

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

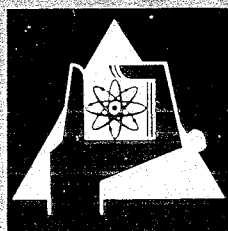
November 1969

KFK 1082

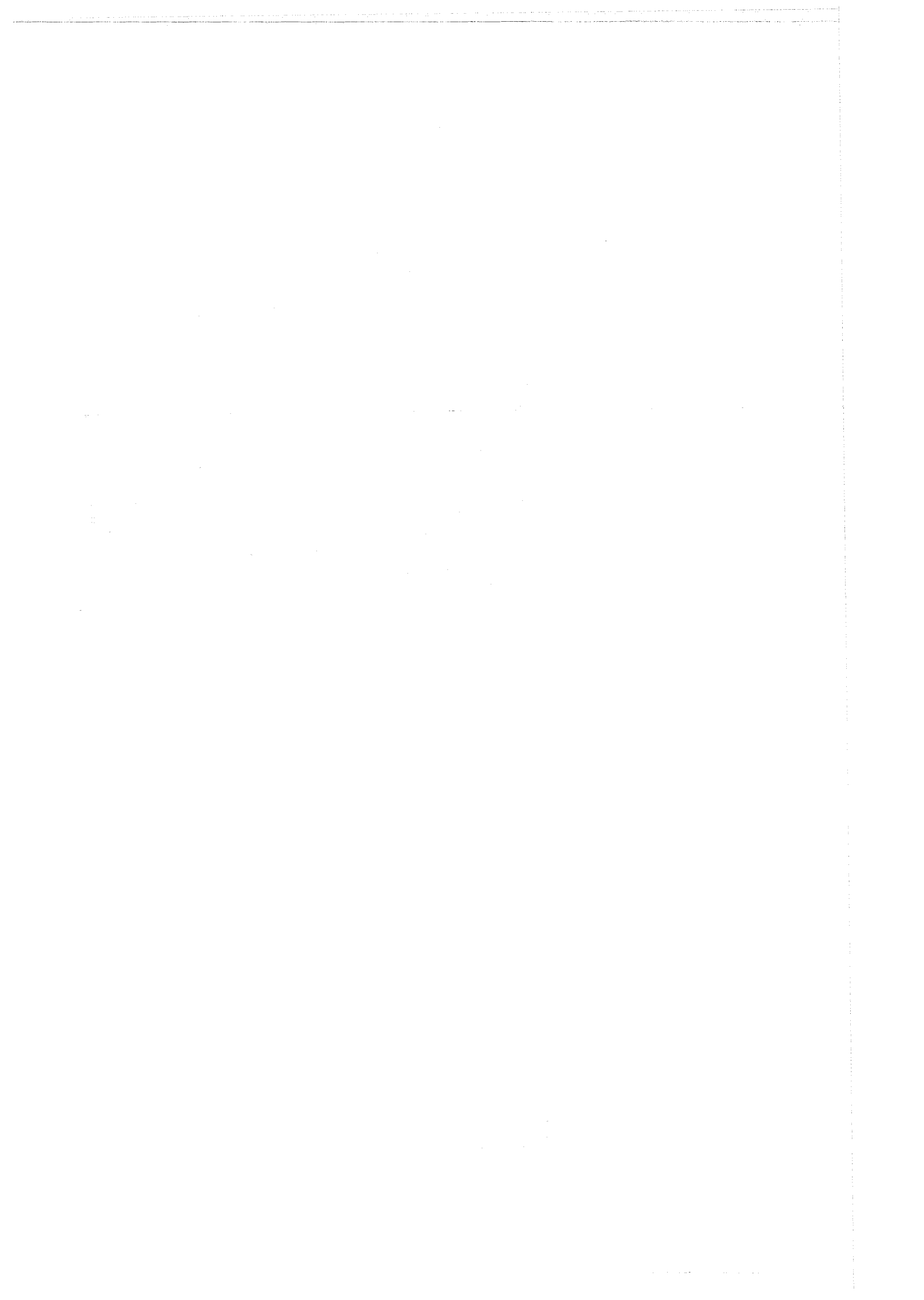
Institut für Reaktorentwicklung

Methode für die experimentelle Untersuchung des durch die
Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der Brennstäbe

