

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

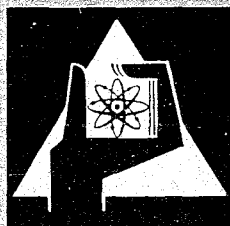
Januar 1969

KFK 923
EUR 3977 d

Institut für Reaktorentwicklung

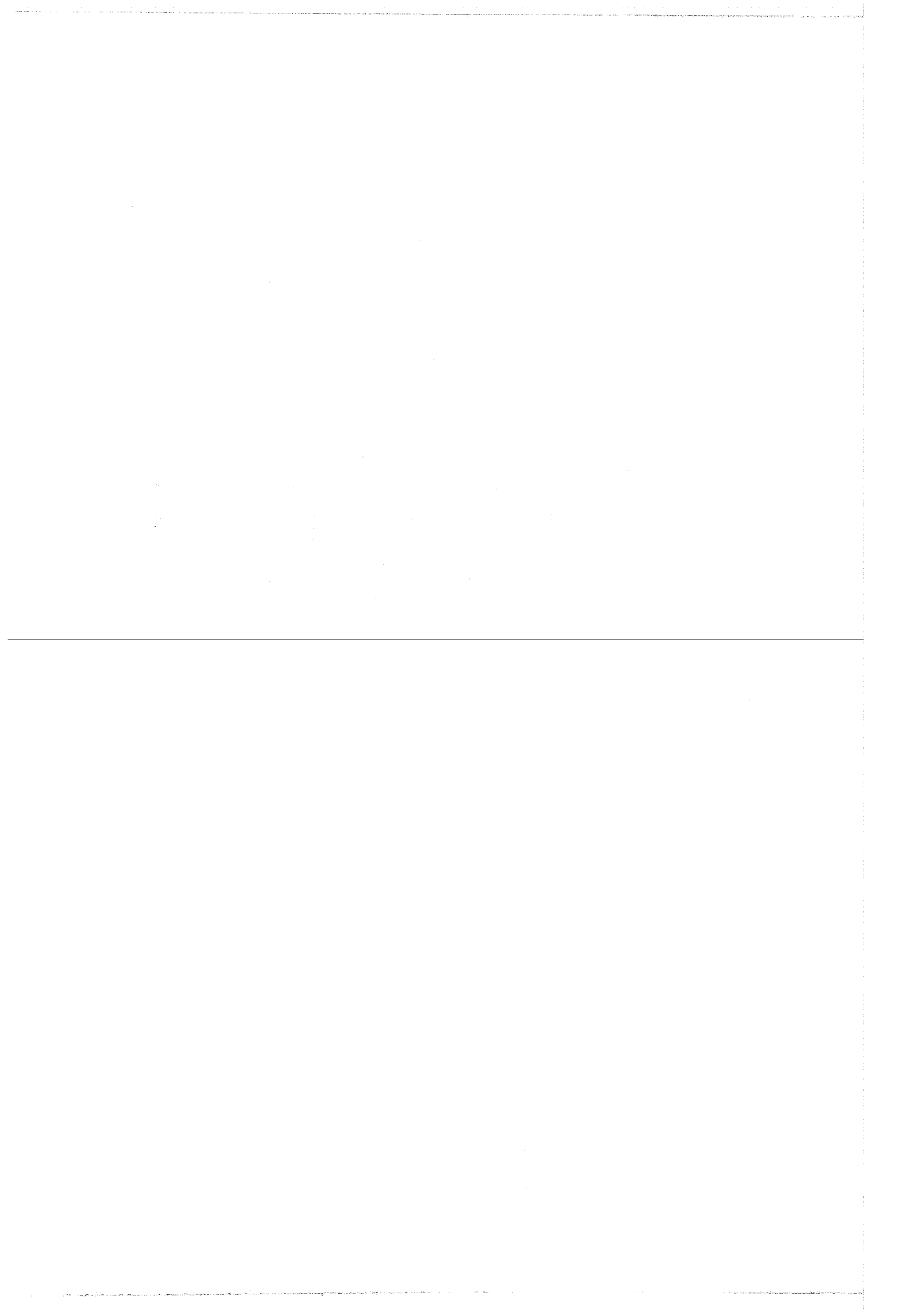
Untersuchungen der Eigenfrequenzen, der Normal- und
der Dehnungsfunktionen, sowie der Dämpfung des
querschwingenden Brennstabes der Na 1-Studie

K. D. Appelt, J. Kadlec



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1969

KFK 923

EUR 3977 d

Institut für Reaktorentwicklung

Untersuchungen der Eigenfrequenzen, der Normal-
und der Dehnungsfunktionen, sowie der Dämpfung
des querschwingenden Brennstabes der Na 1-Studie *)

K.D.Appelt

J. Kadlec

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

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

Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorbemerkung	
1. Einleitung	1
2. Theoretische Untersuchungen	3
2.1 Berechnungsvariante I	
2.2 Berechnungsvariante II	
2.3 Berechnungsvariante III	
3. Experimentelle Untersuchungen	6
3.1 Versuchsaufbau	
3.2 Messung der Normal- und der Dehnungsfunktion	
3.2.1 Abstandshalter Type I	
3.2.2 Abstandshalter Type II	
3.2.3 Abstandshalter Type III	
 3.3 Messung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung	
 3.3.1 Abstandshalter Type I	
 3.3.2 Abstandshalter Type II	
 3.3.3 Abstandshalter Type III	
4. Schlußfolgerungen	16
Literatur	18

V o r b e m e r k u n g

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen des querschwingenden Brennstabes (Na 1-Studie), welcher mit neun Abstandshaltern unterstützt ist, und mit der experimentellen Untersuchung der Dämpfung dieses Brennstabes in Luft und in Wasser. Die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenfunktionen wurden auf der Rechenanlage IBM 7074 berechnet; die realen Werte dieser Größen und die Dämpfung werden auf einer Versuchsanlage mit elektromagnetischer Schwingungserregung gemessen.

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

1.0 Einleitung

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich mit der theoretischen Bestimmung und der experimentellen Verifizierung der Eigenfrequenzen, der Normal- und der Dehnungsfunktionen, sowie auch mit der experimentellen Untersuchung der Dämpfung eines querschwingenden Brennstabes gemäß der Na 1-Studie [1]. Sie gehört zu den anderen Arbeiten aus dem Gebiet der durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungen an Brennstäben, welche im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt werden.

Die Eigenfrequenzen ν_j , die Normalfunktionen $G_j(x)$, die Dehnungsfunktionen $\varepsilon_j(x)$ und die Dämpfungsquotienten ξ_j eines im Brennstoffsubassembly montierten Brennstabes sind in der Arbeit [2] definiert und erklärt. Ihre Kenntnis ist notwendig für die Berechnung [2], Abschätzung [3] oder experimentelle Bestimmung des durch die hydrodynamische Kraftwirkung der Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes des Brennstabes im Subassembly. In dem letzten Sinn werden die in der vorgelegten Arbeit gewonnenen Resultate bei den weiteren Untersuchungen angewendet. Die Methode der theoretischen und der experimentellen Untersuchung der oben angeführten Größen und Funktionen, sowie auch die dafür benötigten Rechnungsverfahren und Versuchseinrichtungen, sind in den Arbeiten [4] und [5] beschrieben.

Untersucht wurde ein Originalbrennstab der Na 1-Studie [1] mit einem austenitischen Hüllrohr $6,7 \text{ } \varnothing \times 0,35$ und einvibriertem UO_2 -Brennstoff (Bild 1b). Der Brennstab wird in Übereinstimmung mit der Na 1-Studie an 9 Stellen mit Abstandshaltern unterstützt. Es wurden 3 Typen von Abstandshaltern benutzt (Bild 2). Der Abstandshalter Type I simuliert eine "ideale" freie Lagerung des Brennstabes laut den Forderungen des mathematischen Modells des Brennstabes nach [4] und [5]. Der Abstandshalter Type II entspricht dem Dreieckabstandshalter (weiter entwickelte Leiter-Type, Abstandshalter der Na 1-Studie); der Abstandshalter Type III entspricht dem Wabengitterabstandshalter der Na 2-Studie. Die Wabengitterabstandshalter werden auch bei den Messungen der durch die Wasserströmung hervorgerufenen Schwingungen des Brennstabes eines Modellsubassemblys mit 37 Modellstäben eingesetzt.

Die Resultate der Berechnung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen des Brennstabes enthält das Kapitel 2. Experimentelle Untersuchungen sind in Kapitel 3 beschrieben. Alle Resultate, sowie auch die aus der Untersuchung resultierenden Empfehlungen für weitere Arbeiten sind in Kapitel 4 kurz zusammengefaßt.

2.0 Theoretische Untersuchungen

Mit dem Rechnungsprogramm nach [4] wurde der Eigenschwingungszustand für drei Varianten des mathematischen Modells des Brennstabes durchgerechnet. In allen drei Fällen handelt es sich um identische Brennstäbe; wie weiter unten angeführt wird, wurden dabei unterschiedliche Massen betrachtet.

2.1 Berechnungsvariante I

In dieser Variante wurde die virtuelle Masse des Wassers berücksichtigt. Die Resultate dieser Rechnung werden bei der Auswertung der im Kapitel 1 erwähnten Messung angewendet. Da bei diesem Versuch die Schwingungen des Brennstabes in dem untersten Frequenzbereich zu erwarten sind, wurden die fünf ersten Schwingungsformen untersucht. Die berechneten Eigenfrequenzen ν_j , $j = 1, 2, \dots$, bilden die Reihe 69,2; 79,1; 96,3; 117,8; 139,7;.....Hz.

Die entsprechenden Eigenfunktionen sind auf den Diagrammen 3 bis 7 aufgezeichnet. Bei visueller Betrachtung dieser Diagramme fallen zwei Besonderheiten auf:

- 1) Die erste Schwingungsform (Bild 4) hat eine Tendenz zu "divergieren". Diese Erscheinung ist durch die Auswirkung folgender zwei Inhomogenitäten am unteren Ende des Brennstabes verursacht: Zum ersten durch zwei in kurzem Abstand hintereinander folgende Auflagerungen (Aufhängung des Brennstabes im Subassemblyfußstück und erster Abstandshalter, Bild 1b); zum zweiten durch herabgesetzte Masse (Spaltgasraum). Eine solche "divergente" Schwingungsform ist unzulässig, da sie eine erhöhte Beanspruchung des Brennstabes im Bereich seiner höchsten Betriebstemperatur zur Folge hat.
- 2) An den Berührungsstellen des Brennstabes mit den Abstandshaltern im Bereich der höchsten Betriebstemperatur des Brennstabes treten bei den höheren Schwingungsformen Biegespannungsspitzen auf (Bild 4, $x = 196,5$ cm; Bild 5 bis 7, $x = 228,5$ cm). Soweit bei

dem Betrieb des Reaktors die höheren Schwingungsformen zur Geltung kommen, werden an den gefährdeten Stellen vorzeitig Ermüdungsrisse entstehen.

Bei einem rationellen Subassemblyentwurf sollten diese beiden Erscheinungen eliminiert werden. Durch eine zweckmäßige Anordnung der Abstandshalter kann man erreichen, daß die Schwingungsbeanspruchungen der einzelnen Abschnitte des Brennstabhüllrohres den auf den Betriebszustand bezogenen Ermüdungseigenschaften des Hüllrohrwerkstoffes angepaßt werden. Es ist allerdings schwierig, alle Biegespannungsspitzen von den Berührungsstellen des Brennstabes mit den Abstandshaltern zu vermeiden, da ihr Vorhandensein an diesen Stellen in der Natur der höheren Schwingungsformen liegt. Es kann aber verhindert werden, daß die Spannungsspitzen gerade im Bereich der höchsten Betriebstemperatur des Brennstabes auftreten.

Für die Abreibung des Hüllrohrwerkstoffes, sowie auch für die Ausschlagung der Abstandshalter, sind wiederum die Werte der maximalen Auslenkungen in den Abschnitten zwischen den Abstandshaltern von besonderem Interesse. Aus den Diagrammen 3 - 7 folgt, daß die höchsten Werte der Auslenkungen an den Stellen $x = 212,5$ und $x = 244,5$ zu erwarten sind.

Für die Untersuchung der gemessenen Spektraldichten sind also vier Stellen am meisten interessant: $x = 196,5$ und $x = 228,5$ für die Spektraldichte der relativen Dehnungen; $x = 215,5$ und $x = 244,5$ für die Spektraldichte der Auslenkungen. Die für diese Umrechnung benötigten Werte der Normalfunktion $G_j(x)$ und der Dehnungsfunktion $\epsilon_j(x)$ für die fünf ersten Schwingungsformen des Brennstabes sind in folgender Tabelle aufgeführt:

j	$G_j(215,5)$ [cm]	$G_j(244,5)$ [cm]	$\mathcal{E}_j(196,5)$ [1]	$\mathcal{E}_j(228,5)$ [1]
1	$-2.850 \cdot 10^{-2}$	$3.220 \cdot 10^{-2}$	$1.450 \cdot 10^{-6}$	$-1.017 \cdot 10^{-6}$
2	$1.025 \cdot 10^{-2}$	$-2.885 \cdot 10^{-2}$	$-7.450 \cdot 10^{-5}$	$5.730 \cdot 10^{-5}$
3	$1.440 \cdot 10^{-2}$	$2.365 \cdot 10^{-2}$	$5.660 \cdot 10^{-5}$	$-1.262 \cdot 10^{-4}$
4	$-3.230 \cdot 10^{-2}$	$-1.800 \cdot 10^{-2}$	$1.171 \cdot 10^{-4}$	$1.855 \cdot 10^{-4}$
5	$3.830 \cdot 10^{-2}$	$1.325 \cdot 10^{-2}$	$-3.430 \cdot 10^{-4}$	$-2.160 \cdot 10^{-4}$

Alle diese Werte, sowie auch die Kurven auf den Diagrammen 4 bis 7, sind auf den Wert der Referenzdehnung $\mathcal{E}_{\text{ref}} = 100 \cdot 10^{-6}$ normiert.

2.2 Berechnungsvariante II

In dieser Variante wurde die Masse der Anker, aber keine virtuelle Masse des Wassers berücksichtigt. Die berechneten Werte werden in Kapitel 3 mit den Resultaten der Messung verglichen. Die berechneten Eigenfrequenzen sind $\nu_1 = 70,8$ Hz; $\nu_2 = 81$ Hz; $\nu_3 = 98,7$ Hz. Die berechnete Normalfunktion $G_1(x)$ und Dehnungsfunktion $\mathcal{E}_1(x)$ sind auf dem Diagramm 1a aufgezeichnet.

2.3 Berechnungsvariante III

In dieser Variante wurde sowohl die Masse der Anker, als auch die virtuelle Masse des Wassers berücksichtigt. Die Resultate dieser Rechnung wurden nur als Orientierungswerte für die Messung und Auswertung der Resonanzkurven (Kapitel 3.3) benutzt. Die berechneten Eigenfrequenzen sind $\nu_1 = 67,4$ Hz; $\nu_2 = 76,9$ Hz.

