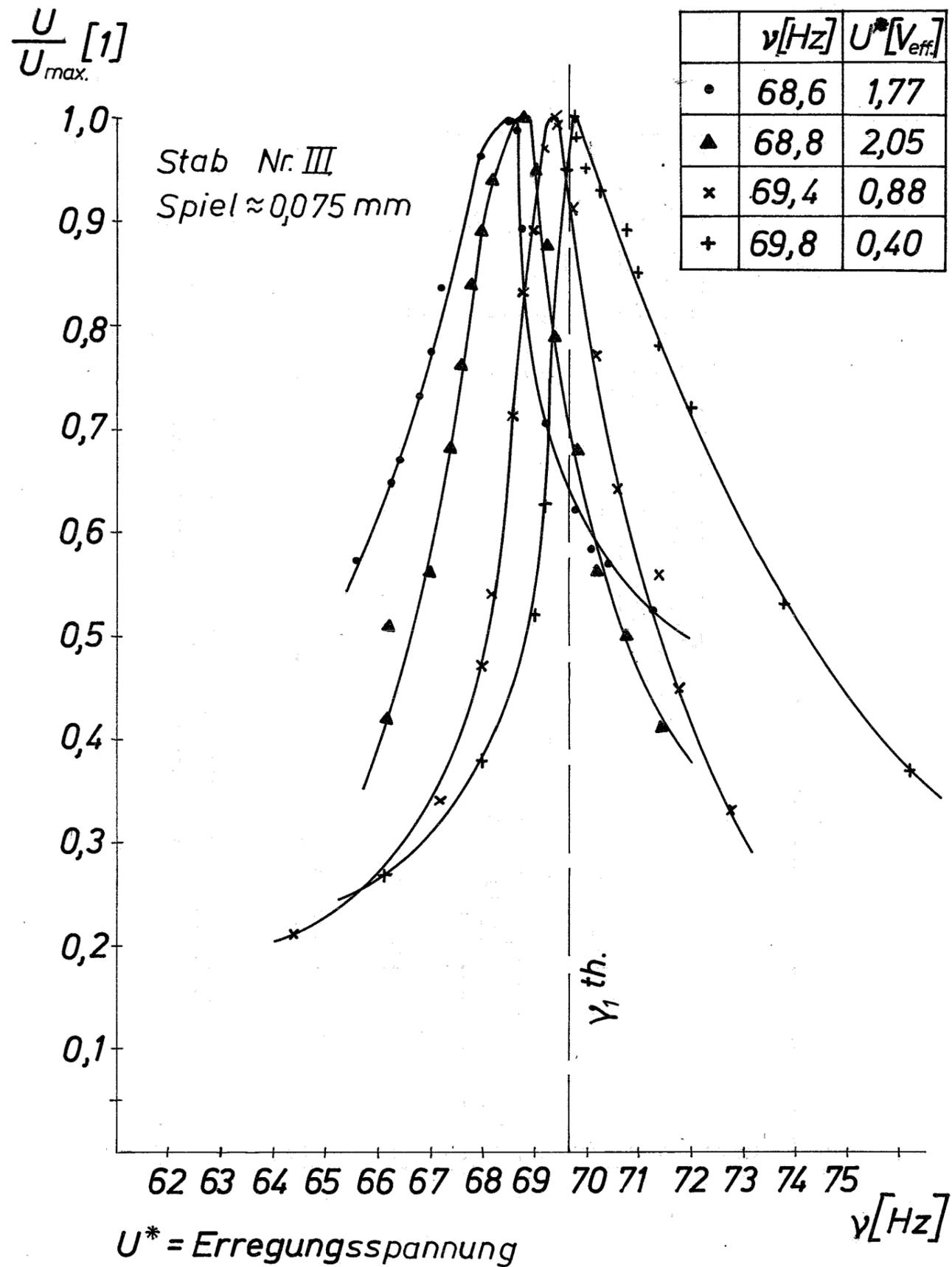


Bild 11: Experimentell ermittelte Resonanzkurven

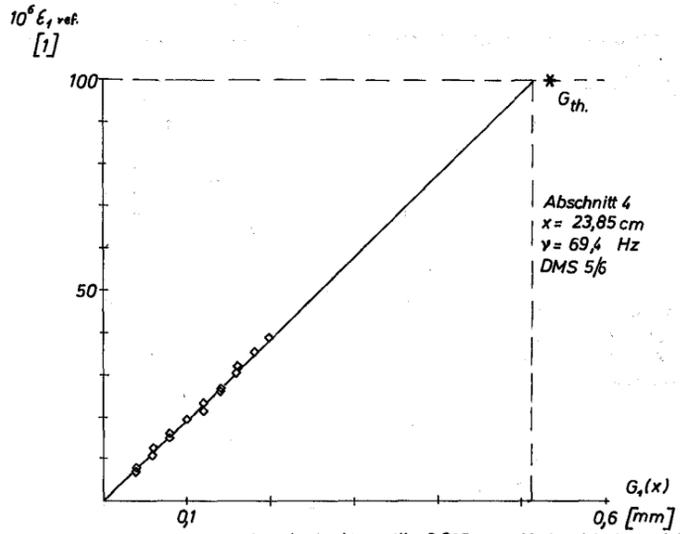


Bild 12a: Messung der Auslenkung für 0,025 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

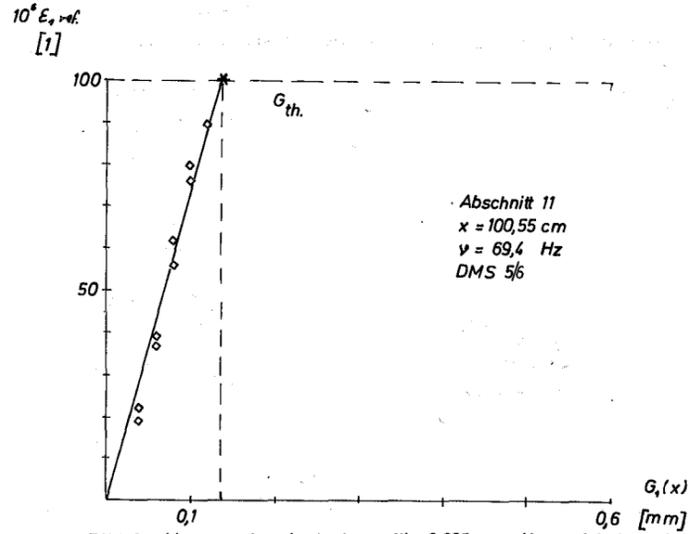


Bild 12c: Messung der Auslenkung für 0,025 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

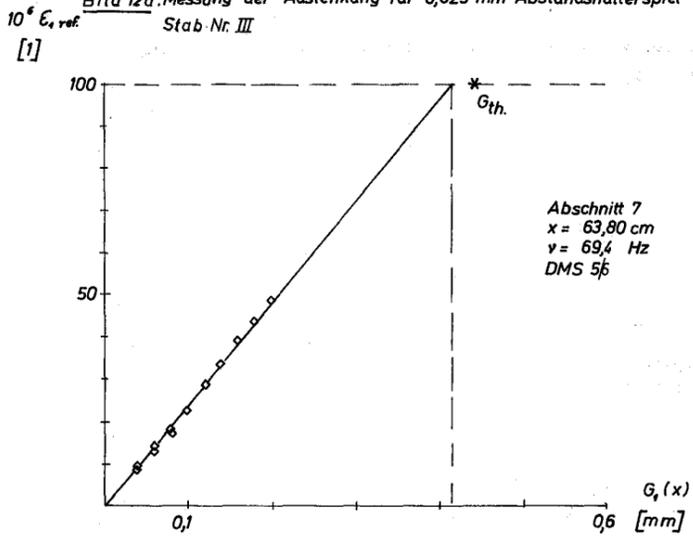


Bild 12b: Messung der Auslenkung für 0,025 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