J. Kadlec, K. D. Appelt



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

November 1969

KFK 1082

Institut für Reaktorentwicklung

Methode für die experimentelle Untersuchung
des durch die Kühlmittelströmung hervorgeru-
fenen Schwingungszustandes der Brennstäbe

J. Kadlec

K.D.Appelt

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

I n h a l t

Zusammenfassung	1
1.0 Formulierung der Aufgabe	2
2.0 Theoretische Betrachtungen	4
3.0 Experimentelle Untersuchungen	9
3.1 Modellsubassembly	9
3.2 Versuchskreislauf	10
3.3 Erfassung und Verarbeitung der Meßdaten	10
3.4 Versuchsergebnisse	13
3.4.1 Hydraulische Widerstände	13
3.4.2 Quadratische Mittelwerte	14
3.4.3 Korrelationsfunktionen und Spektraldichten	17
4.0 Schlußfolgerungen	21
Literaturverzeichnis	23
Anhang 1	26
Instrumentierung des Brennstabes für Schwingungsuntersuchungen im Natrium	
Anhang 2	27
Druckpulsationen im Versuchskreislauf	

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Problematik der experimentellen Untersuchung der durch die hydrodynamischen Kräfte des strömenden Kühlmittels hervorgerufenen Biegeschwingungen der Brennstäbe, welche im Subassembly durch mehrere Abstandshalter unterstützt sind. Die vorgeschlagene Untersuchungsmethode beruht auf der Bestimmung der Spektraldichtefunktion der mit Dehnungsmeßstreifen aufgenommenen Biegedehnung, die als Basis für die Berechnung der Spektraldichtefunktion der Auslenkung und der Biegespannung an anderen Stellen des Brennstabes benutzt wird. Das Verfahren wurde für die Untersuchung der Brennstabschwingung des mit Wasser durchströmten Modellsubassemblys der Na-1-Studie angewendet. Der Versuchsaufbau, die digitale Datenerfassungsanlage, sowie auch die Ergebnisse der Messung der Biegeschwingung des Brennstabes, der Querschwingung des Subassemblykastens und der Grenzschichtdruckpulsation an der inneren Wand des Subassemblykastens sind beschrieben.

Abstract

The report relates to experimental investigation of hydrodynamically induced lateral vibrations of pins of fuel subassembly with many spacer grids. The proposed investigation method is based on the determination of the spectral density function of the bending strain at one location of the pin, which is used as a basis for calculation of spectral density functions of the displacement or of the bending stress at other locations of the pin. The proposed procedure was used for the investigation of parallel flow-induced-vibration of pin of the subassembly model of the Na 1 fast breeder reactor study. The experimental setup and the digital data acquisition system are described. The RMS-values as well as the spectral density functions of the lateral vibration of the fuel pin and of the whole subassembly, as well as of the boundary layer pressure fluctuations at the subassembly wall, are presented.

1.0 Formulierung der Aufgabe

Die im Institut für Reaktorentwicklung laufenden Arbeiten auf dem Gebiet der Brennstabschwingung kann man in großen Zügen in zwei Vorhaben unterteilen:

- a) Untersuchungen der Brennstabschwingung an den Subassemblymodellen (oder Originalen) von den aktuellen Reaktortypen;
- b) Grundlagenuntersuchungen.

Ziel des ersten Vorhabens ist die Ausarbeitung und Anwendung der Untersuchungsmethode für Bestimmung des Schwingungszustandes der Brennstäbe eines in Versuchsloop oder im Reaktor eingesetzten Subassemblies. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollten bei der Bewertung der durch die Schwingung aufgetretenen Schäden (im Falle eines Integraltests oder Reaktorbetriebs), bei der Spezifizierung der Ermüdungsversuche oder bei der Optimierung der Distanzierung der Brennstäbe verwendet werden. Die Methode sollte bei den Betriebsbedingungen des Subassemblies anwendbar sein. Die zur Zeit laufenden Untersuchungen sind auf die Entwicklung der Distanzierung des SNR-Subassemblies gerichtet.