3.0 Experimentelle Untersuchungen

Um die Richtigkeit der Ansätze, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, überprüfen zu können [4, 5] wurde der fundamentale Schwingungszustand des Brennstabes ausführlich durchgemessen.

Die Messung der Normalfunktion $G_1(x)$ und der Dehnungsfunktion $\mathcal{E}_1(x)$ erfolgte der Einfachheit halber ausschließlich in der Luft (Berechnungsvariante II, Bild 1a). Dabei wurde angenommen, daß die bei dieser Messung festgestellten Abweichungen der Meßresultate von der Rechnung auch für den Fall des Brennstabes mit virtueller Masse des Wassers (aber ohne Masse der Anker) zu erwarten sind. Die Berechtigung dieser Annahme zeigen experimentelle Ergebnisse aus anderen Gebieten der Schwingungstechnik [7], nach denen die auf Vakuum und auf Wasser bezogenen Schwingungsformen der Maschinenbauteile übereinstimmen.

Da im Falle eines Brennstabes seine Masse im Vergleich mit der virtuellen Masse des Wassers viel größer ist, kann man also umso mehr erwarten, daß auch hier das oben genannte Ergebnis seine Gültigkeit behält. Die Resultate der Berechnungen führen in gleiche Richtung. Der Vergleich der Diagramme für $G_1(x)$ und $\mathcal{E}_1(x)$ von allen drei Berechnungsvarianten ergab, daß alle drei Schwingungsformen vollkommen identisch sind. Dieses Ergebnis zeigt auf eine sehr gute Stabilität der Schwingungsformen des Brennstabes in bezug auf kleine Massenänderungen. Damit wird bestätigt, daß die bei der Messung in Luft gewonnenen Eigenschwingungsformen des Brennstabes auch auf seinen Eigenschwingungszustand im Wasser völlig übertragbar sind.

Die Messung der Dämpfung des Brennstabes wurde sowohl in der Luft (Berechnungsvariante II,) als auch im Wasser (Berechnungsvariante III) durchgeführt.

3.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Messungen wurde die in der Arbeit [5] beschriebene Versuchsanlage mit elektromagnetischer Schwingungserregung benutzt. Um einen besseren Wirkungsgrad der Schwingungserregung erreichen zu können, hat man neue Elektromagnete mit geschlossenem Kern (Bild 8) eingesetzt. Die Spulen dieser Elektromagnete sind aus 0,9 mm dickem Kupferdraht gewickelt; der Kern aus 0,4 mm dicken Transformatorblechen hat die Abmessungen 82 x 75 mm außen und 47 x 40 mm innen; die Höhe des Kernpakets beträgt 15 mm. Äußere Abmessungen der Spulen sind 118 \varnothing x 40 mm. Die Windungszahlen und die Werte des Ohmschen Widerstandes der Spulen sind in der Tabelle 1 angeführt. Für Isolierung der Spulen gegen Wassereinwirkung wurde Araldit D benutzt. Die Anker aus dem Stahl St 37 haben die Abmessungen 8 x 8 x 15 mm. Die Anlage hat sich für die Versuche in Luft, als auch im Wasser, sehr gut bewährt.

Zur Aufnahme der relativen Dehnungen wurden in den meisten Fällen Dehnungsmeßstreifen Type PLS-10 der Fa. Tokyo Kenkyujo benutzt. Für den zweiten Teil der Messungen mit den Abstandshaltern II und für alle weiteren Messungen mit den Abstandshaltern III wurde zur Aufnahme der Referenzdehnung ϵ_{ref} eine Paarung der gekapselten DMS Type SG-122-2A-3 der Fa. Mierodot im Abschnitt 29, $x=3,1$ cm (Bild 1b) an den Brennstab angepunktet. Dieser instrumentierte Brennstab wird auch für die im Kapitel 1 erwähnte Messung der Brennstabschwingung im strömenden Wasser eingesetzt werden. Die Amplitude der Auslenkungen wurde in den meisten Fällen mit den Meßkeilen, teilweise auch mit den tastlosen induktiven Aufnehmern Type Tn 2-5 der Firma Hottinger-Baldwin, Meßtechnik, gemessen. Zur Kontrolle der Phase wurden zwei Paarungen von diesen Aufnehmern eingesetzt.

Für die Messung der Dämpfung des Brennstabes im stagnierenden Wasser wurde über das Gestell der Versuchseinrichtung eine Plexiglas-hülle von 30 mm \varnothing übergezogen. Einen Gesamtüberblick über die Versuchseinrichtung gibt Bild 9.

3.2 Messung der Normal- und der Dehnungsfunktion

Ziel dieser Messung war es, die Relation zwischen der Amplitude der Referenzdehnung $\mathcal{E}_{1\text{ref}}$ auf der einen Seite und der Amplitude der Auslenkung, (analytisch beschrieben durch die Normalfunktion $G_1(x)$), oder der Amplitude der relativen Dehnung (analytisch beschrieben durch die Dehnungsfunktion $\mathcal{E}_1(x)$) auf der anderen Seite, experimentell zu verifizieren.

Bei der Durchführung und bei der Auswertung dieser Messung wurde die in der Arbeit [5] beschriebene Methode angewendet. Die Koordinaten aller Meßstellen sind in den Tabellen 2-4 angegeben; die Abschnitte des Brennstabes sind auf Bild 1a mit den Ziffern ① bis ③₂ bezeichnet. Die Messung wurde mit allen drei Typen von Abstandshaltern durchgeführt.

Sowohl die der Messung zugrunde liegenden Eigenfunktionen $G_1(x)$ und $\mathcal{E}_1(x)$, als auch die Meßresultate für alle 3 Abstandshaltertypen sind auf dem Diagramm 1a aufgetragen. Als Resultat der Messung ergab sich:

1. der Verlauf der gemessenen Schwingungsform (Phase) stimmt mit der Rechnung völlig überein;
2. die Meßpunkte liegen mit kleiner Streuung an der berechneten Kurve.

Einige Einzelheiten sind in den nächsten Paragraphen angeführt.

3.2.1 Abstandshalter Type I

Die Messung mit diesen Abstandshalter wurde zeitlich als erste durchgeführt. Die Resultate (auf dem Bild 1a mit dem Symbol ▼ bezeichnet) sind in der Tabelle 2 zusammengefaßt und mit den berechneten Werten verglichen. Die Abweichungen der gemessenen von den berechneten Werten in den oberen vier Feldern des Brennstabes (Abschnitte 18 bis 29),

in denen die Amplitude der Auslenkung relativ groß ist, sind kleiner als 10%. Größere Abweichungen finden sich nur in den unteren Partien des Brennstabes, wo allerdings die Auslenkungen schon relativ klein sind, was die Streuung der Meßwerte ungünstig beeinflusst.

Die Messung erfolgt in zwei Teilen. Der erste Teil fand nach der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Messung der Resonanzkurven statt. Das dabei entstandene und während der Messung sich ständig vergrößernde Spiel in den Abstandshaltern hat eine schlechte Reproduzierbarkeit der Meßdaten verursacht. Erst nach dem Umtausch aller Abstandshalter wurde eine gute Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse erreicht. Die Linearitätsbeziehung zwischen den Amplituden der Referenzdehnung und der Auslenkung ist bei diesem Abstandshaltertyp einwandfrei (Bild 10).

3.2.2 Abstandshalter Type II

Diese Messung wurde zeitlich als zweite durchgeführt. Die Resultate, (auf dem Bild 1a mit den Symbolen \otimes und \circ bezeichnet), sind in der Tabelle 3 zusammengefasst und mit den berechneten Werten verglichen.

Die Messung erfolgte ebenfalls in zwei Teilen. Im ersten Teil (Punkte \otimes) wurden zur Aufnahme der Referenzdehnung DMS der Type PLS-10 mit Papierbasis benutzt. Die Linearitätsbeziehung zwischen der Referenzdehnung und der Auslenkung ist in diesem Fall gut (Bild 12a); die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten sind kleiner als 2%.

Im zweiten Teil (Symbol \circ) wurden zur Aufnahme der Referenzdehnung die gekapselten DMS der Type Sg-122-2A-3 benutzt. In diesem Fall kann man in dem Referenzdehnung-Auslenkungs-Diagramm bei dem Wert der Referenzdehnung $\epsilon_{\text{ref}} = 25 \cdot 10^{-6}$ einen Knick beobachten (Bild 12 b). Diese Erscheinung, welche in allen nachfolgenden Messungen beobachtet wurde, ist offensichtlich durch die bei den höheren Amplituden eintretende Wirkung der zusätzlichen Steifigkeit

der DMS-Anschlüsse (dünnwandige austenitische Kapillaren mit einem Außendurchmesser von 2,4 mm) verursacht. Die Versteifung der Brennstabhülle durch die DMS hat ebenfalls eine kleine Vergrößerung der Schwingungsform in den Abschnitten 27 und 28 (Bild 1a) zur Folge. Die übrigen Abschnitte werden dadurch nur wenig beeinflusst. Die kleinen positiven Abweichungen können durch das während der Messung beobachtete ständige Anwachsen des Spiels in den Abstandshaltern erklärt werden. Die Abweichung von 24,5% bei der Dehnungsmessung muß allerdings als Korrektur berücksichtigt werden.

Bei der Beobachtung des anwachsenden Spiels in den Abstandshaltern und dessen Einfluß auf die Schwingungsform wurde eine wichtige Tendenz festgestellt, die auch auf dem Bild 1a deutlich erkennbar ist. Am meisten werden nämlich solche Abstandshalter ausgeschlagen, die den Abschnitten mit größten Amplituden der Auslenkung zugeordnet sind. Das hat eine Vergrößerung der Schwingungsform und dadurch eine weitere Vergrößerung der Amplitude in diesen Abschnitten zur Folge, was über die verstärkte Abnutzung zum vollen Ausfall des Abstandshalters (oder der Brennstabhülle) führen kann. Zwischen der Amplitude der Auslenkung und der Abnutzung des Abstandshalters (oder des Brennstabhüllrohres) findet eine positive Rückkopplung statt.

3.2.3 Abstandshalter Type III

Diese Messung wurde zeitlich als letzte durchgeführt. Die Resultate (auf dem Bild 1a mit den Symbolen Δ bezeichnet) sind in der Tabelle 4 zusammengefaßt und mit den berechneten Werten verglichen. Sowohl der Knick in dem Referenzdehnung-Auslenkungs-Diagramm, als auch das Anwachsen des Spieles in den Abstandshaltern wurden beobachtet. Im Vergleich mit dem Abstandshalter Type II erwies sich der Abstandshalter Type III als viel stabiler. Aus diesem Grund sind die Abweichungen der gemessenen von den berechneten Werten wesentlich kleiner als bei dem Abstandshalter Type II. Aus der Messung folgt, daß für die Normalfunktion $G_1(x)$ keine Korrektur nötig wird, soweit die Abstandshalter noch nicht ausgeschlagen sind.

In der Tabelle 5 sind außerdem die berechneten Werte mit den bei verschiedenen Erregungsfrequenzen erhaltenen Meßwerten verglichen. Ziel dieser Messung war es, die Richtigkeit der gewählten Anordnung der Erregungsspulen zu überprüfen. Bei "idealer Erregung" soll die Schwingungsform von der Erregungsfrequenz ganz unabhängig sein [5]. Aus der Tabelle 5 folgt, daß dieser Zustand nicht erreicht wurde. Soweit aber die Erregung in der Nähe der Resonanzfrequenz liegt, sind die Abweichungen so klein, daß sie keine praktische Bedeutung haben.

3.3 Messung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung

Ziel dieser Versuche war es, die Lage der Eigenfrequenzen, die Anteile der Struktur- und der viskosen Dämpfung an der Gesamtdämpfung und den Dämpfungsquotient zu bestimmen. Der Dämpfungsquotient ξ_1 tritt in den Formeln für die Berechnung [2] oder Abschätzung [3] des durch den Kühlmittelstrom hervorgerufenen Schwingungszustandes des Brennstabes auf.

Bei der Durchführung sowie bei der Auswertung der Versuche wurde die in der Arbeit [5] beschriebene Methode angewendet. Die Messung der Resonanzkurven in der Luft wurde mit allen drei Abstandshaltertypen durchgeführt; die Messung im Wasser erfolgte nur mit dem Abstandshalter der Type III.

Allgemein wurde festgestellt, daß sowohl die Lage der Resonanzfrequenzen, als auch die Dämpfung, von den Amplituden der Schwingung und von dem Spiel in den Abstandshaltern abhängen. Die Einzelheiten werden in den folgenden Abschnitten angegeben.

3.3.1 Abstandshalter Type I

Mit diesem Abstandshaltertyp wurden nur zwei Orientierungsmessungen der Resonanzkurven durchgeführt, die sich dann durch unterschiedliche Größe der maximalen Amplitude (gemessen bei der Resonanzfrequenz) unterscheiden (Bild 13). Die der mittleren Amplitude entsprechende Resonanzkurve wurde sowohl mit den Referenzdehnmeßstreifen (Symbole O), als auch mit dem tastlosen induktiven Wegaufnehmer (Abschnitt 23, x = 5,2 cm) aufgenommen (Symbole x). Aus dem Diagramm 13 folgt, daß sich in der Nähe der Resonanzfrequenz die beiden Kurven nur wenig voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund wurden die meisten nachfolgenden Messungen der Resonanzkurven nur mit dem Referenz-DMS aufgenommen. Die gemessene Resonanzfrequenz ist um 2,6% größer als die berechnete erste Eigenfrequenz ν_1 , der Dämpfungsquotient beträgt $\xi_1 = 0,62\%$. Die zweite Resonanzkurve (Symbole v) wurde bei sehr starker Erregung aufgenommen. Die Dämpfung nahm dabei zu ($\xi_1 = 0,78\%$),

die Resonanzfrequenz hat sich in Richtung der niedrigeren Frequenzen verschoben. Die relative Abweichung der Resonanzfrequenz von der berechneten ersten Eigenfrequenz beträgt - 1,3%.

Es ist zu erwähnen, daß nach dieser Messung sich das Spiel zwischen dem Brennstab und dem Abstandshalter sehr vergrößert hat. Bei dem obersten Abstandshalter (zwischen den Abschnitten 29 und 30) betrug dieses Spiel etwa 0,4 mm.

3.3.2 Abstandshalter Type II

Mit diesem Abstandshaltertyp wurde eine Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Erregungsarten auf die Resonanzkurven durchgeführt.