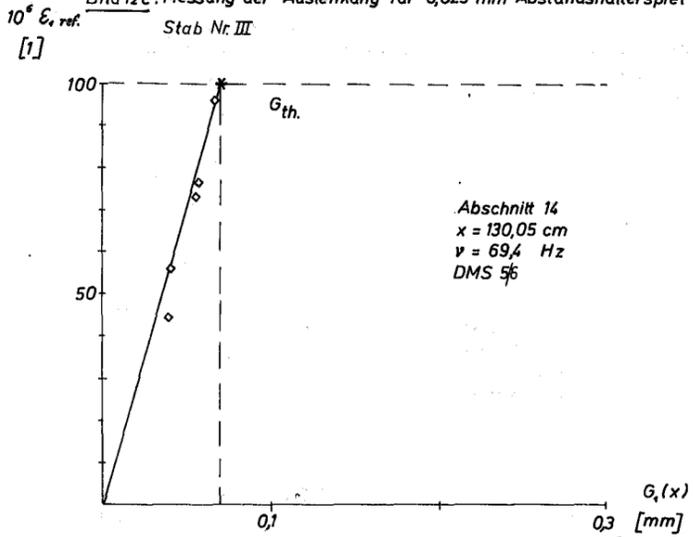


Bild 12d: Messung der Auslenkung für 0,025 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

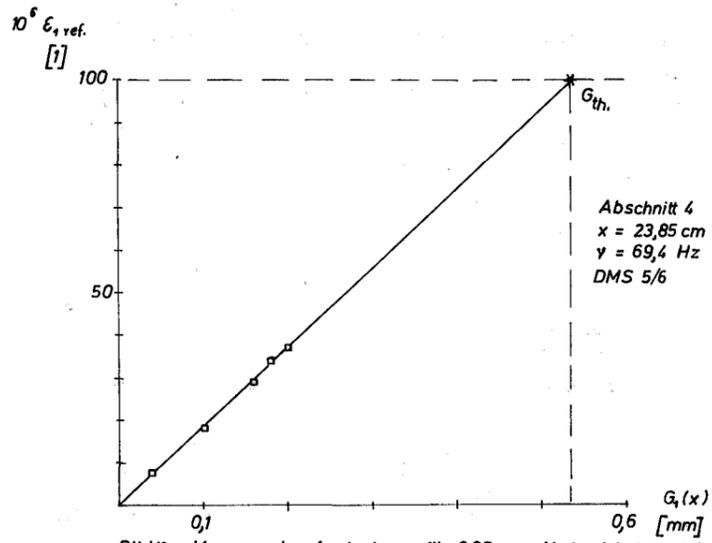


Bild13a: Messung der Auslenkung für 0,05 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

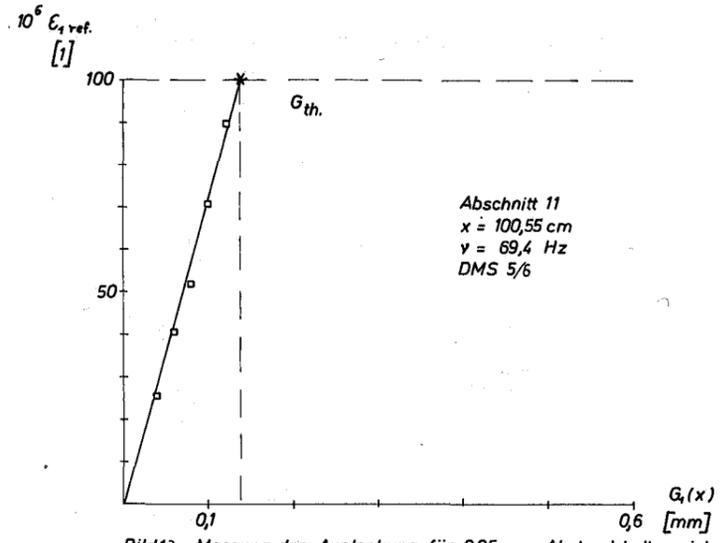


Bild13c: Messung der Auslenkung für 0,05 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

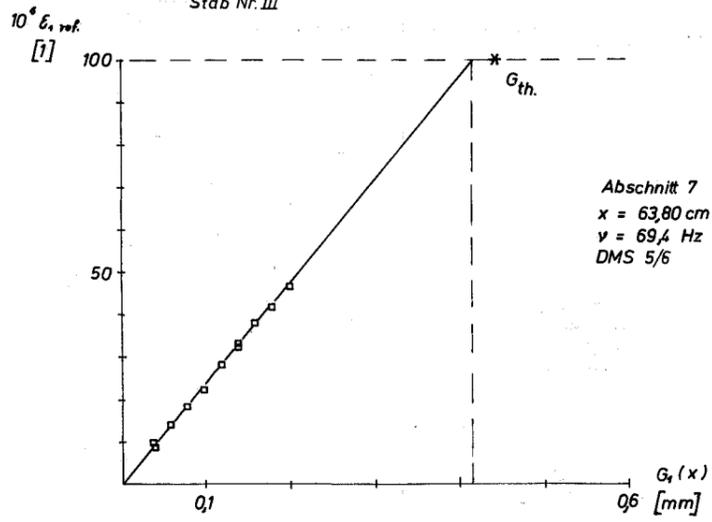


Bild13b: Messung der Auslenkung für 0,05 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

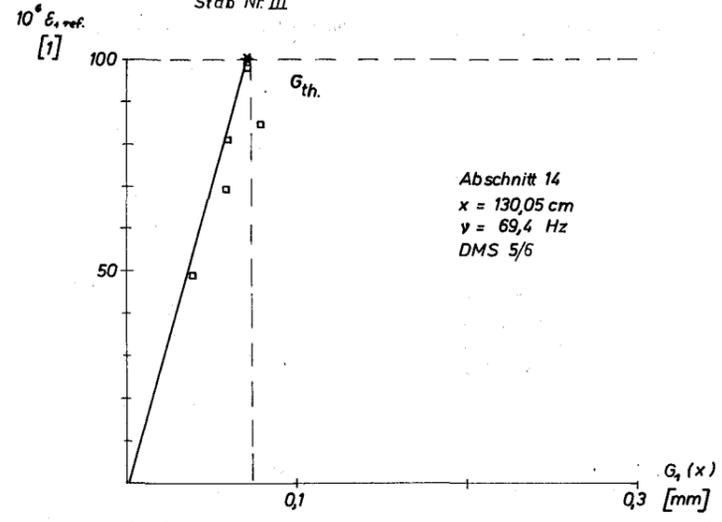


Bild13d: Messung der Auslenkung für 0,05 mm Abstandshalterspiel
Stab Nr. III

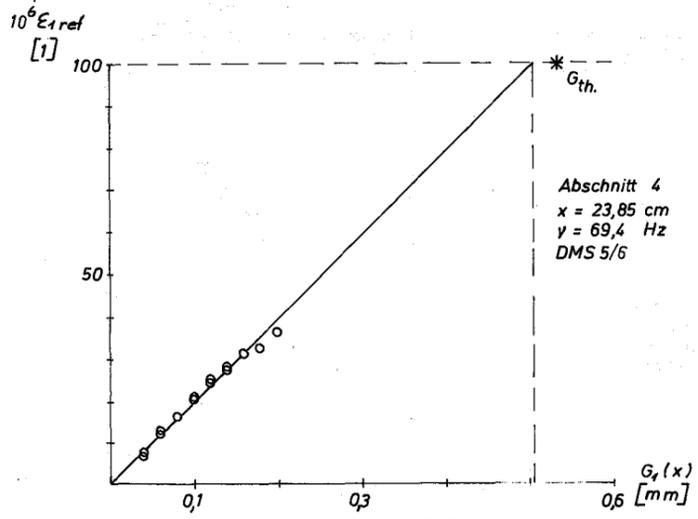


Bild 14 a: Messung der Auslenkung für 0,075 mm Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