Das zweite Vorhaben bezieht sich auf systematische Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen den Distanzierungselementen, Brennstäben und dem strömenden Kühlmittel. Das Interesse richtet sich dabei auf die Erforschung von allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten, welche bei der Entwicklung von zukünftigen Reaktoren angewendet werden können.

Da beide Vorhaben sich teilweise überdecken, finden die partiellen Ergebnisse Anwendung in beiden Gebieten.

Eine allgemein theoretische Betrachtung der Brennstabschwingung, das rechnerische und das experimentelle Verfahren für die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen der freien Biegeschwingung sind in den Arbeiten [1], [3] und [3] behandelt. Anwendung dieser Methoden für die Untersuchung der Eigenfre-

quenzen, die Eigenfunktionen und der Dämpfung des Brennstabes der Na-1-Studie beschreibt die Arbeit [4].

Die vorgelegte Arbeit befaßt sich:

1. mit der Ausarbeitung der Methode für die Bestimmung des durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der in einem Subassembly assemblierten Brennstäbe;
2. mit der Anwendung dieser Methode für die Untersuchung des durch die Wasserströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der Brennstäbe der Na 1 - Studie.

Deshalb knüpft sie sowohl an die Arbeiten [1], [2] und [3], als auch an die Arbeit [4] an.

Für die Brennelemente der schnellen Brutreaktoren sind von dem Standpunkt der Brennstabschwingung folgende Merkmale charakteristisch: Große Anzahl von Abstandshaltern, kleine Abstände zwischen den sehr schlanken Stäben und Inhomogenitäten in der Masse und in der Steifigkeit entlang eines Brennstabes (Brennstoffzone, Spaltgaszone). Daraus folgt:

1. die Schwingung ist ausgeprägt stochastisch (random), so daß sie als ein stochastischer Vorgang aufgenommen und ausgewertet werden muß;
2. für die Unterbringung der Schwingungsaufnehmer sind nur sehr begrenzte Raummöglichkeiten vorhanden;
3. der gemessene Vorgang ändert sich sehr stark mit der Längskoordinate.

Dazu kommt noch die hohe Betriebstemperatur und im Falle der natriumgekühlten Brennelemente auch die hohe Aggressivität und elektrische Leitfähigkeit des Kühlmittels. Kurz zusammengefasst: das Untersuchungsverfahren muß die Bestimmung eines randomen und von der Längskoordinate abhängigen Vorganges ermöglichen, wobei die Aufnehmer selbst und die eventuellen Stromanschlüsse miniaturisiert und temperatur- und natriumbeständig werden müssen. Die konventionellen Schwingungsaufnehmer, sowie auch die entsprechenden Meß- und

Auswerteverfahren sind für diese Aufgabe nicht geeignet.

Es wird folgende Lösung dieses Problemkreises vorgeschlagen: An einer oder wenigen Stellen des Brennstabes werden die randomen Biegedehnungen (Referenzdehnungen) aufgenommen und die entsprechende Spektraldichtefunktion der Referenzdehnung ausgewertet. Diese Funktion wird mit Hilfe der berechneten oder gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenfunktionen der freien Schwingungen [2], [3] in die auf andere Längskoordinaten bezogenen Spektraldichtefunktionen der Ausdehnung^{Verformung} (oder der Biegedehnung (oder Biegespannung) rechnerisch umgewandelt.