Die auf dem Bild 14 aufgezeichneten Resonanzkurven wurden für Erregung der Schwingung des Brennstabes mit unterschiedlicher Spulenzahl aufgenommen. Die Resonanzkurven in Bild 14a entsprechen der Erregung mit nur einer Spule (Abschnitt 28). Wie aus dem Diagramm zu erkennen ist, wurde dabei auch die zweite Resonanzfrequenz deutlich feststellbar. Die beiden Resonanzkurven sind im Vergleich mit den berechneten Eigenfrequenzen ein bißchen größer; die relative Abweichung beträgt bei $\nu_1 + 1,8\%$, bei $\nu_2 + 2,8\%$. Die Resonanzkurven wurden sowohl mit den Referenz-DMS, als auch mit dem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Die Lage der Referenzfrequenzen ist bei den beiden Messungen gleich; die Breite der Resonanzkurven ist allerdings unterschiedlich. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die bei der Erregung mit nur einer Spule entstehende Überlagerung von mehreren Schwingungsformen sich in unterschiedlichen Abschnitten des Brennstabes auch unterschiedlich auswirken kann. Bei der Erregung der Schwingung mit mehreren Spulen findet dieses Phänomen nicht mehr statt. Wie auf dem Bild 14b zu sehen ist, sind die beiden Kurven praktisch identisch. Die zweite Resonanzfrequenz ist dabei ebenfalls nicht mehr erkennbar.

Auf dem Diagramm 15 sind die bei großer und bei extrem kleiner Erregung aufgenommenen Resonanzkurven dargestellt. Die dem zweiten Fall entsprechende maximale Amplitude der Auslenkung beträgt nur etwa 0,013 mm. Dieser Wert ist im Vergleich mit dem Spiel im Abstandshalter sehr klein. Auf dem Bild 15 ist zu erkennen, daß die erste Schwingungsform dabei überhaupt nicht zur Geltung kam. Die relative Abweichung der dabei erkennbaren zweiten Resonanzfrequenz von der berechneten zweiten Eigenfrequenz ν_2 beträgt + 1,4%.

Bei diesem Abstandshaltertyp wurde eine durch die Brennstabsschwingung verursachte und sehr rasch fortschreitende Ausschlagung des Abstandshalters festgestellt.

3.3.3 Abstandshalter Type III

Der bei den Abstandshaltertypen I und II angedeutete Einfluß der Schwingungsamplitude auf den Dämpfungsquotient und auf die Resonanzfrequenz wurde bei dem Abstandshalter III systematisch untersucht. Die Messungen wurden sowohl in Luft als auch in Wasser durchgeführt.

Die Messung in Luft erfolgte in zwei Versuchsreihen: zuerst mit neuen Abstandshaltern, bei denen zwischen dem Brennstab und den Abstandshaltern noch kein Spiel vorhanden war; dann nach den in Kapitel 3.2.3 angeführten Messungen, wo sich schon ein spürbares Spiel in den Abstandshaltern eingestellt hat. Einige typische Resonanzkurven aus der ersten Versuchsreihe sind auf dem Bild 16 aufgezeichnet. Alle Resonanzfrequenzen sind größer als die berechnete erste Resonanzfrequenz ν_1 ; die relativen Abweichungen liegen im Intervall 3,3 bis 5,5%. Die Breite der Resonanzkurven ist ebenfalls von dem Wert der maximalen Amplitude abhängig. Die Abhängigkeit des Dämpfungsquotienten von der Amplitude ist auf dem Bild 17 aufgetragen (Symbole \circ). Im Bereich der kleinen Amplituden nimmt dabei der Dämpfungsquotient fast linear mit der Amplitude zu. In der zweiten

Versuchsreihe (Symbole \times) ist im Intervall $\epsilon < 25 \cdot 10^{-6}$ eine umgekehrte Tendenz sichtbar. Für $\epsilon_{\text{refm}} > 25 \cdot 10^{-6}$ stimmen die Werte von den beiden Versuchsreihen in groben Zügen überein. Aus den Resultaten der beiden Versuchsreihen folgt, daß der Dämpfungsquotient sowohl von der Amplitude, als auch von dem Spiel in den Abstandshaltern abhängig ist.

Einige typische Resonanzkurven aus der im stagnierenden Wasser durchgeführten Messung sind auf dem Bild 18 dargestellt. Die Messung wurde im Anschluß an die Messungen der zweiten Versuchsreihe durchgeführt, so daß keine wesentliche Vergrößerung des Spiels in den Abstandshaltern statt fand. Bei sehr kleiner Erregung, wo die Amplitude im Vergleich zu dem Spiel sehr klein ist, hat die Resonanzkurve eine unregelmäßige Form (Symbole ∇). Alle Resonanzfrequenzen sind größer als die berechnete erste Resonanzfrequenz ν_1 , die relativen Abweichungen liegen im Intervall 1,8 bis 7,4%. Die Abhängigkeit der Breite der Resonanzkurven von der Amplitude ist ebenfalls erkennbar. Die Werte des Dämpfungsquotienten ξ sind auf dem Bild 19 in Abhängigkeit von der maximalen Schwingungsamplitude aufgetragen. Man kann eine ähnliche Tendenz wie bei der Messung der zweiten Versuchsreihe (Bild 17, Symbole \times) auf dem Diagramm feststellen. Für das Einsetzen in die in der Arbeit [3] abgeleitete Formel (8) für die Abschätzung der mittleren quadratischen Amplitude des im strömenden Wasser schwingenden Brennstabes wird der Wert $\xi_1 = 0,016$ empfohlen. An diesem Wert ist die viskose Dämpfung etwa mit 40% beteiligt; der Rest bleibt für die Strukturdämpfung.

Das Problem der Dämpfung der Brennstäbe ist sehr komplex. Außer den hier beschriebenen Einflüssen der Amplitude und des Spieles in den Abstandshaltern, wurde noch der Einfluß der Kühlmittelströmung auf die Gesamtdämpfung angekündigt [8 - 10]. Dieses Phänomen ist das Objekt der ausführlichen Untersuchungen in Argonne National Laboratory [11]. Für die quantitative Beschreibung der Auswirkungen von allen angeführten drei Einflüssen auf die Gesamtdämpfung wäre es notwendig, ein umfangreiches Versuchsprogramm durchzuführen.

4.0 Schlußfolgerungen

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich mit der theoretischen und experimentellen Untersuchung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen des querschwingenden Brennstabes der Na 1-Studie mit neun Abstandshaltern und mit der experimentellen Untersuchung der Dämpfung dieses Brennstabes in Luft und in stagnierendem Wasser. Als Resultat ergab sich:

1. Die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Normal- und Dehnungsfunktionen wurden für die fünf ersten Schwingungsformen berechnet. Es wurde festgestellt, daß die höheren Schwingungsformen im Bereich der hohen Betriebstemperatur des Brennstabes unerwünschte Biegespannungsspitzen an den Berührungstellen des Brennstabes mit den Abstandshaltern aufweisen. Aus den Berechnungen geht hervor, daß die Hinzufügung relativ kleiner Massen zu dem Brennstab (virtuelle Masse des Kühlmittels oder der Anker für elektromagnetische Schwingungserregung), praktisch keinen Einfluß auf die Eigenschwingungsformen hat.
2. Die erste Schwingungsform des Brennstabes wurde experimentell verifiziert. Soweit die Abstandshalter noch nicht ausgeschlagen waren, stimmen die berechnete und die gemessene erste Normalfunktion gut überein, so daß keine Korrektur nötig ist. Für die berechnete Dehnungsfunktion muß eine Korrektur von 25% benutzt werden. Wenn die Abstandshalter ausgeschlagen werden, ändert sich die Schwingungsform. Zwischen der Amplitude und der Ausschlagung findet eine positive Rückkopplung statt.
3. Die berechneten Eigenfrequenzen sind niedriger als die gemessenen Resonanzfrequenzen. Die relativen Abweichungen liegen in einem Intervall 1 bis 8%. Der genaue Wert ist durch die maximale Amplitude bei der Resonanzfrequenz bestimmt.

4. Sowohl die Resonanzfrequenzen, als auch die Dämpfung hängen von der Amplitude der Schwingung und von dem Spiel zwischen dem Brennstab und den Abstandshaltern ab. Für das Einsetzen in die Formeln für die Berechnung oder Abschätzung des Schwingungszustandes des Brennstabes im strömenden Wasser wird der Wert des Dämpfungsquotienten $\xi_1 = 0,016$ empfohlen. Die viskose Dämpfung beteiligt sich an diesem Wert etwa mit 40%; der Rest bleibt für die Strukturdämpfung.

5. Wegen kleiner Widerstandsfähigkeit gegen die durch die Brennstabschwingung verursachte Ausschlagung eignen sich die untersuchten Abstandshaltertypen II und III nicht für den Einsatz im Reaktor.

Aufgrund der gewonnenen Resultate wird empfohlen, auf dem Gebiet der Brennstabschwingung folgende Arbeiten durchzuführen:

1. Untersuchung der Widerstandsfähigkeit gegen Ausschlagung der neu entwickelten Abstandshalter des SNR-Prototyps

2. Untersuchung des Einflusses des Spiels in den Abstandshaltern auf die Dämpfung.

L i t e r a t u r

- [1] Smidt, D., Müller, A.:
Referenzstudie für den 1000 MW_e natriumgekühlten schnellen
Brutreaktor (Na 1)
KFK-Bericht Nr.299, Dezember 1964
- [2] Kadlec, J.:
Allgemeine Betrachtung über die durch die Kühlmittelströmung
hervorgerufenen Schwingungen der Brennstoffstäbe des schnellen
Reaktors 1000 MW.
Externer Bericht 8/65-5, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Institut für Reaktorentwicklung, Dezember 1966
- [3] Kadlec, J., Pfrommer, V.:
Abschätzung der optimalen Anzahl der Gitterabstandshalter
für Na-2 Subassembly.
Externer Bericht 8/67-2, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Institut für Reaktorentwicklung, Januar 1967
- [4] Kadlec, J.:
Rechnungsverfahren für die Bestimmung der Eigenfrequenzen,
der Normalfunktionen und der Dehnungsfunktionen quer -
schwingender Brennstäbe.
Externer Bericht 8/66-9, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Institut für Reaktorentwicklung, September 1966
- [5] Kadlec, J., Pfrommer, V.:
Methode für die experimentelle Untersuchung der Eigenfre-
quenzen, der Normal- und der Dehnungsfunktionen sowie der
Dämpfung der querschwingenden Brennstäbe.
KFK-Bericht 731, EUR 3718d, März 1968
- [6] Gast, K., Schlechtendahl, E.G.:
Schneller Natriumgekühlter Reaktor Na-2.
KFK-Bericht 660, EUR 3706d, Oktober 1967

- [7] Gontkevič, V.S.:
Sobstvennye kolebanija plastin i oboloček.
Naukovaja dumka, 1964
- [8] Wambsgan~~s~~s, M.W., Boers, B.L., Rosenberg, G.S.:
A Method for Identifying and Evaluating Linear Damping
Models in Beam Vibration. AED-Conf.66-369-2, Oktober 1966
- [9] Wambsgan~~s~~s, M.W., Boers, B.L., Rosenberg, G.S.:
A Method for Identifying and Evaluating Linear Damping
Models. ANL-7282, April 1967
- [10] Wambsgan~~s~~s, M.W., Boers, B.L.:
Parallel-Flow-Induced Vibration of a Cylindrical Rod.
ASME Winter Annual Meeting and Energy Systems Exposition,
New York, N.Y., December 1-5.1968, 68-WA/NE-15
-
- [11] Wambsgan~~s~~s, M. W.:
Persönliche Mitteilung