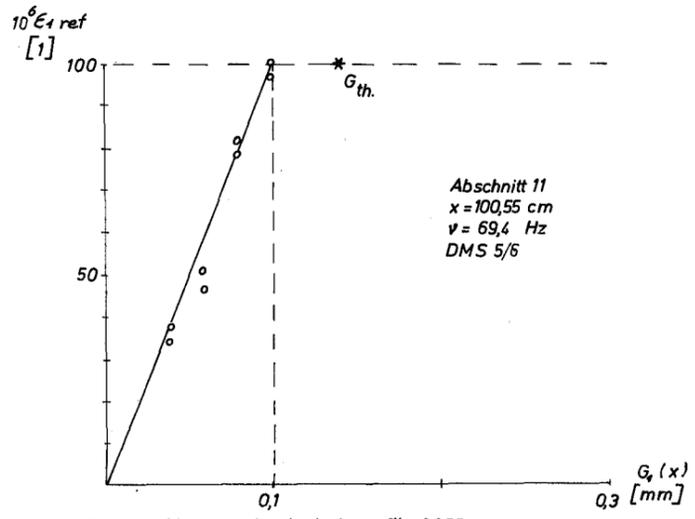


Bild 14 c: Messung der Auslenkung für 0,075 mm Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

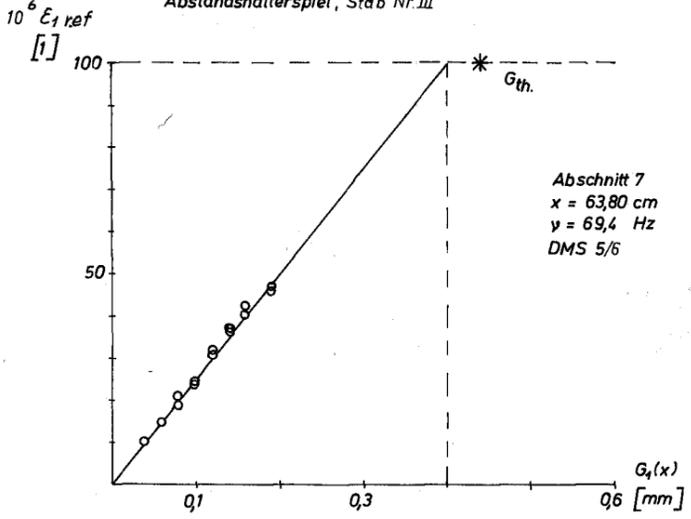


Bild 14 b: Messung der Auslenkung für 0,075 mm Abstandshalterspiel Stab, Nr. III