Die theoretischen und experimentellen Einzelheiten dieses Verfahrens werden in den zwei nachfolgenden Kapiteln dieser Arbeit diskutiert. Der Versuchsaufbau, die Meßdatenverarbeitung und die Ergebnisse werden in Kapitel 3 beschrieben. Über die Anwendbarkeit dieser Methode für strömendes Natrium wird in Anhang 1 berichtet. Außerdem wird noch über die Messung der Grenzschichtpulsationen (Kapitel 3 und Anhang 2) und über die Kontrollmessung der Querschwingung des Subassemblykastens (Kapitel 3) gesprochen. Die Ergebnisse dieser Arbeit, sowie auch die daraus folgenden Empfehlungen für die zukünftigen Arbeiten auf dem Gebiet der Brennstabschwingung werden in Kapitel 4 noch kurz zusammengefaßt.

2.0 Theoretische Betrachtungen

Die für die Bewertung des Schwingungszustandes des Brennstabes benötigte Information ist in der Spektraldichtefunktion $S_y(x, \omega)$ der Auslenkung $y(x, t)$ und in der Spektraldichtefunktion $S_\sigma(x, \omega)$ der Biegespannung $\sigma(x, t)$ beinhaltet. Diese Begriffe sind in der Arbeit [1] ausführlich erläutert, die einfachen Symbole x, ω und t bezeichnen der Reihe nach die Längskoordinate, die Kreisfrequenz und die Zeit. Die Spektraldichtefunktion der Biegespannung bekommt man aus der Spektraldichtefunktion $S_\epsilon(x, \omega)$ der relativen Biegedehnung $\epsilon(x, t)$

durch einfache Multiplikation mit dem Quadrat des E-Moduls. Die nachfolgenden Ausführungen werden sich auf die Funktionen $S_y(x, \omega)$ und $S_\varepsilon(x, \omega)$ beziehen, da diese Funktionen als unmittelbare Ergebnisse einer Messung entstehen.

In der Arbeit [1] wurden für die Spektraldichtefunktionen der Auslenkung und der relativen Biegedehnung folgende Gleichungen abgeleitet

$$S_y(x, \omega) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{G_j(x) G_k(x)}{Z_j(-\omega) Z_k(\omega)} S_{\phi_{jk}}(\omega), \quad (1)$$

$$S_\varepsilon(x, \omega) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{E_j(x) E_k(x)}{Z_j(-\omega) Z_k(\omega)} S_{\phi_{jk}}(\omega), \quad (2)$$

wo

$$S_{\phi_{jk}}(\omega) = \int_0^l \int_0^l G_j(\xi_1) G_k(\xi_2) S_f(\xi_1, \xi_2; \omega) d\xi_1 d\xi_2. \quad (3)$$

In den Gleichungen (1) bis (3) treten folgende Größen auf:

$G_j(x)$ und $E_j(x)$ sind die Normal- und Dehnungsfunktionen der j-ten Schwingungsform der freien, ungedämpften Biegeschwingung des Brennstabes, welche nach den in [2] und [3] beschriebenen Verfahren rechnerisch und experimentell bestimmt werden können. Eine ausführliche, auf den Brennstab der Na 1-Studie bezogene Untersuchung dieser Funktionen ist in der Arbeit [4] beschrieben.

Die Größe $Z_j(\omega) = M_j(\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j\omega_j\omega)$ ist die mechanische Impedanz der j-ten Schwingungsform des Brennstabes; die Symbole M_j und ξ_j bezeichnen die generalisierte Masse und den Dämpfungsquotienten der j-ten Schwingungsform. Ein Verfahren für experimentelle Untersuchung dieser Größen ist in [3] erläutert; die Anwendung dieses Verfahrens auf den Brennstab der Na 1 - Studie ist in der Arbeit [4] diskutiert.

Die Größe $S_f(x_1, x_2; \omega)$ ist die Kreuzspektraldichtefunktion der die Brennstabschwingung verursachenden hydrodynamischen Kräfte des Kühlmittels [1], l bezeichnet die Brennstablänge.