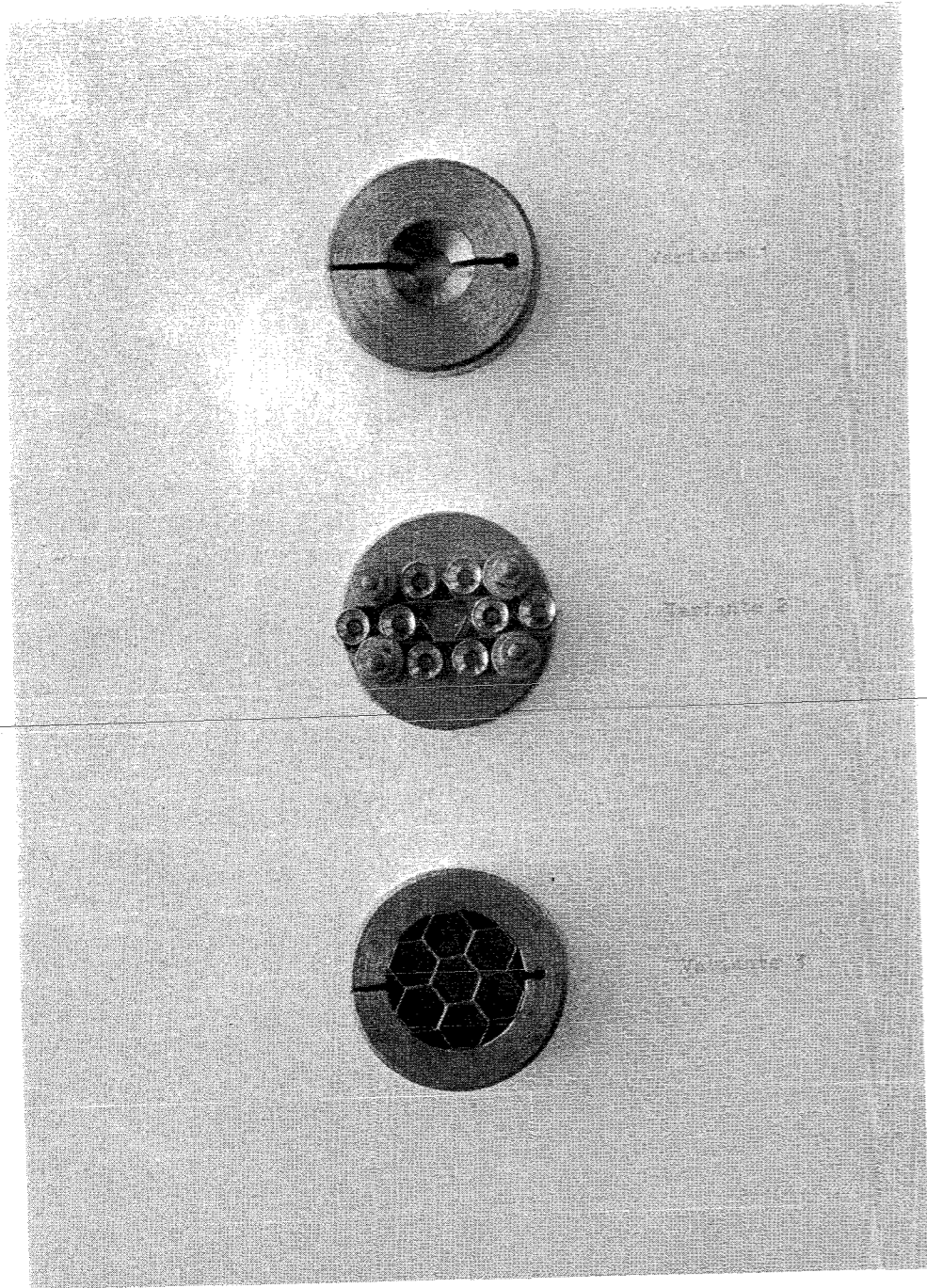


Bild 2: Abstandshalter

Bild 3 Erste Schwingungsform, $\nu_1 = 69,2 \text{ Hz}$

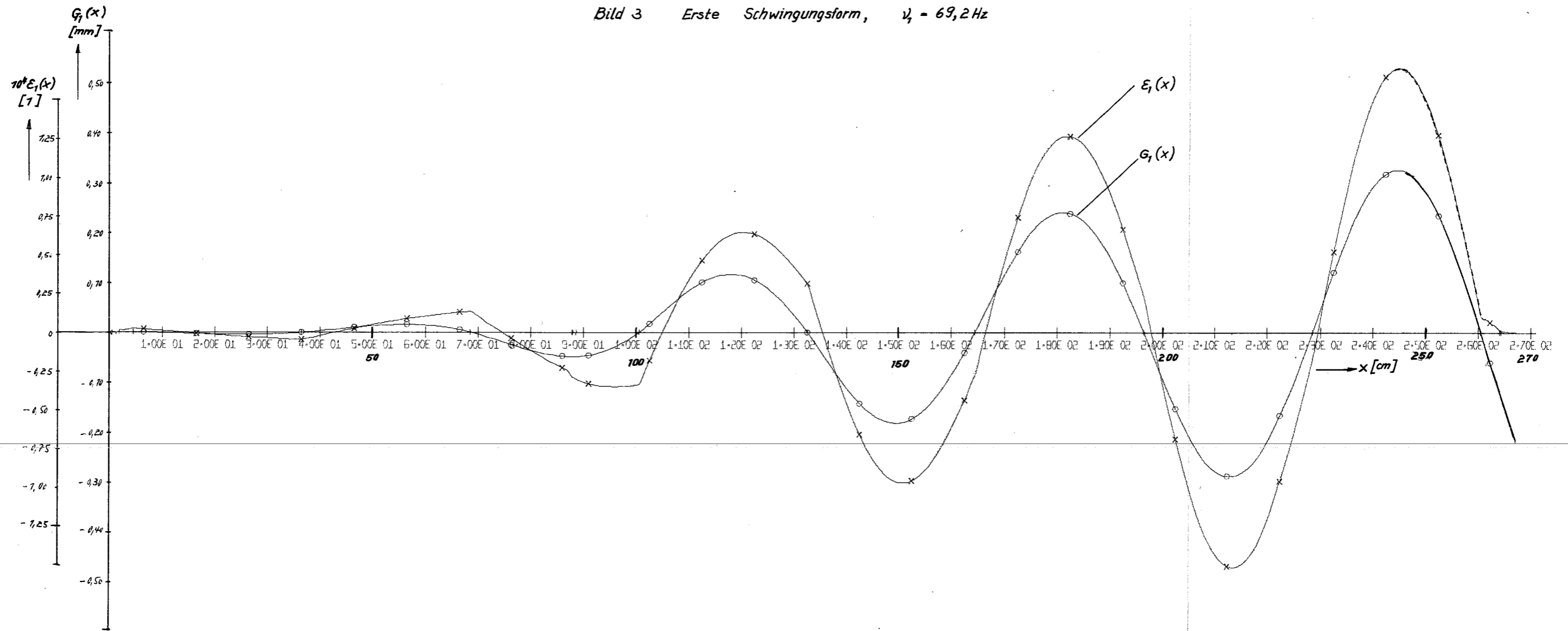


Bild 4 Zweite Schwingungsform, $\nu_2 = 79,1 \text{ Hz}$

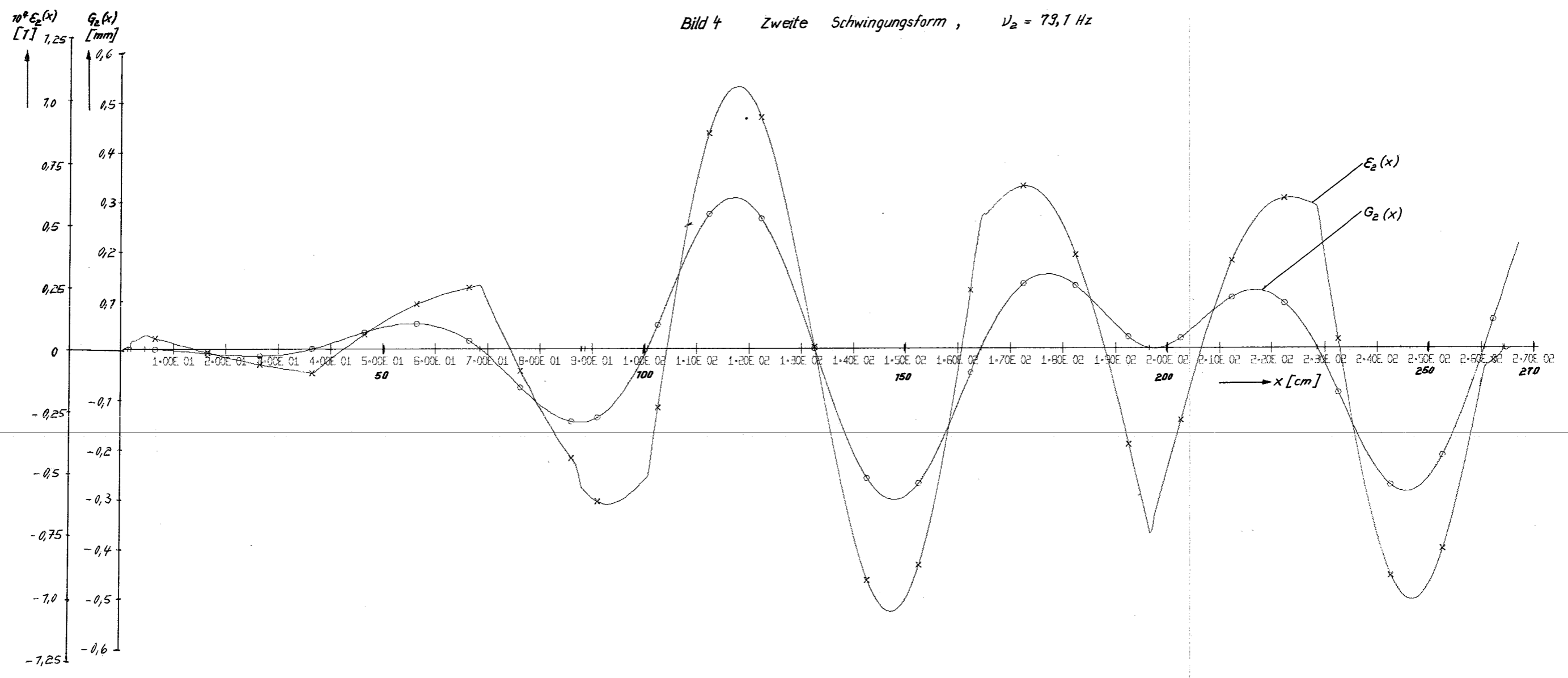


Bild 5 Dritte Schwingungsform , $\nu_3 = 96,3 \text{ Hz}$

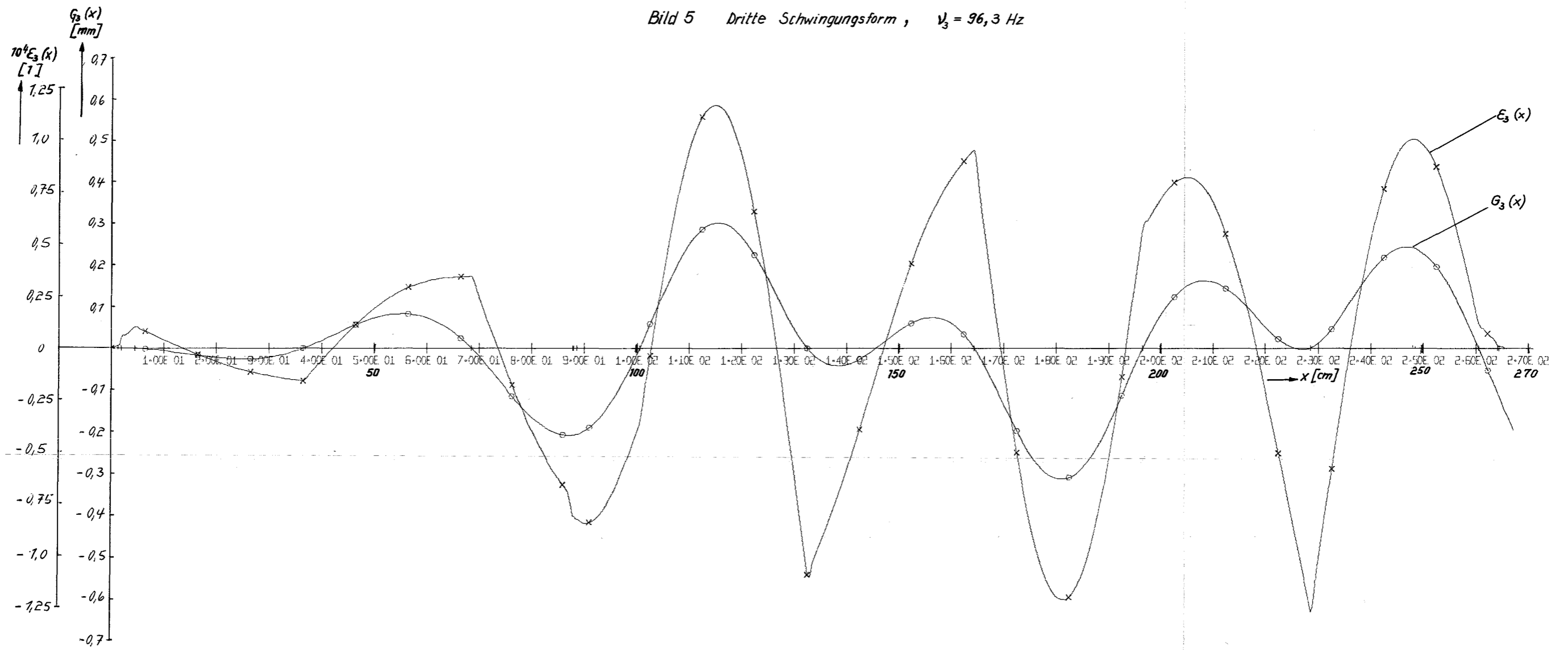


Bild 6 Vierte Schwingungsform , $\nu_4 = 117,8 \text{ Hz}$

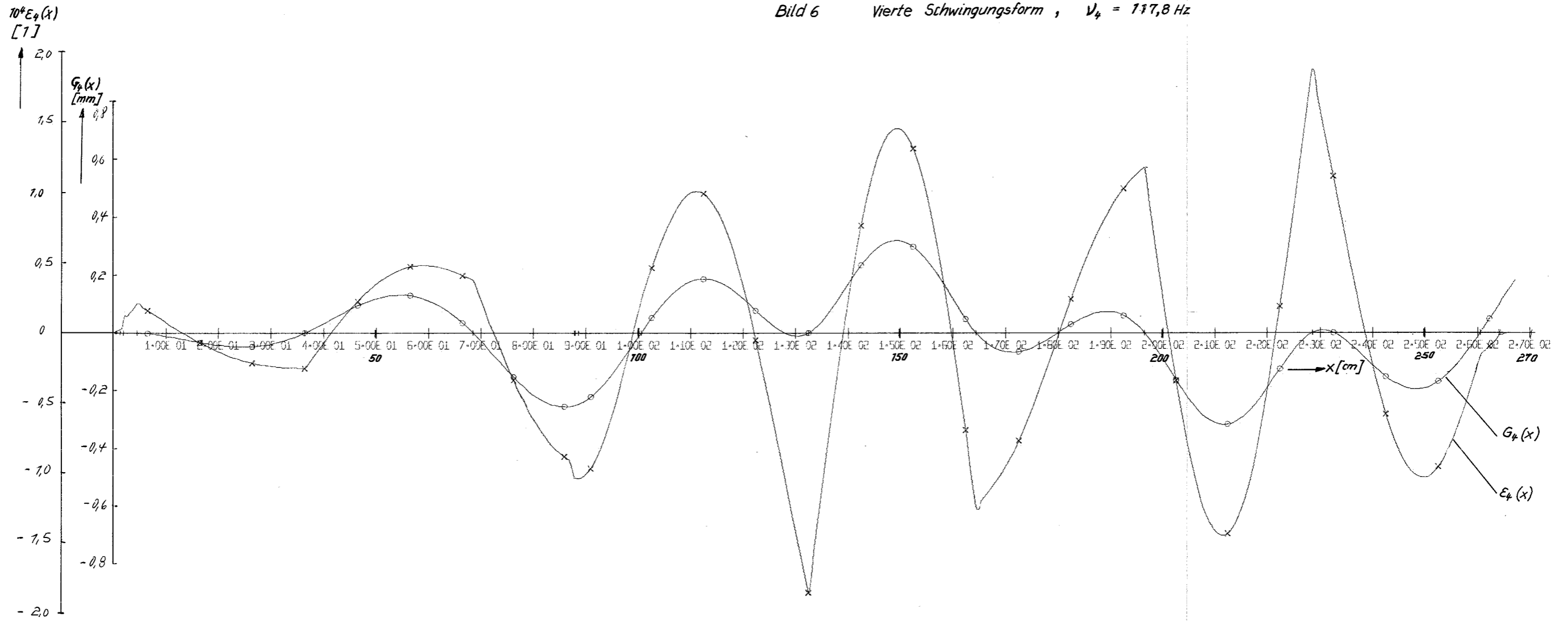
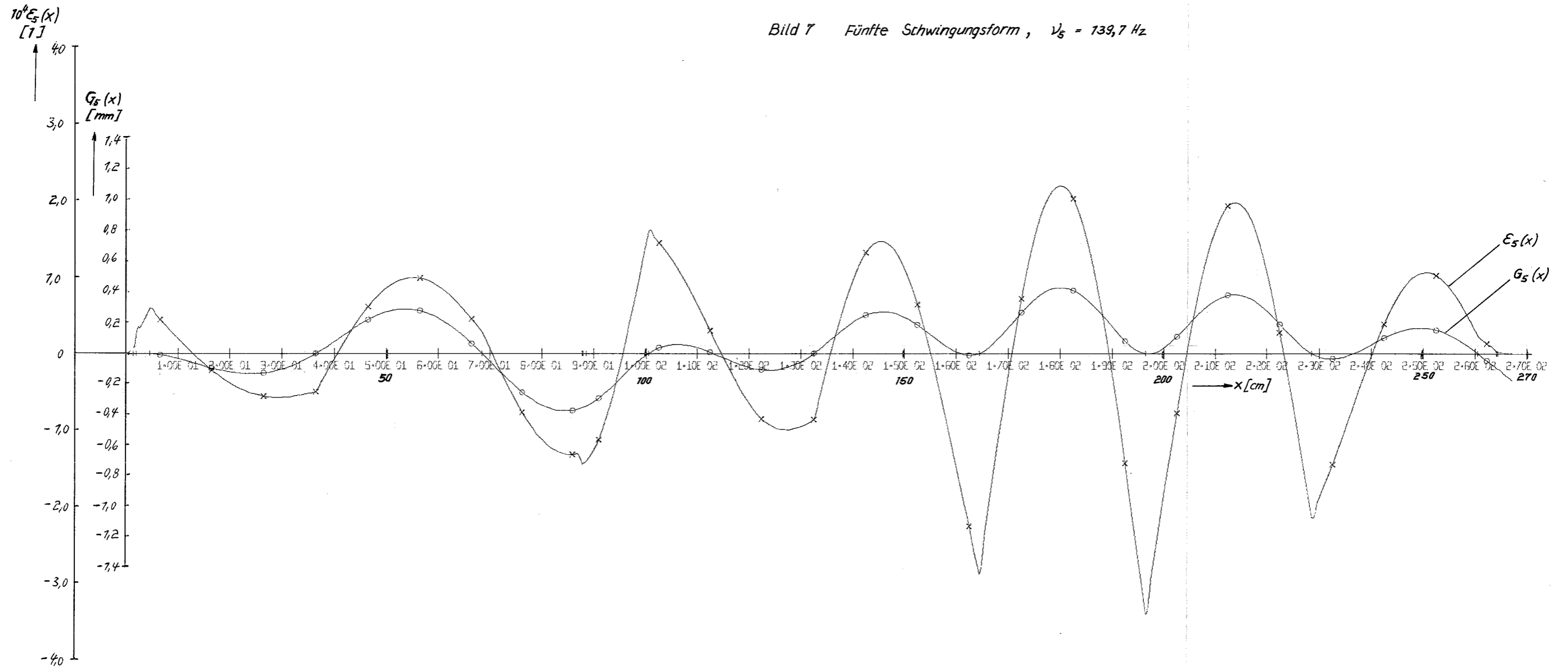