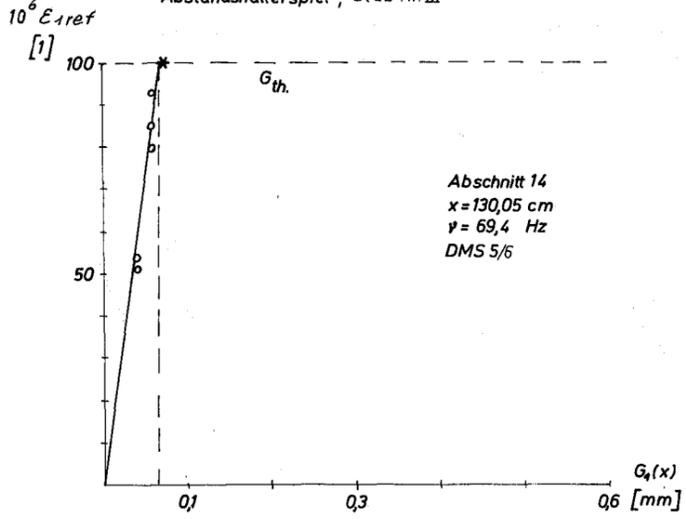
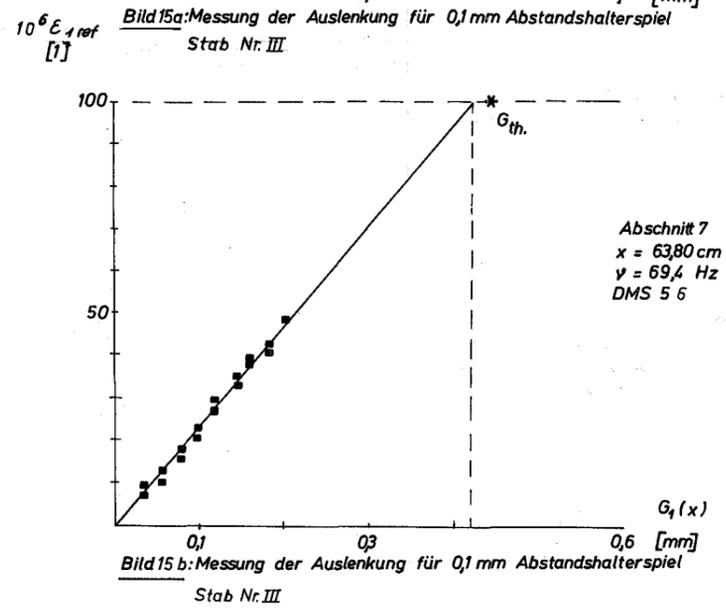
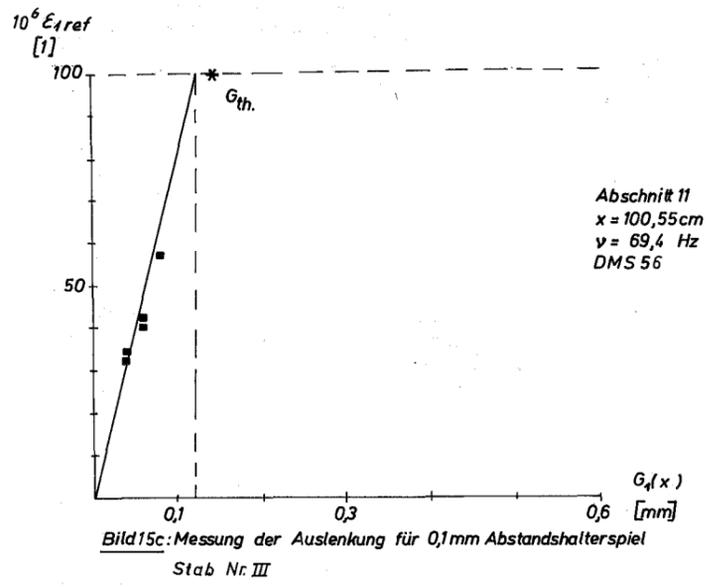
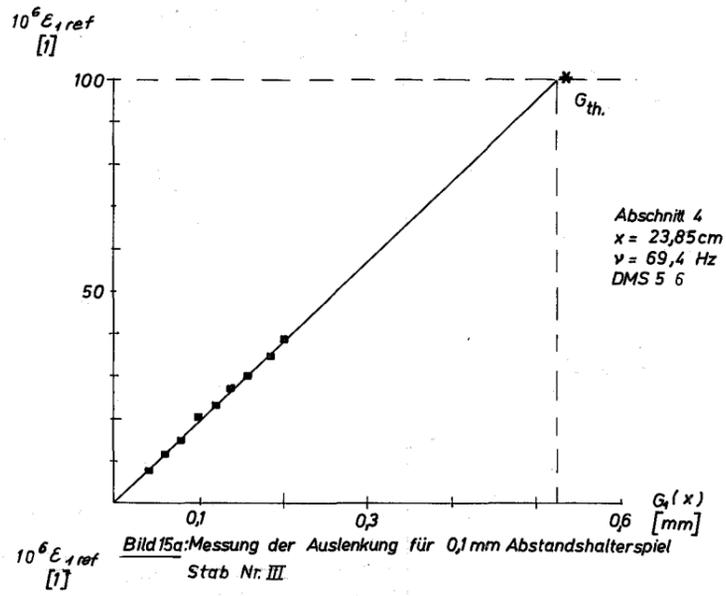
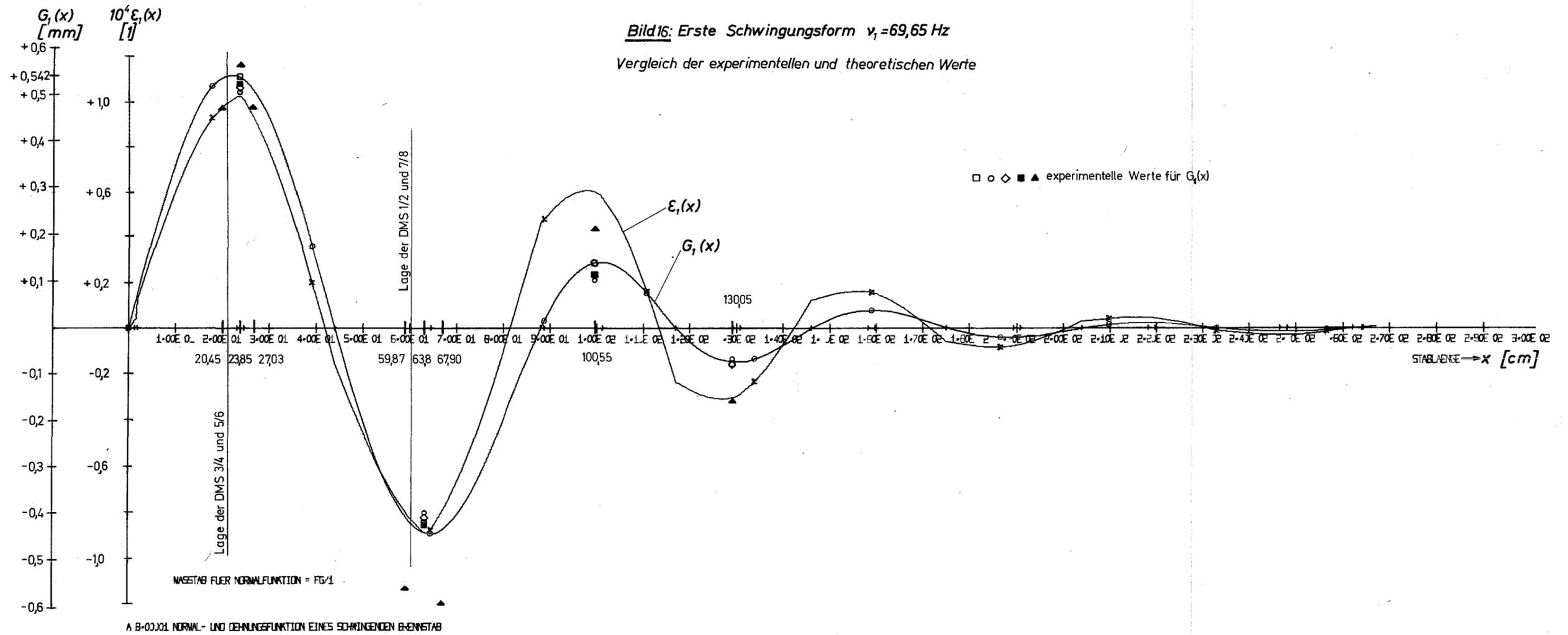