Um die für uns interessanten Eigenschaften der Spektraldichtefunktionen untersuchen zu können, werden die allgemeinen Gleichungen (1) und (2) vereinfacht. Dafür werden folgende Annahmen getroffen:

$$S_f(x_1, x_2; \omega) = K^2 \delta(x_1 - x_2), \quad (4)$$

$$0 < \omega \leq \omega_g;$$

$$\int_0^l G_j^2(x) dx = \frac{M_j}{m} \quad (5)$$

Das Symbol $\delta(x_1 - x_2)$ bezeichnet die Diracsche Delta-Funktion. Die Annahme (4) bedeutet, daß die in einem Frequenzband 0 bis ω_g auf den Brennstab wirkenden randomen hydrodynamischen Kräfte des Kühlmittels konstant, und entlang des Brennstabes völlig unkorreliert sind. Diese Annahme wird in der Wirklichkeit nur teilweise erfüllt, was allerdings die Richtigkeit der nachfolgenden Ausführungen nur wenig beeinflussen kann.

Durch die Annahme (5) (m ist die mittlere Masse des Brennstabes) wird die Inhomogenität der Masse des Brennelementes im Zusammenhang mit der Wirkung der Kühlmittelkräfte vernachlässigt. Da der Einfluß dieser Inhomogenität auf die Größen ω_j , G_j und E_j dadurch nicht berührt wird, ist diese Annahme völlig plausibel.

Durch Einsatz der Ausdrücke (4) und (5) in die Gleichung (2) wird diese folgendermaßen vereinfacht:

$$S_E(x, \omega) = \sum_{j=1}^g \frac{E_j^2(x)}{|Z_j(\omega)|^2} K_j^2, \quad (6)$$

g ist der Maximalwert von j , wobei noch gilt

$$\omega_j \leq \omega_g, \quad j = 1, 2, \dots, g; \quad (7)$$

K_j ist eine Konstante.

Durch die Ableitung der Gleichung (6), welche die Spektraldichtefunktion $S_{\xi}(x, \omega)$ als eine Superposition von den Termen

$$\frac{\xi_j^2(x) K_j^2}{|Z_j(\omega)|^2}$$

darstellt, wird die gestellte Aufgabe schon wesentlich vereinfacht. Die Spektraldichtefunktion ist ein Gemisch von Beiträgen einzelner Schwingungsformen. Die Größe dieser Beiträge für eine beliebig festgelegte Frequenz wird in erster Linie davon abhängen, wie weit entfernt sich diese Frequenz von den einzelnen Eigenfrequenzen ω_j befindet. Diese Abhängigkeit wird auf Bild 1 demonstriert. Auf dem Diagramm ist die auf den Maximalwert $|Z_1(\nu_1)|^{-1}$ normierte Funktion $|Z_1(\nu)|^{-1}$ (Resonanzkurve) des Brennstabes der Na 1-Studie aufgetragen [4]. Die Kurve bezieht sich auf die Dämpfung des Brennstabes in stagnierendem Wasser. Der Verlauf der Kurve ist mit dem Verlauf der Funktion

$$\frac{|Z_1(\omega_1)|}{|Z_1(\omega)|} = \frac{|Z_1(2\pi\nu_1)|}{|Z_1(2\pi\nu)|}$$

identisch. Die aufgetragene Funktion stellt dar, wie die Amplitude $\xi_j^2(x) K_j$ des ersten Termes mit der Frequenz geändert wird. Das Maximum befindet sich bei $\frac{\nu}{\nu_1} = 1$; bei der Änderung der Frequenz um 5% beträgt die Dämpfung etwa 90%; bei der Abweichung der Frequenz von 10% wird die Amplitude schon auf mehr als 96% abgedämpft. Deshalb ist es berechtigt zu erwarten, daß in der unmittelbaren Umgebung der j-ten Eigenfrequenz die Spektraldichtefunktion bis auf einen kleinen Fehler nur durch den j-ten Term bestimmt ist. Der Fehler wird umso kleiner, je größer der Abstand zwischen den einzelnen Eigenfrequenzen wird. Bei den Brennstäben der Na 1-Studie ist $\frac{\nu_j}{\nu_{j+1}} > 1.11$, so daß der Fehler kleiner als 3% von dem Maximalwert bleibt.