Bild 7 Fünfte Schwingungsform, $\nu_5 = 139,7 \text{ Hz}$



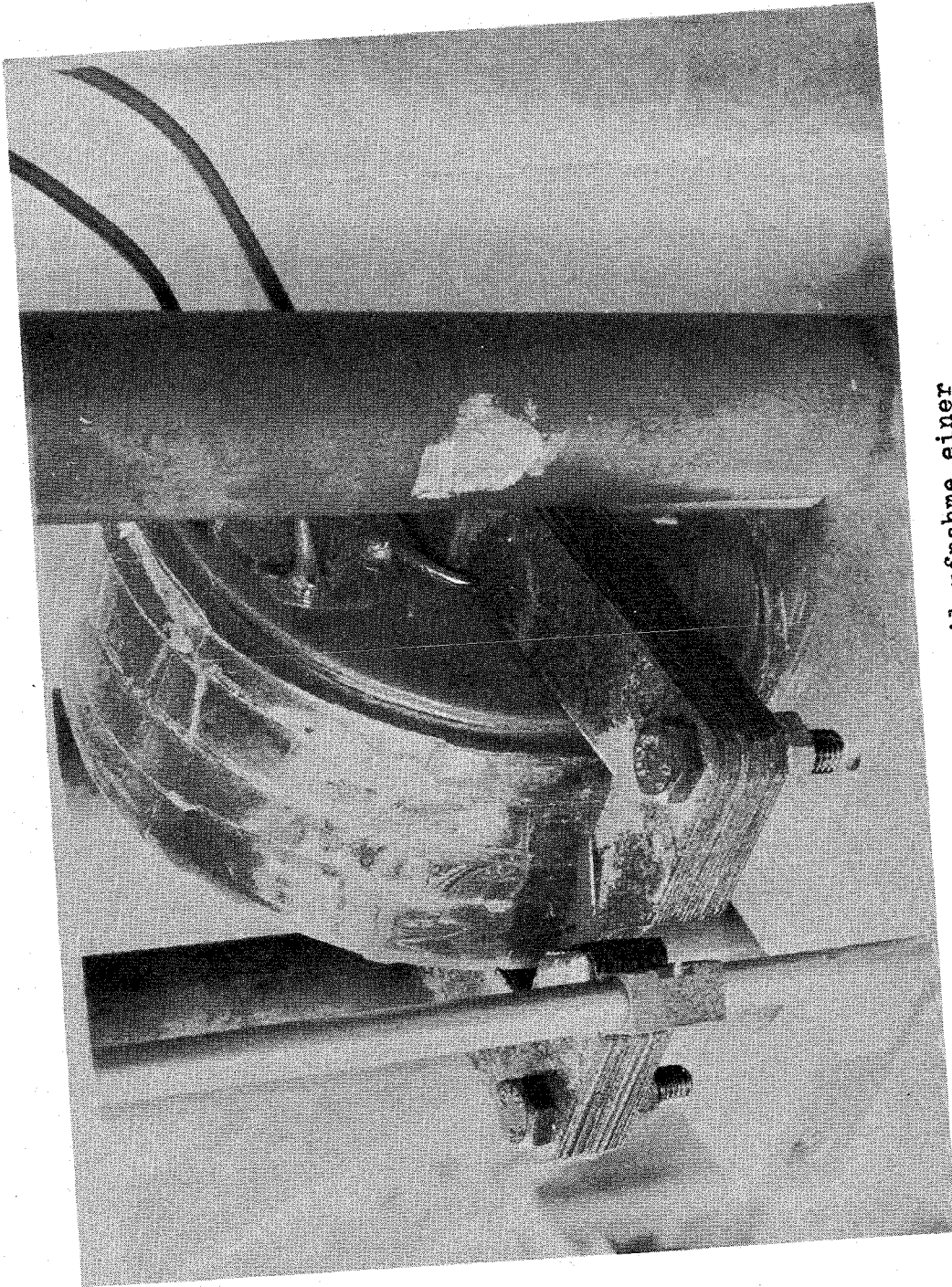


Bild 8: Detailaufnahme einer Erregungsspule

Abschnitt	5	8	11	16	19	22	25	28
Windungszahl	13	48	154	360	560	740	890	1000
Ohmscher Widerstand [Ω]	0,266	0,383	0,69	1,43	2,47	3,52	4,40	5,30

Tabelle 1: Charakteristische Werte der Erregungsspulen

Gemessene Größe	Abschnitt	X [cm]	Berechneter Wert [mm]	Gemessener Wert [mm]	Δ [%]
Auslenkung	29	3,0	0,3099	0,292	- 6,2
"	27	12,0	0,2991	0,278	- 8,0
"	26	3,0	0,2732	0,252	- 8,0
"	24	12,4	0,2697	0,244	- 9,3
"	23	3,0	0,2297	0,223	- 3,0
"	21	12,4	0,2234	0,225	1,0
"	20	3,0	0,1762	0,161	- 8,3
"	18	12,4	0,1673	0,152	- 9,8
"	17	2,7	0,1103	0,098	- 12,7
"	15	14,0	0,1112	0,095	- 14,2
"	12 - 14	3,08	0,0462	0,041	- 12,5
"	10	14,32	0,0432	0,040	- 8,0

Tabelle 2: Vergleich der berechneten Werte mit den Resultaten der Messung, Abstandshalter Typ I

$$\Delta = \left(\frac{\text{gemessenen Wert}}{\text{berechneten Wert}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

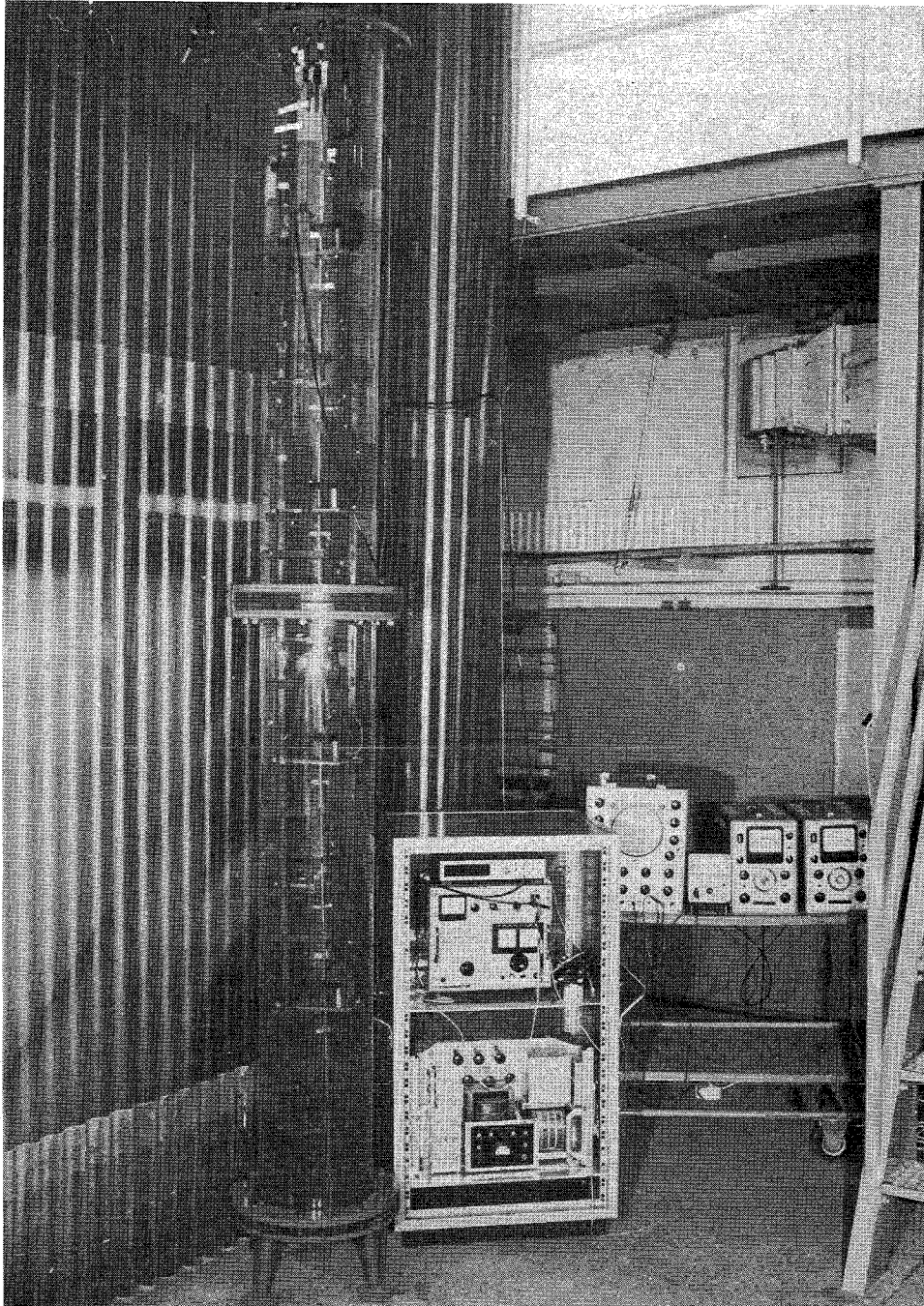


Bild 9: Versuchseinrichtung

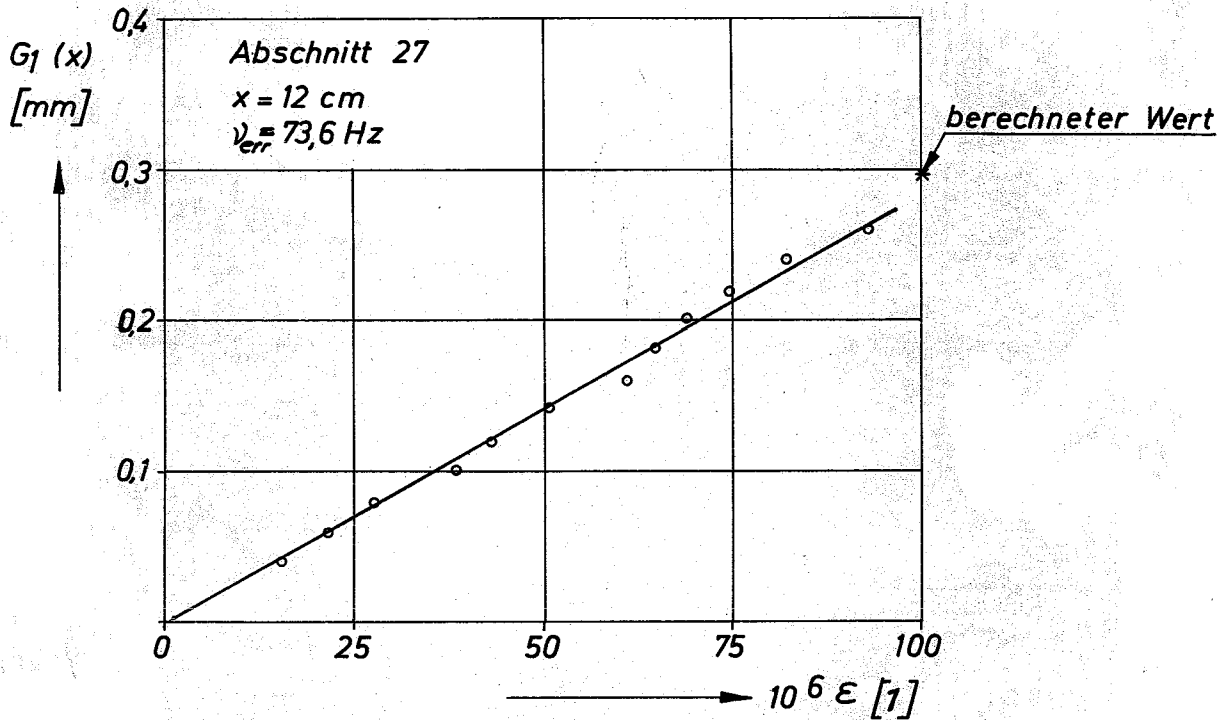


Bild 10: Messauswertung der Auslenkungsamplitude-Brennstabführung mit Abstandshaltern der Variante I.