Bild 14 d: Messung der Auslenkung für 0,075 mm Abstandshalterspiel Stab, Nr. III





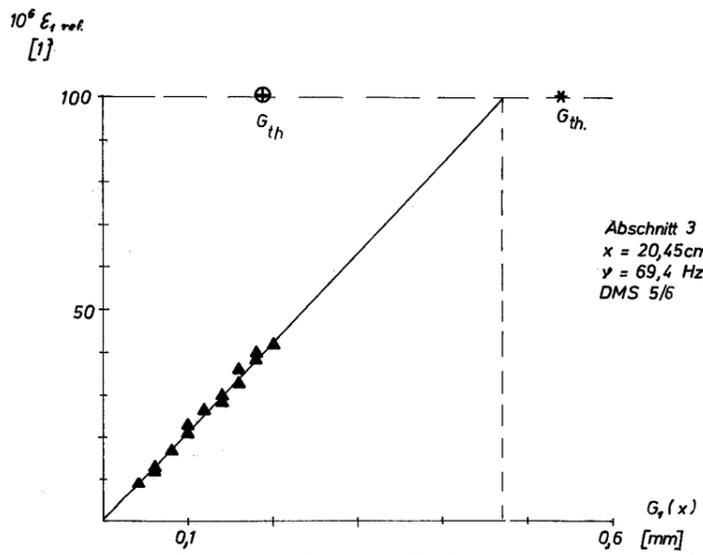


Bild17a: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

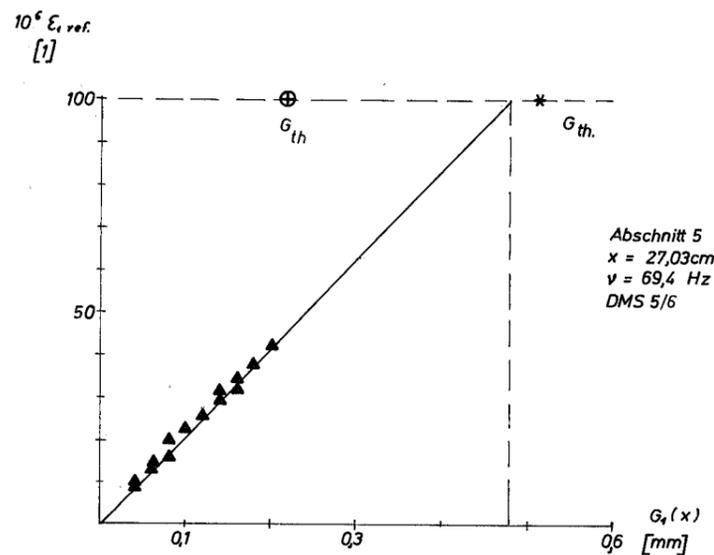


Bild17c: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

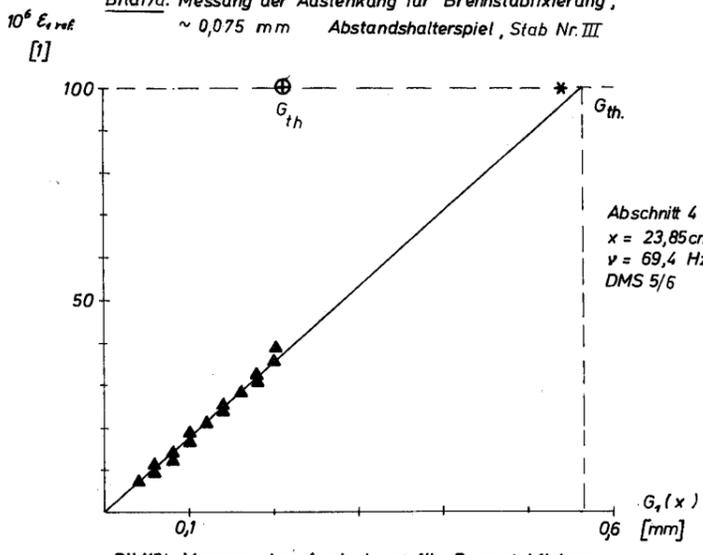


Bild17b: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

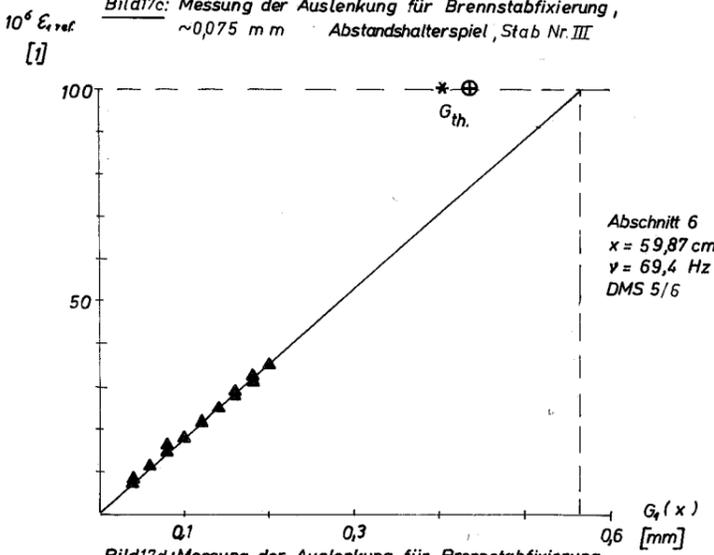


Bild17d: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

$10^6 \epsilon_{1,ref}$
[1]

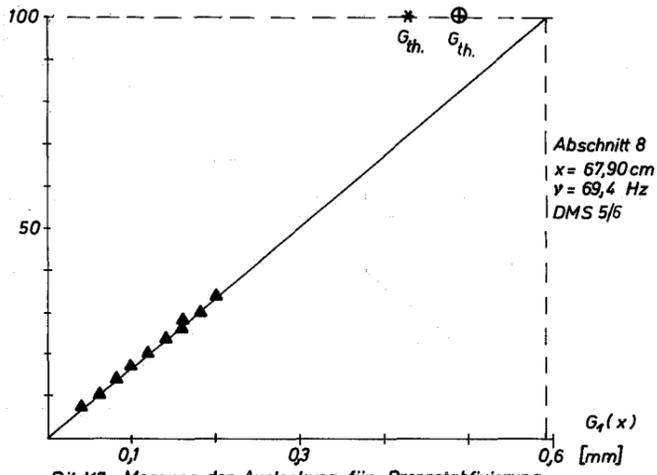


Bild17e: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

$10^6 \epsilon_{1,ref}$
[1]

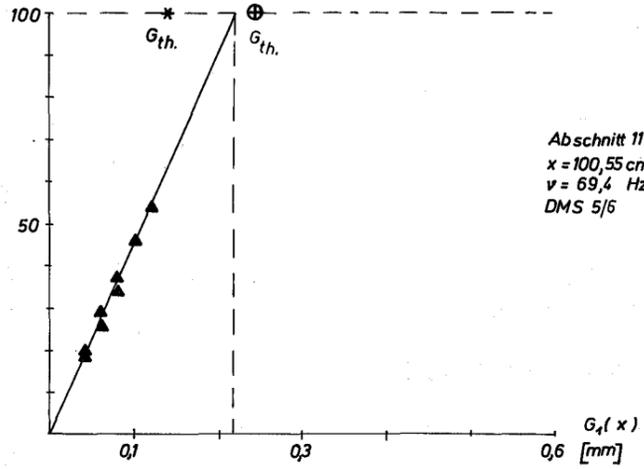


Bild17f: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

$10^6 \epsilon_{1,ref}$
[1]

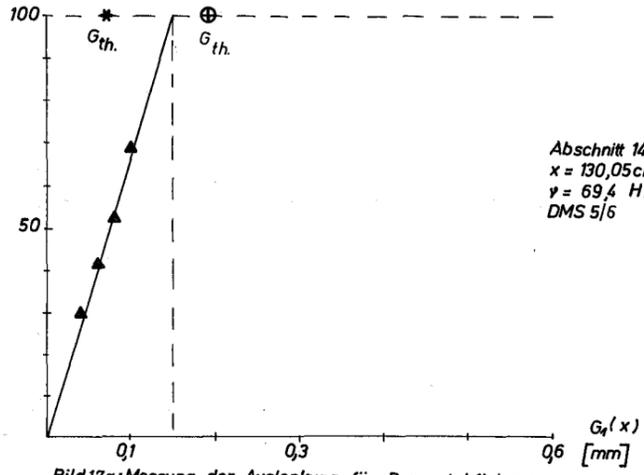


Bild17g: Messung der Auslenkung für Brennstabfixierung,
 $\sim 0,075 \text{ mm}$ Abstandshalterspiel, Stab Nr. III