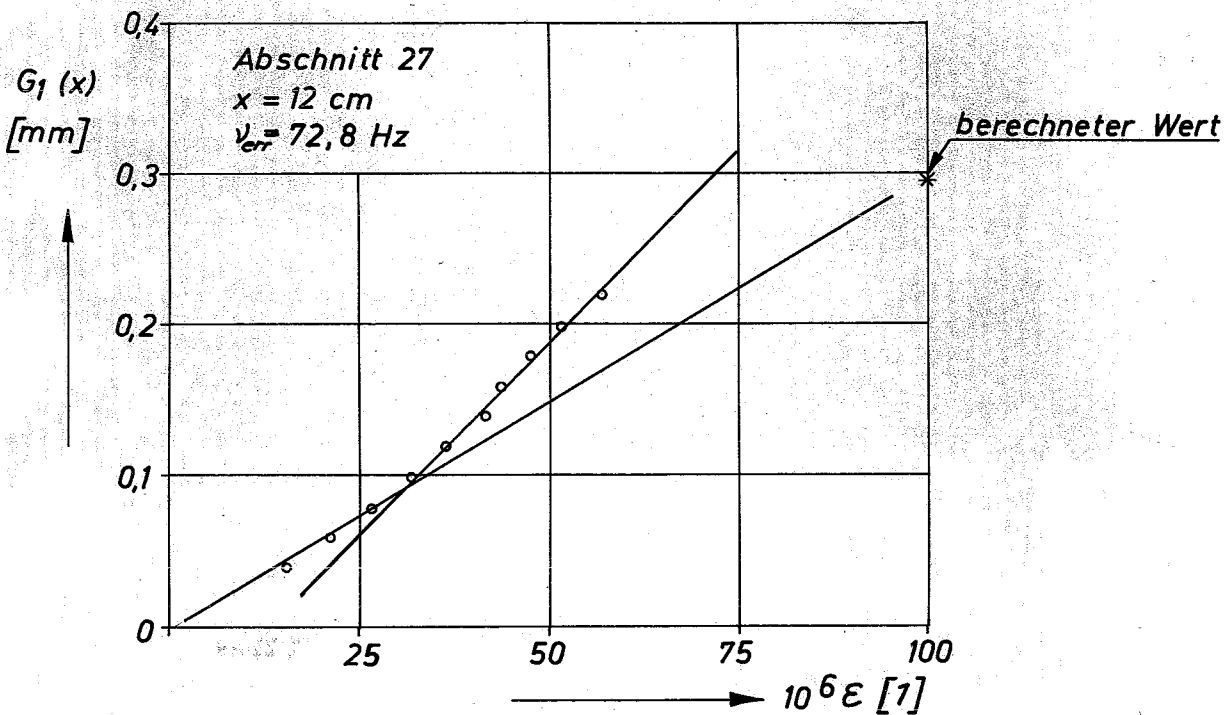


Bild 11: Messauswertung der Auslenkungsamplitude-Brennstabführung mit Abstandshaltern der Variante III.

$$\Delta = \left(\frac{\text{gemessener Wert}}{\text{gerechneter Wert}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Gemessene Größe	Abschnitt	X [cm]	Berechneter Wert [mm]	Gemessener Wert [mm]	Δ [%]
Auslenkung	18	10,85	0,1665	0,183	9,5
	18	12,4	0,1650	0,171	3,5
	19	0,75	0,1821	0,191	5
	20	3,0	0,1738	0,176	1
	20	6,0	0,1492	0,161	8
	21	10,85	0,2012	0,210	4,5
	21	12,4	0,2204	0,238	8,0
	22	0,75	0,2402	0,266	10,5
	23	3,0	0,2266	0,238	5
	23	6,0	0,1926	0,193	0,3
	24	10,85	0,2490	0,243	-2,5
	24	12,4	0,2661	0,274	2,8
	25	0,75	0,2878	0,290	0,5
	26	3,0	0,2695	0,275	2
	26	6,0	0,2278	0,232	2
	27	12,0	0,2951	0,299	1,5
	27	12,0	0,2951	0,320	8,5
	27	10,5	0,2690	0,302	12,0
	28	0,75	0,3221	0,368	14
	28	0,75	0,3221	0,356	10
	28	0,75	0,3221	0,364	13
	29	3,0	0,3057	0,296	-3
	29	3,0	0,3057	0,310	1,5
29	6,0	0,2622	0,260	0,7	
Referenzdehnung	26	9,3	93	115,5	24,5

Tabelle 3: Vergleich der berechneten Werte mit den Resultaten der Messung.
Abstandshalter Typ II

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

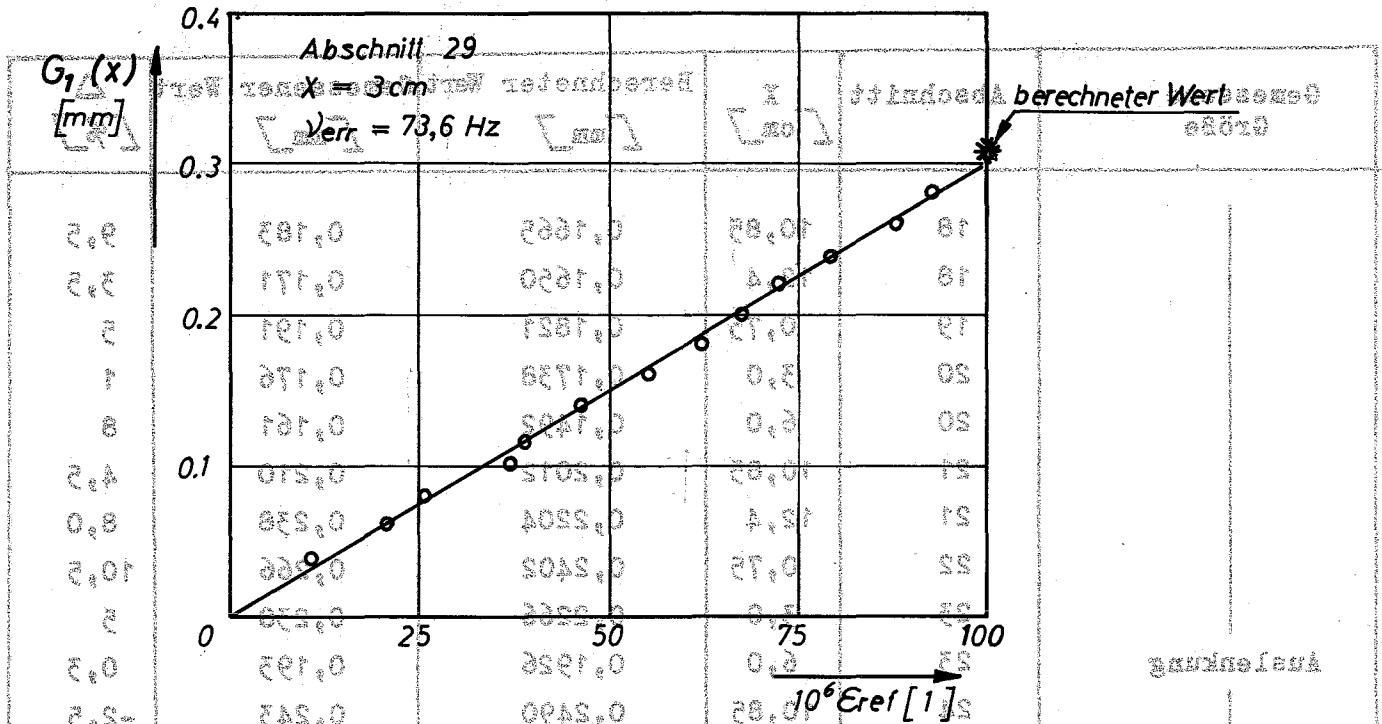


Bild 12 a) MeAuswertung der Auslenkungsamplitude, Brennstabführung mit Abstandshalter der Variante II, Dehnmessstreifen der Type PLS-10 (Tokyo kenkyujo)

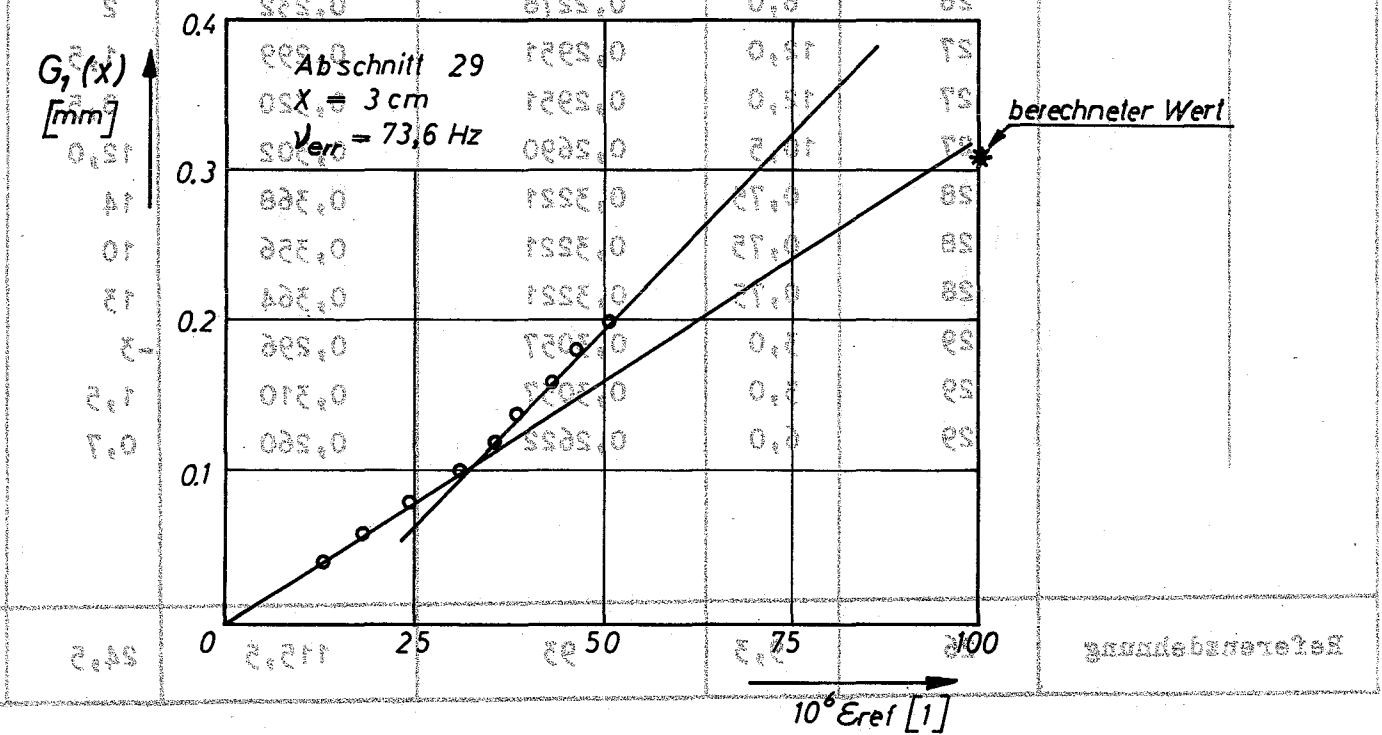


Bild 12 b) MeAuswertung der Auslenkungsamplitude, Brennstabführung mit Abstandshalter der Variante II, Dehnmessstreifen der Type SG-122-2A-3 (Microdot)

$$\Delta = \left(\frac{\text{gemessener Wert}}{\text{gerechneter Wert}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Gemessene Größe	Abschnitt	X [cm]	Berechneter Wert [mm]	Gemessener Wert [mm]	Δ [%]
Auslenkung	29	3,0	0,3057	0,312	1,8
	29	6,0	0,2622	0,2622	0
	28	0,75	0,3221	0,325	1
	27	12	0,2951	0,2951	0
	27	10,5	0,2690	0,253	6,2
	26	3,0	0,2695	0,277	2,8
	26	6,0	0,2278	0,230	1
	25	0,75	0,2878	0,290	0,6
	24	12,4	0,2661	0,273	2,5
	24	10,85	0,2213	0,225	1,8
	23	3,0	0,2266	0,235	3,5
	23	6,0	0,1926	0,200	3,5
	22	0,75	0,2402	0,2402	0
	21	12,4	0,2204	0,2175	-1,5
	21	10,85	0,1821	0,1821	0
	20	3,0	0,1738	0,188	7,8
	20	6,0	0,1492	0,1625	9
	19	0,75	0,1821	0,185	1,5
	18	12,4	0,1650	0,185	12
	18	10,85	0,1348	0,148	9,5
	17	2,7	0,1088	0,110	1
	16	0,75	0,1168	0,120	2,8
	15	12	0,1098	0,120	9,1
12 - 14	3,08	0,0455	0,055	21	
11	0,75	0,0480	0,048	0	
10	14,32	0,0426	0,052	21	

Tabelle 4: Vergleich der berechneten Werte mit den Resultaten der Messung.
Abstandshalter Typ III

$$\Delta = \left(\frac{\text{gemessener Wert}}{\text{berechneter Wert}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Gemessene Größe	V_{err} [Hz]	Ab- schnitt	X [cm]	Berechneter Wert [mm]	Gemessener Wert [mm]	Δ [%]
Auslenkung	37,8	28	0,75	0,322	0,322	0
	36,9				0,310	- 3,5
	36,4				0,325	1
	36,0				0,310	- 3,5
	37,8	25	0,75	0,2878	0,305	6
	36,9				0,284	- 1,3
	36,4				0,290	0,5
	36,0				0,269	2,5
	37,8	22	0,75	0,240	0,305	27
	36,9				0,240	0
	36,4				0,240	0
	36,0				0,240	0
	37,8	19	0,75	0,182	0,265	4,5
	36,9				0,185	1,5
	36,4				0,185	1,5
	36,0				0,182	0
	37,8	16	0,75	0,1168	0,158	35
	36,9				0,126	8
	36,4				0,120	2,5
	36,0				0,1168	0
36,4	11	0,75	0,048	0,048	0	

Tabelle 5: Einfluß der Erregerfrequenz auf die Resultate der Messung.
Abstandshalter Typ III

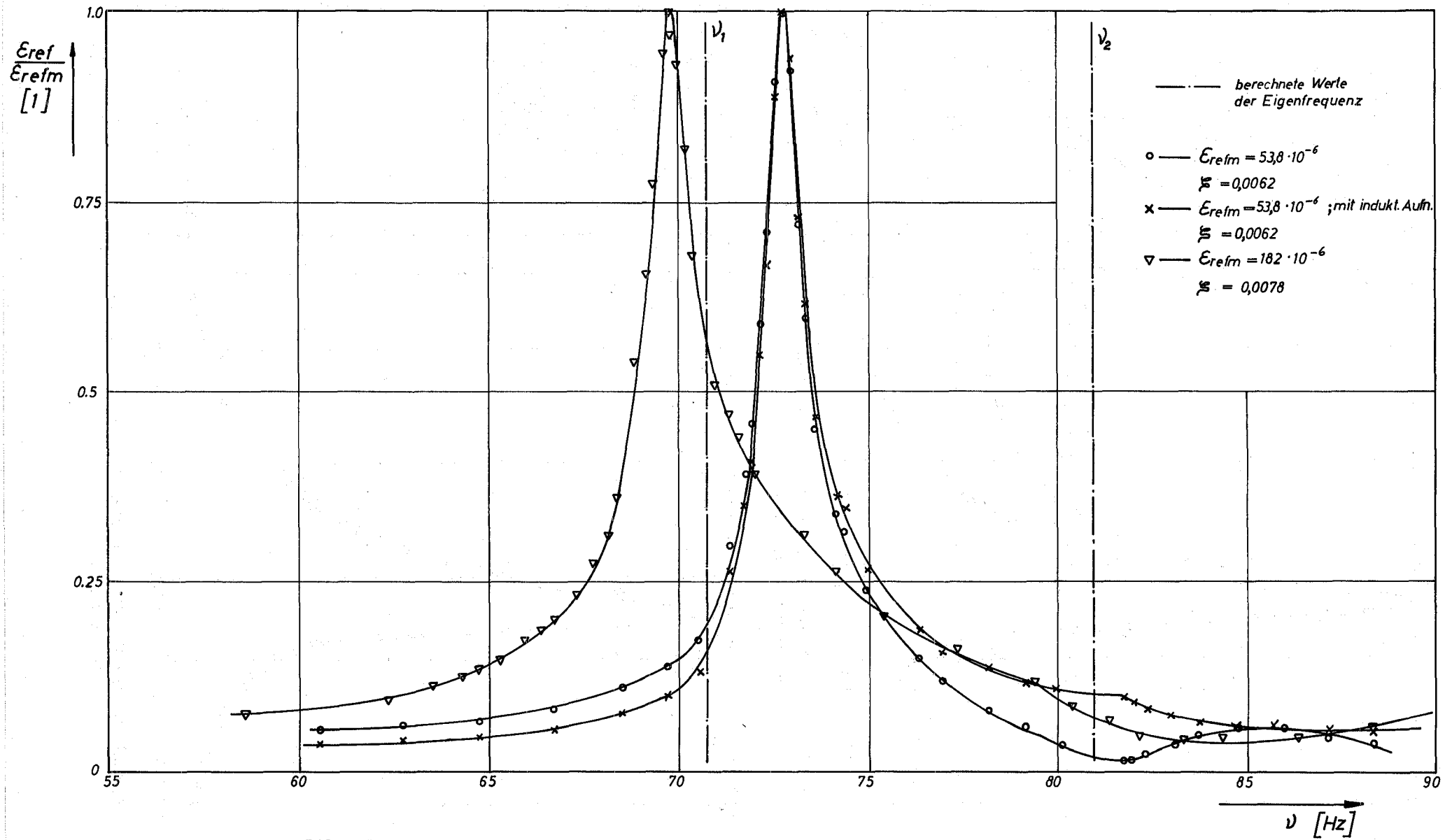
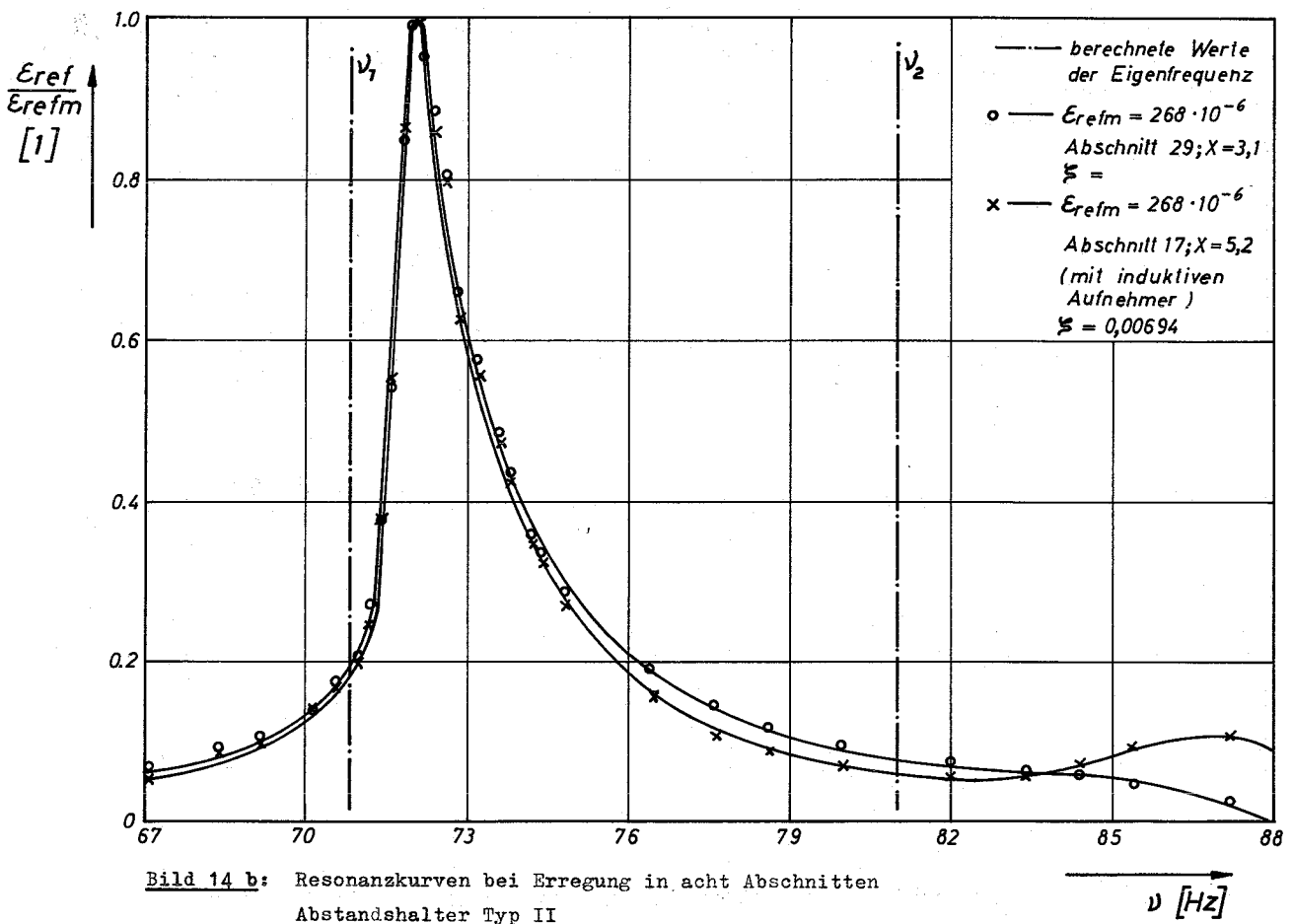
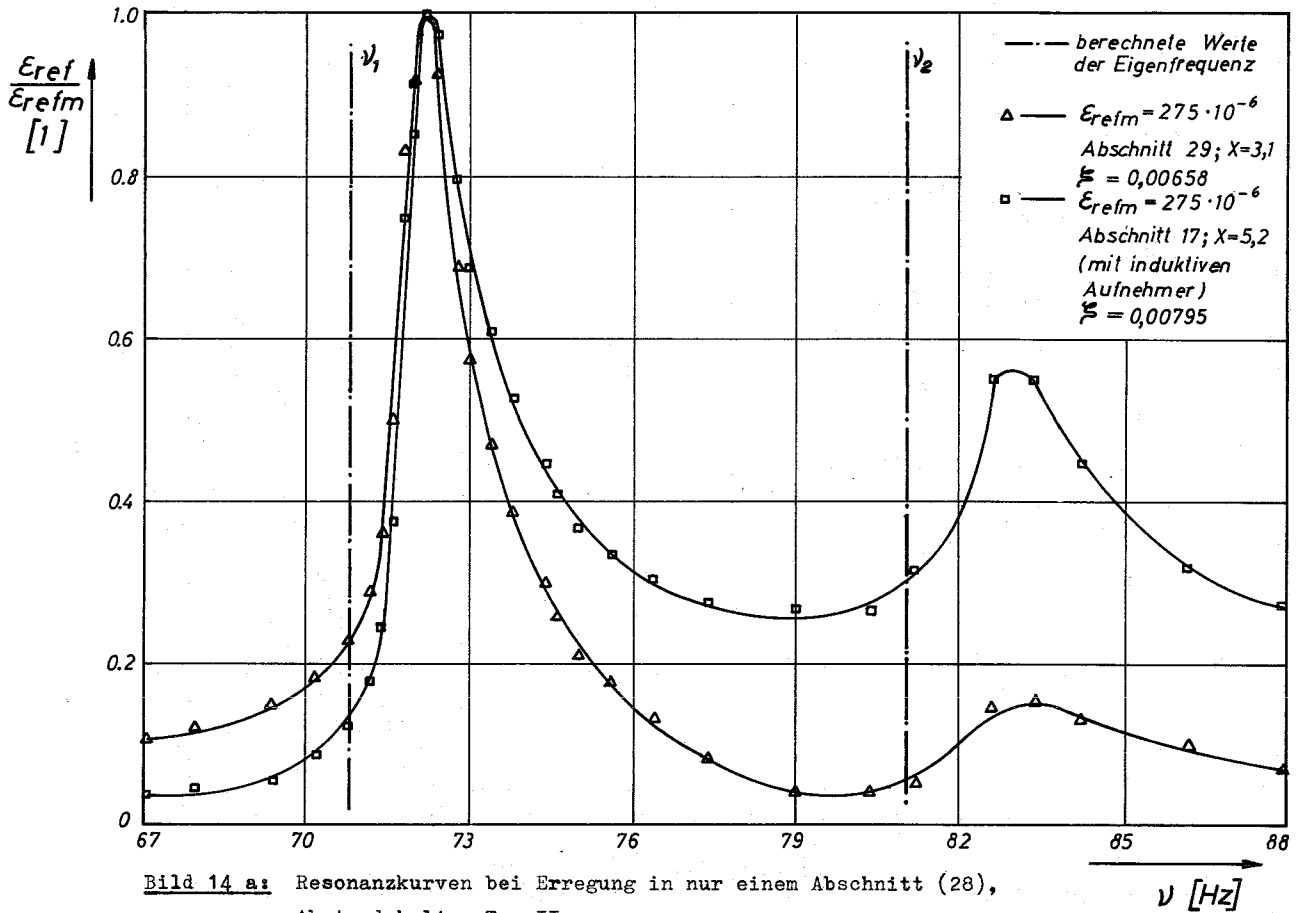


Bild 13 Resonanzkurven, Abstandshalter Typ I



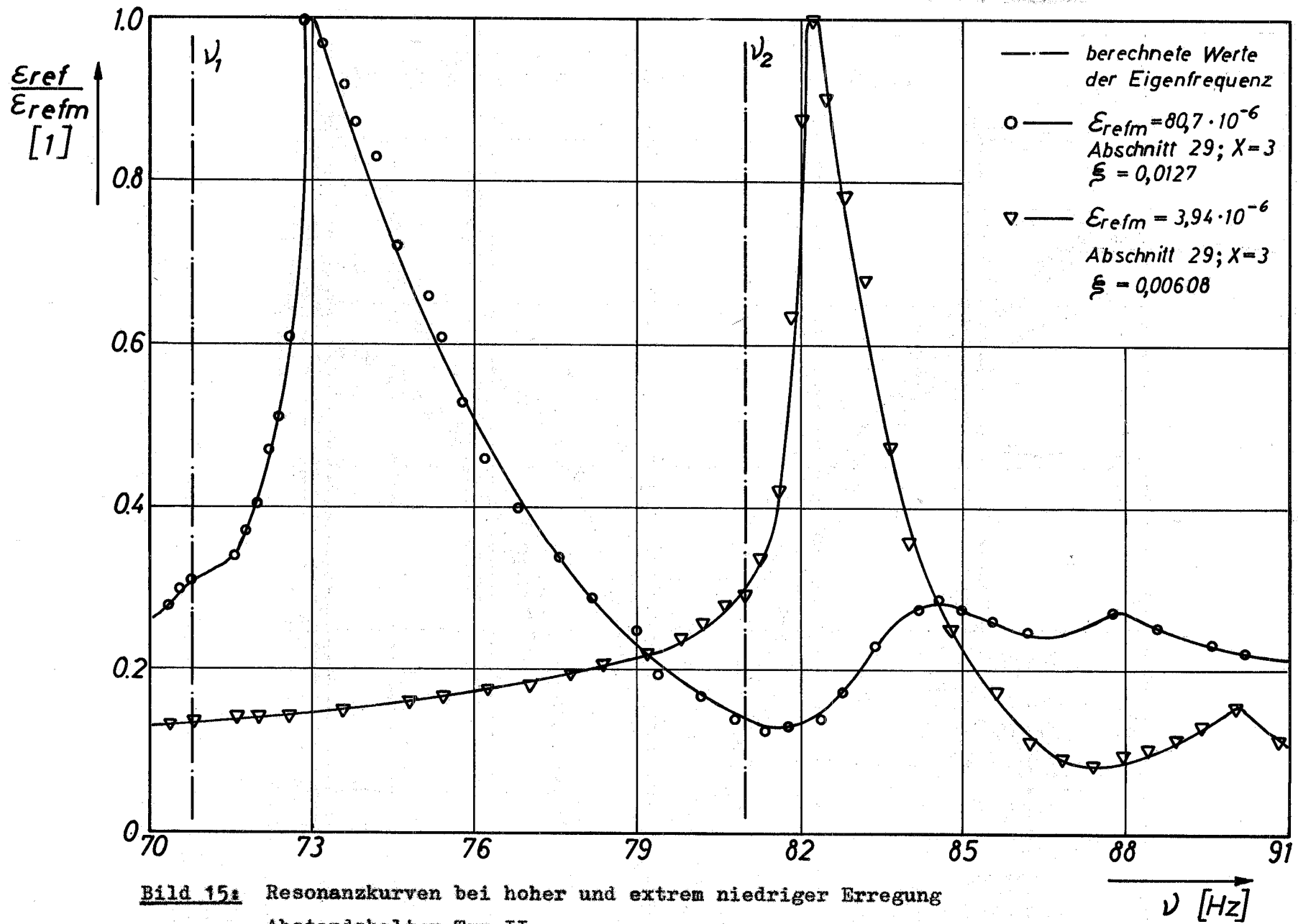


Bild 15: Resonanzkurven bei hoher und extrem niedriger Erregung
 Abstandshalter Typ II