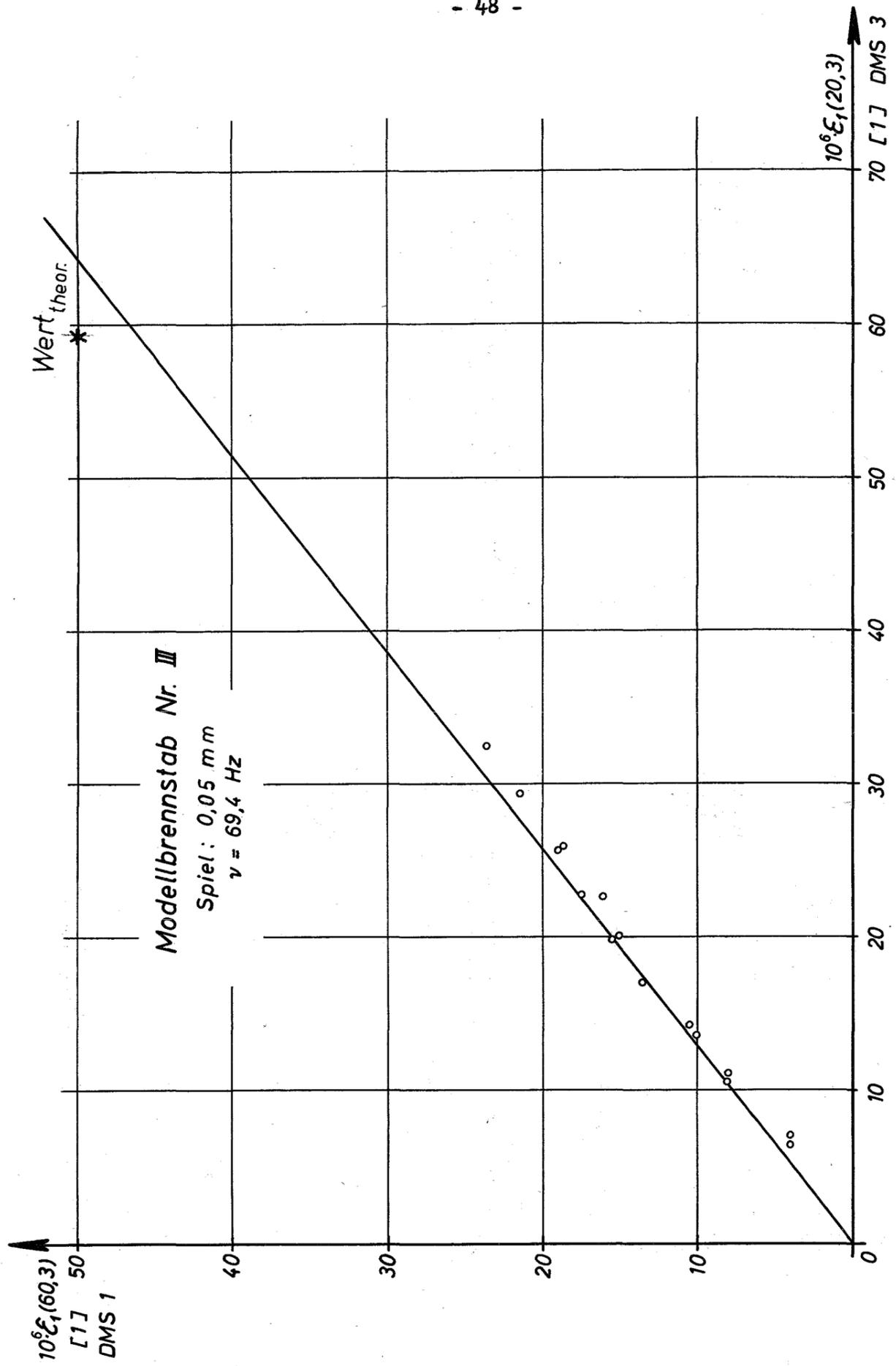


Bild 18: Verifizierung von $\epsilon_1(x)$

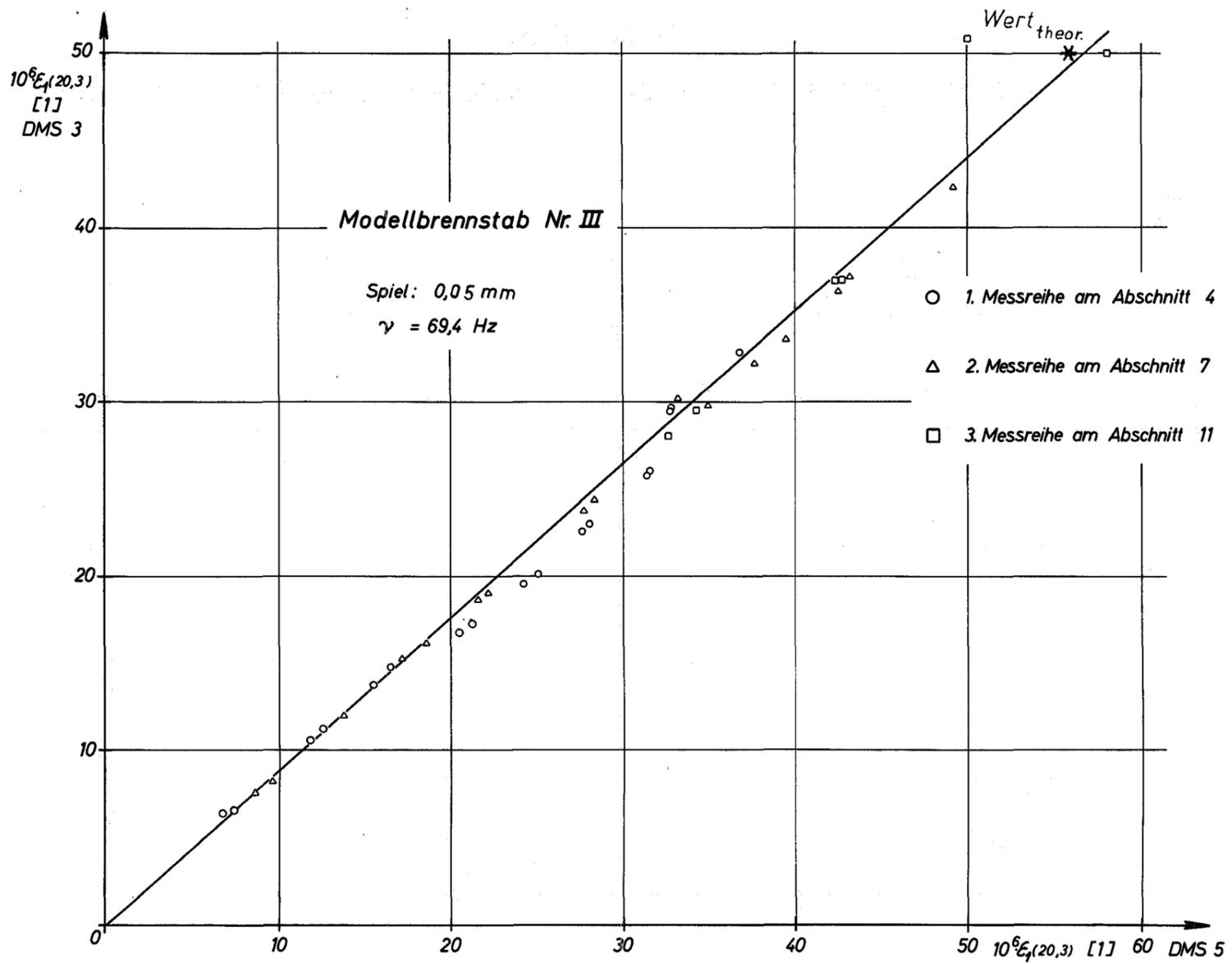


Bild 19: Überprüfung der Dehnungsaufnahme mit innen und außen appliziertem DMS

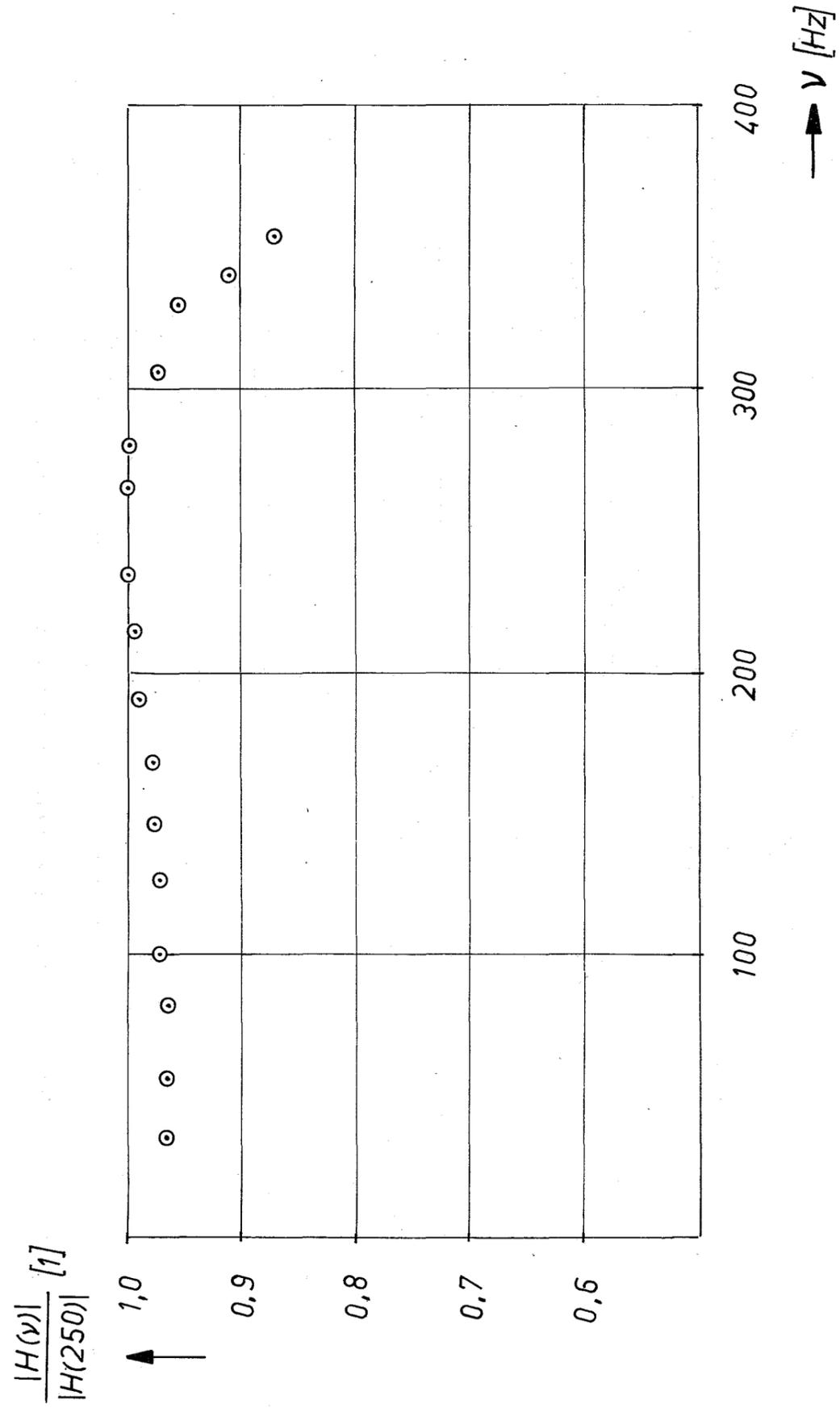


Bild 20: Frequenzgangfunktion des Druckaufnehmers
im Stab Nr. III

VERSUCHSMODELL

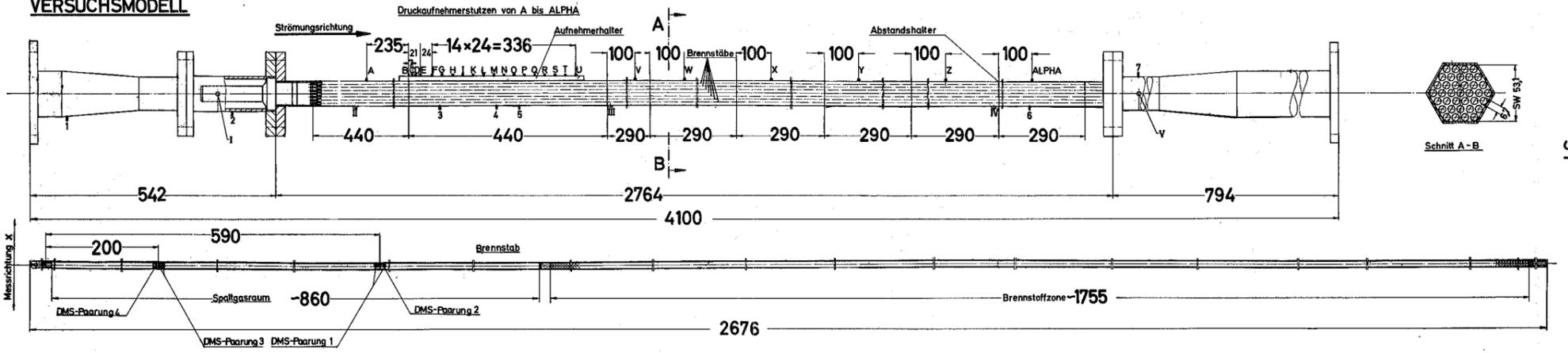


Bild A1 : Instrumentierungsplan des Na 1/2-Versuchsmodells

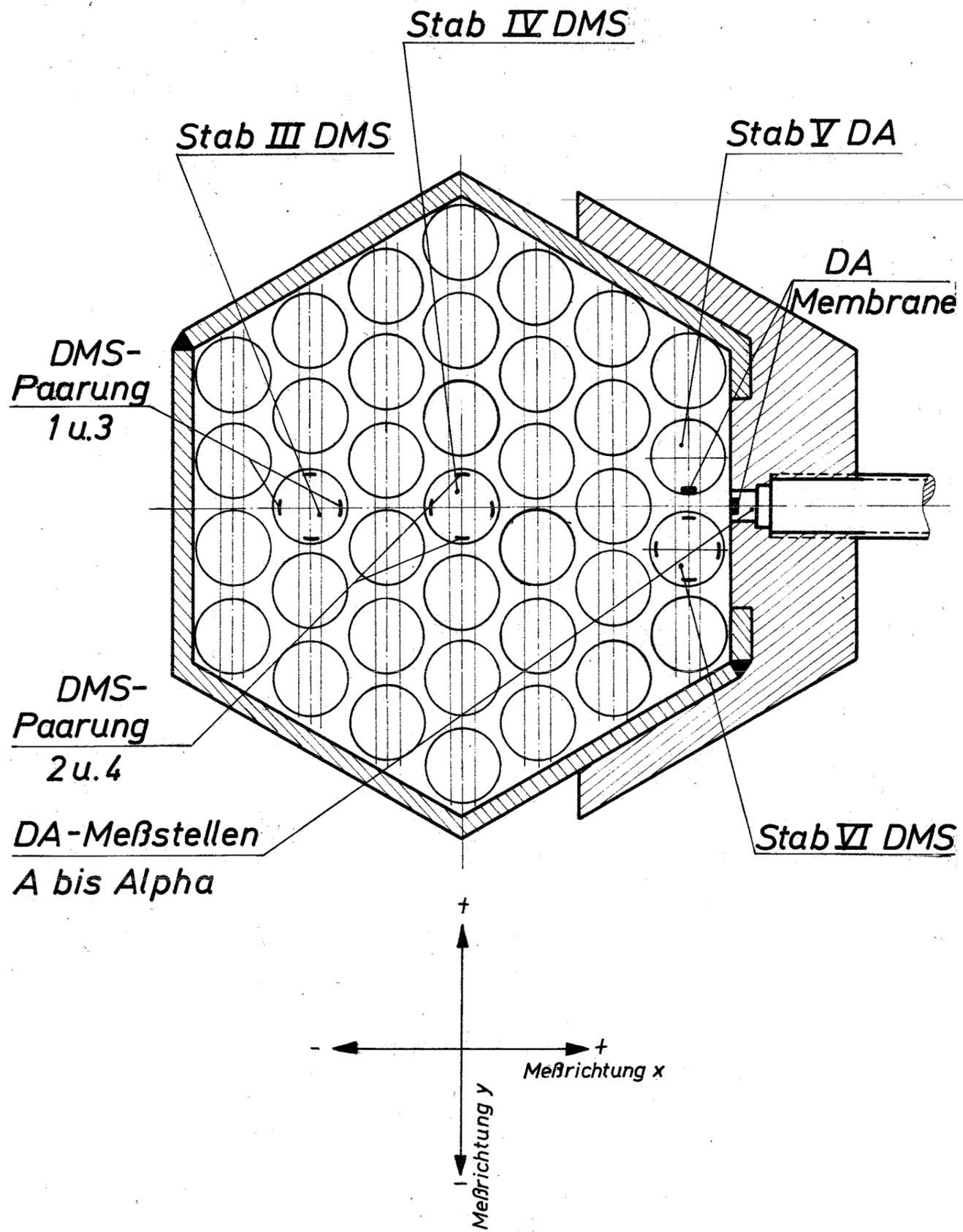


Bild A 2: Positionsplan der DMS-Paarungen und der Druckaufnehmer

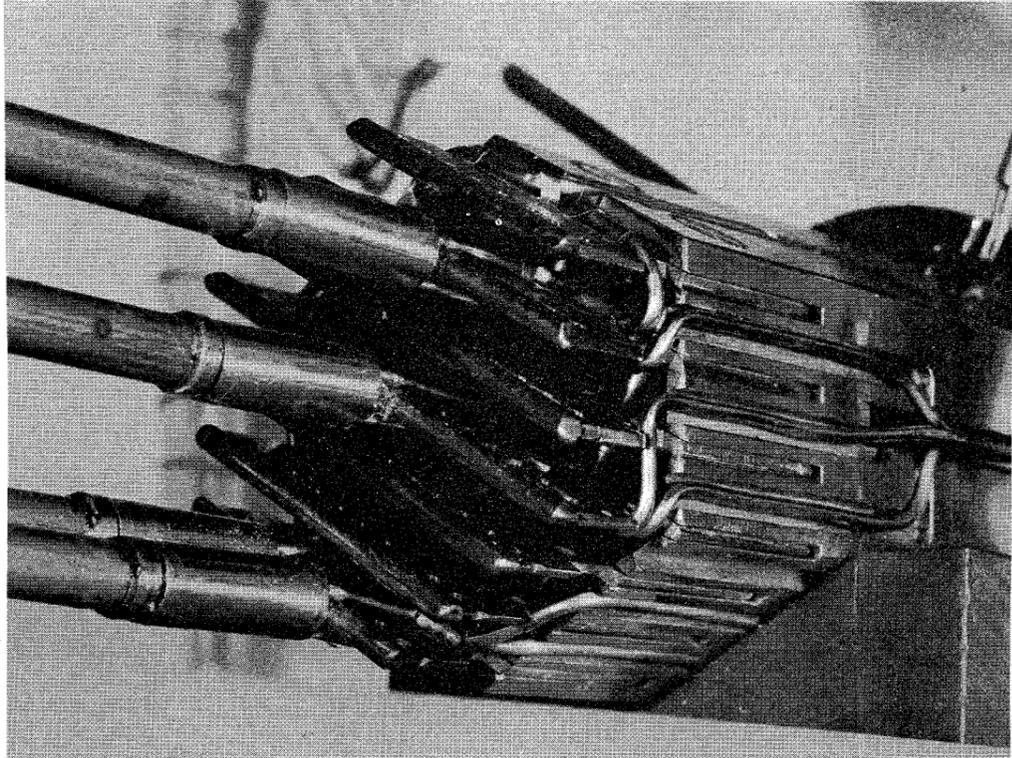