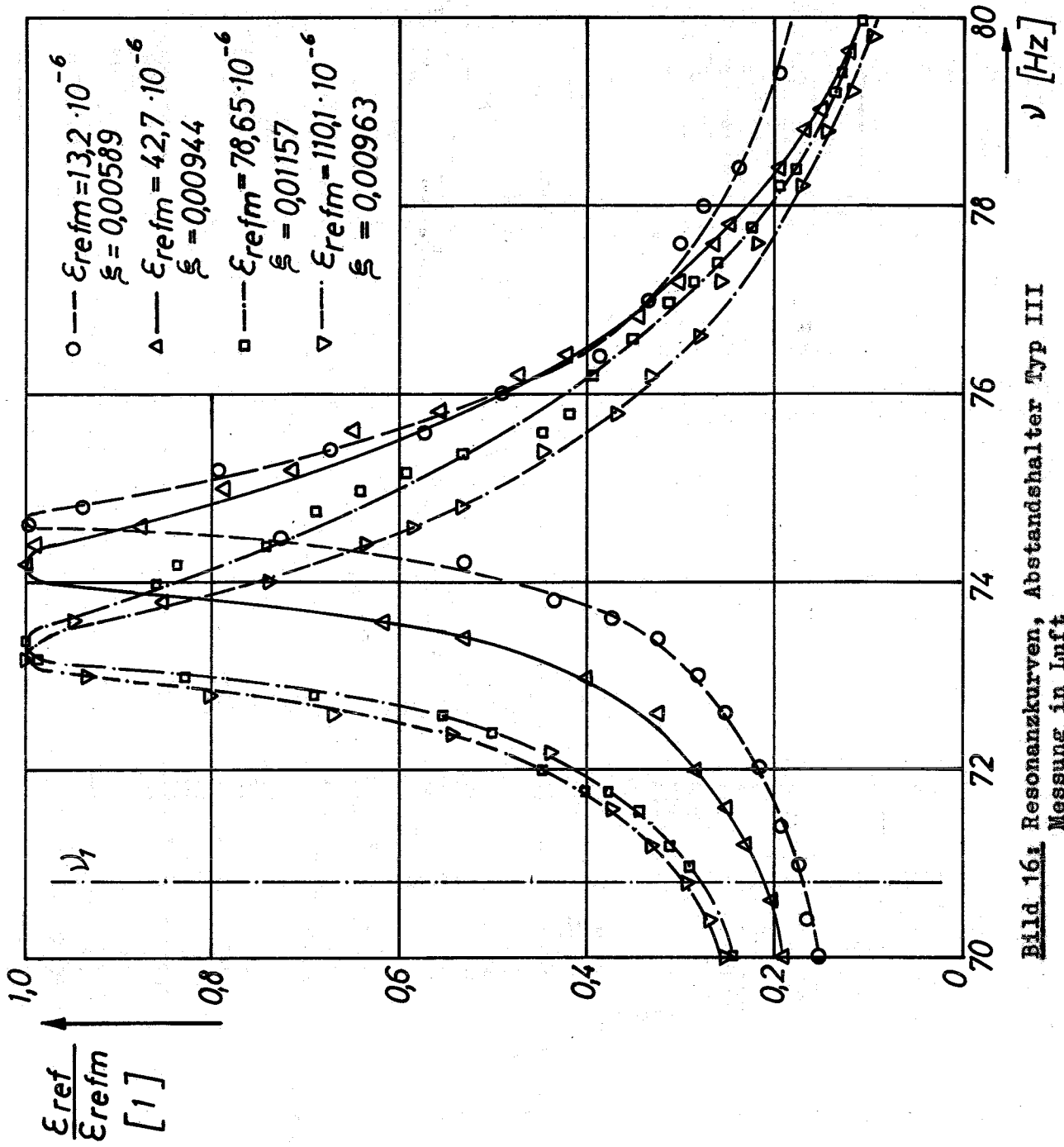


Bild 16. Resonanzkurven, Abstandshalter Typ III
Messung in Luft

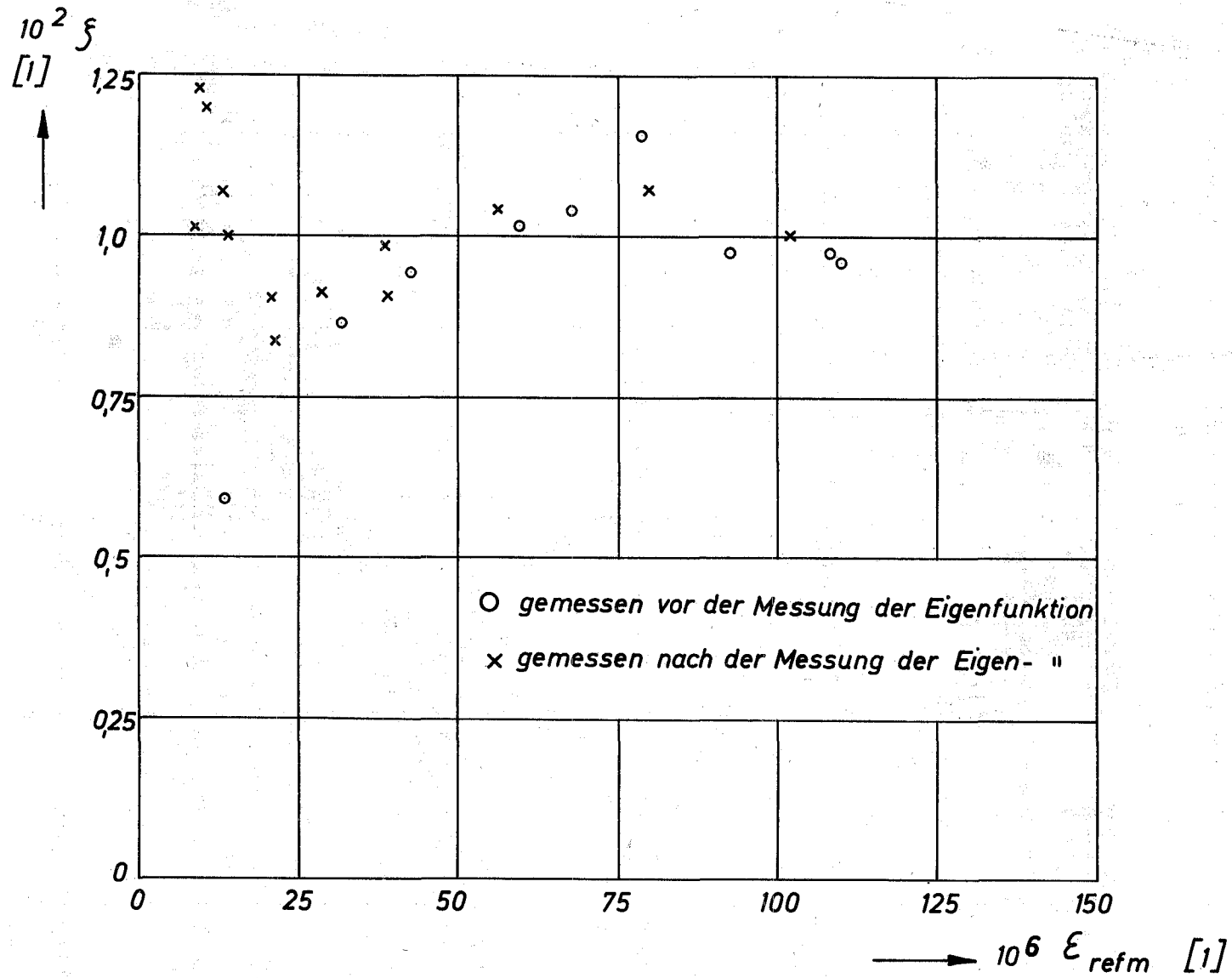


Bild 17: Abhängigkeit der Dämpfung von der Amplitude
 Abstandshalter Typ III

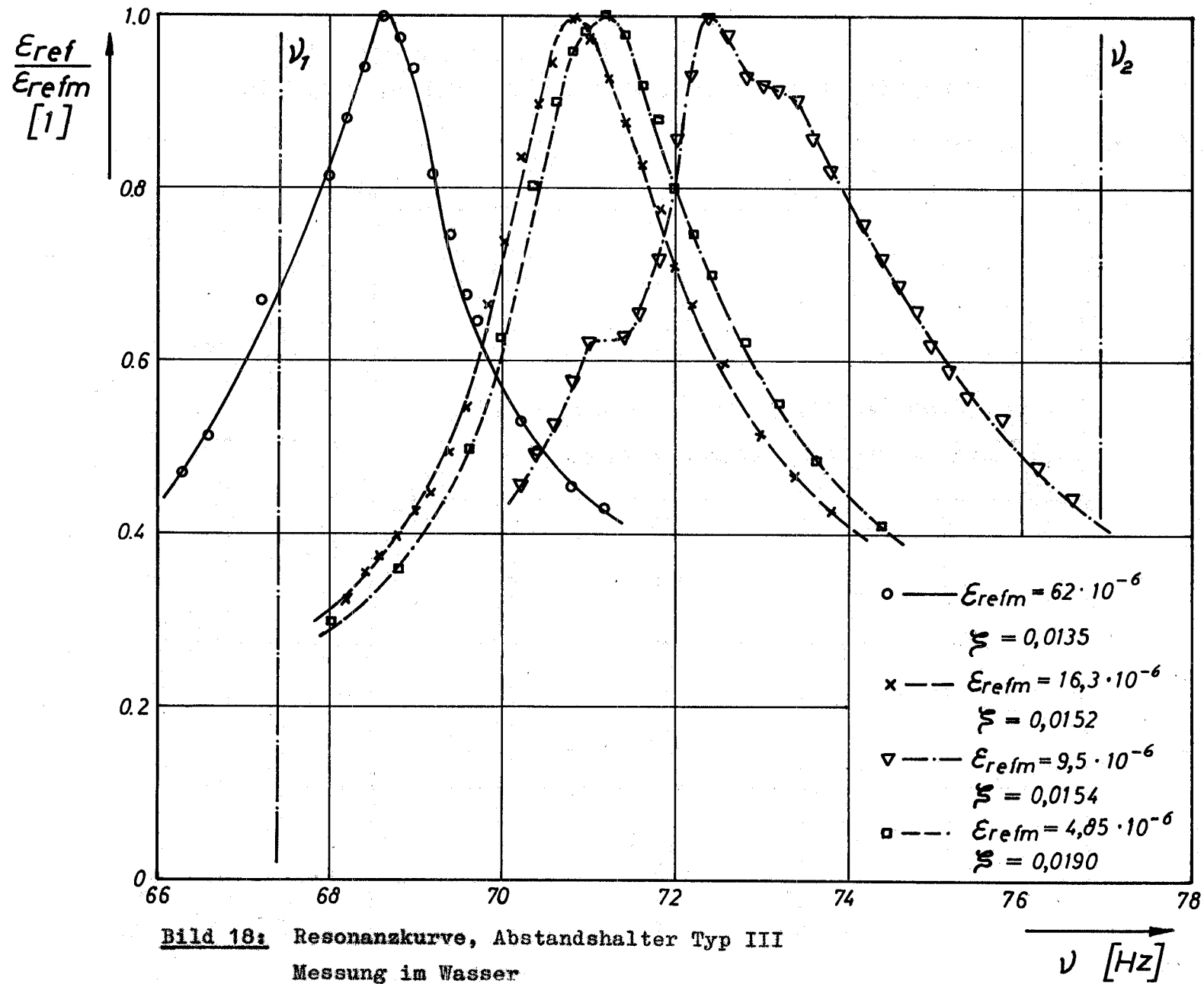


Bild 18: Resonanzkurve, Abstandshalter Typ III
 Messung im Wasser

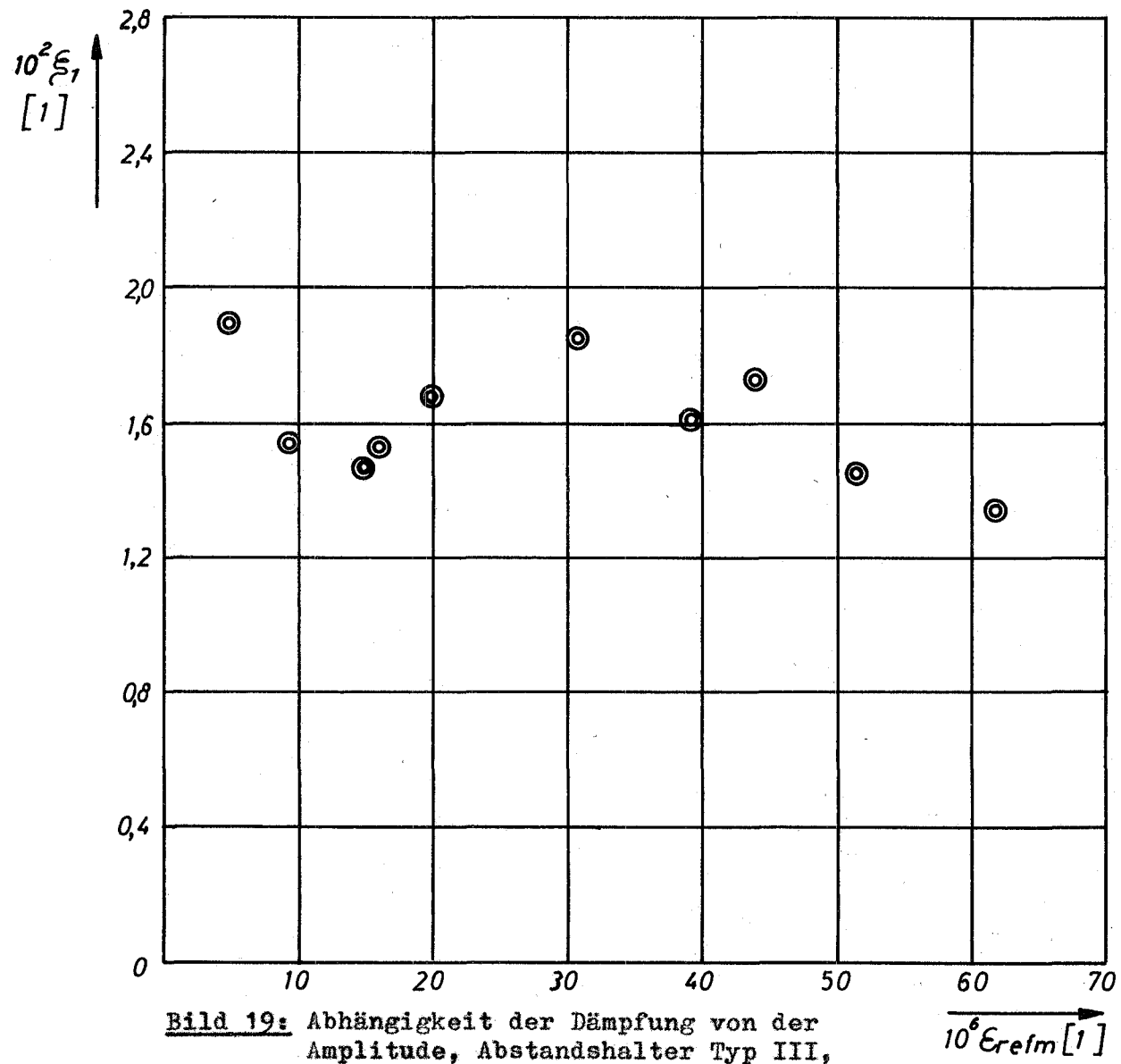


Bild 19: Abhängigkeit der Dämpfung von der Amplitude, Abstandshalter Typ III, Messung in Wasser

$10^6 E_{refm} [1]$