Bild A 3: Einbau instrumentierter Modellbrennstäbe für das Na 1/2 - Versuchsmodell

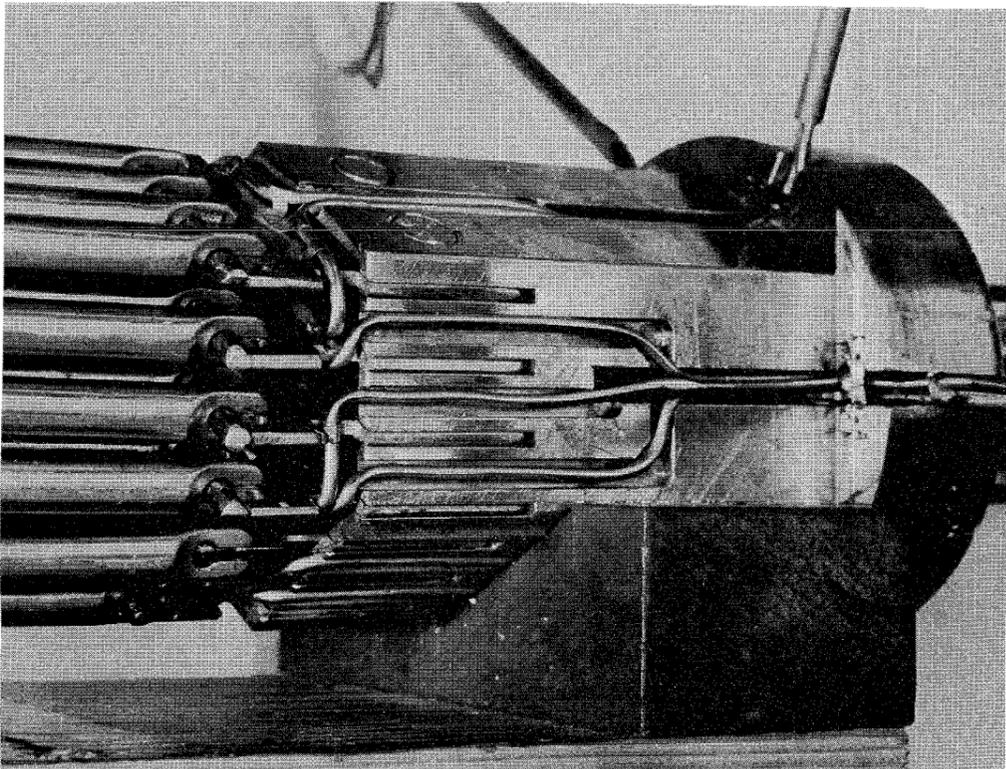


Bild A 4: Zusammenbau des Brennstabbündels für das Na 1/2 - Versuchsmodell

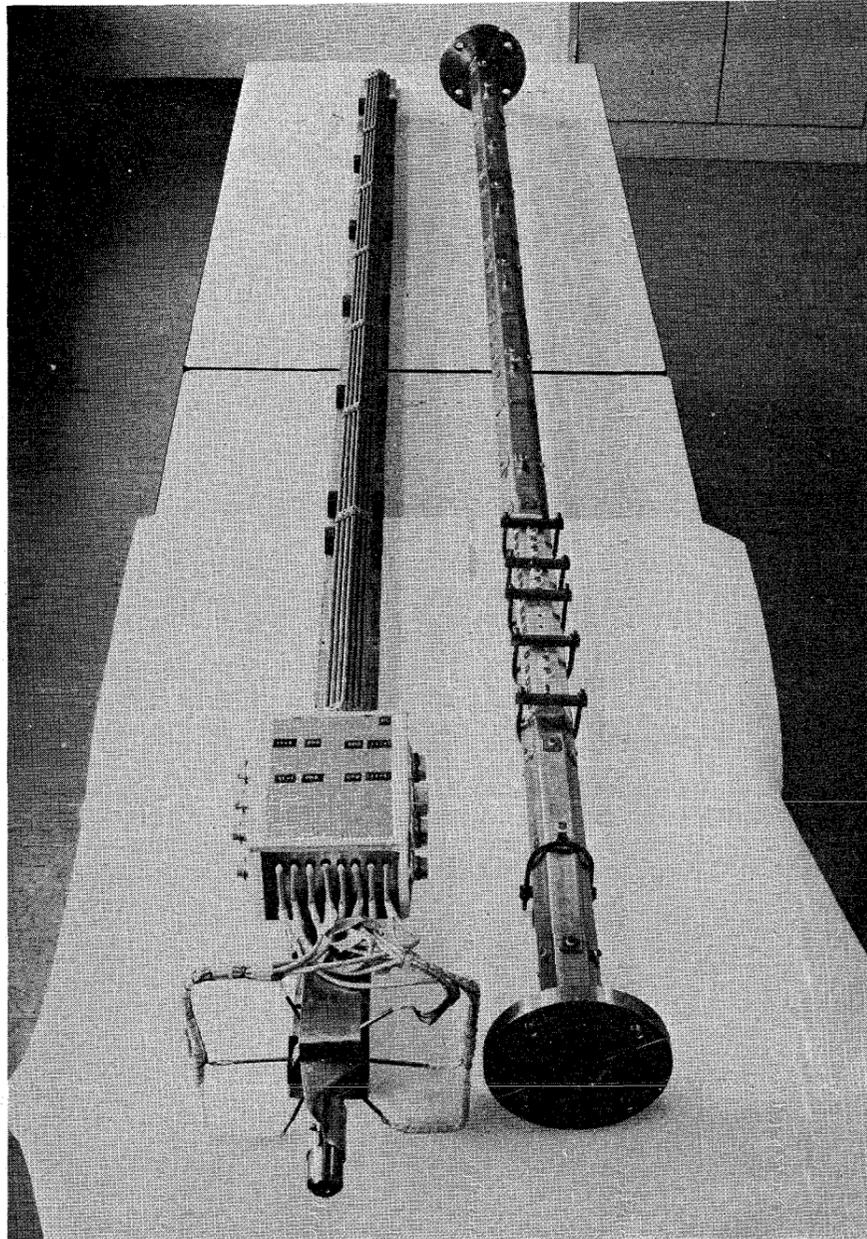


Bild A 5: Na 1/2 - Versuchsmodell