Als Frequenzband der j-ten Eigenkreisfrequenz ω_j wird das Band der Kreisfrequenzen ω mit folgenden Eigenschaften definiert:

$$\omega_j' \leq \omega \leq \omega_j''; \quad (8)$$

$$S_{\xi}(\omega_j''-1) = S_{\xi}(\omega_j'), \quad S_{\xi}(\omega_j'') = S_{\xi}(\omega_{j+1}').$$

Die Grenzfrequenzen ω_j' und ω_j'' sind also solche Frequenzen an beiden Seiten von ω_j , wo die Spektraldichtefunktion ihr Minimum erreicht.

Nehmen wir an, daß an dem Brennstab eine feste Stelle mit der Koordinate x_0 ausgewählt ist, wo die relative Biegedehnung des schwingenden Brennstabes (die Referenzdehnung $\mathcal{E}_{ref}(x_0)$ im Sinne von [4]) aufgenommen wird. Die entsprechende Spektraldichtefunktion wird mit dem Symbol $\mathcal{S}_{\mathcal{E}_{ref}}(x_0, \omega)$ bezeichnet. Die Formel für die Transformation der Funktion $\mathcal{S}_{\mathcal{E}_{ref}}(x_0, \omega)$ in die Spektraldichtefunktion der relativen Biegedehnung an einer beliebigen anderen Stelle mit der Koordinate x lautet

$$\mathcal{S}_{\mathcal{E}}(x, \omega) = \mathcal{S}_{\mathcal{E}_{ref}}(x_0, \omega) \frac{\mathcal{E}_j^2(x)}{\mathcal{E}_{j,ref}^2(x_0)}, \quad (9)$$

$$\omega_j' < \omega < \omega_j'', \quad j = 1, 2, \dots, g$$

Das Symbol $\mathcal{E}_{j,ref}(x_0)$ bezeichnet den Wert der Referenzdehnung der j -ten Schwingungsform, auf welchen die Dehnungsfunktion $\mathcal{E}_j(x)$ und die Normalfunktion $G_j(x)$ normiert sind. In den Arbeiten [2], [3] und [4] wurde für die Normierung der Wert $\mathcal{E}_{j,ref}(x_0) = 10^{-4}$ benutzt.

Die Formel für die Transformation der Spektraldichtefunktion $\mathcal{S}_{\mathcal{E}_{ref}}(x_0, \omega)$ der Referenzdehnung in die Spektraldichtefunktion $\mathcal{S}_y(x, \omega)$ der Auslenkung $y(x, t)$ lautet dann

$$\mathcal{S}_y(x, \omega) = \mathcal{S}_{\mathcal{E}_{ref}}(x_0, \omega) \frac{G_j^2(x)}{\mathcal{E}_{j,ref}^2(x_0)}, \quad (10)$$

$$\omega_j' < \omega < \omega_j'', \quad j = 1, 2, \dots, g.$$

Die abgeleiteten Gleichungen werden ihre Richtigkeit auch für den Fall behalten, wenn die Kreisfrequenz ω durch die einfache Frequenz ν ersetzt wird, was der besseren Anschaulichkeit wegen öfters benutzt wird.

3.0 Experimentelle Untersuchungen

An dem in einem Wasserversuchskreislauf eingebautem Modellsubassembly mit 36 Modellstäben und einem instrumentierten Originalbrennstab wurden folgende Größen gemessen: der hydraulische Widerstand des Stabbündels und des Gitterabstandshalters, die Biegeschwingung des Brennstabes, die Druckpulsationen in der Grenzschicht des strömenden Wassers an der Innenwand des Subassemblykastens und die Querschwingung des Subassemblykastens. Die statistischen Momente erster und zweiter Ordnung und die Spektraldichtefunktionen der gemessenen dynamischen Größen wurden ermittelt.

3.1 Modellsubassembly

Das Modellsubassembly und der Brennstab sind auf Bild 2 schematisch dargestellt. Die Geometrie dieses Subassemblys stimmt überein bis auf die reduzierte Brennstabzahl mit der Geometrie des Subassemblys der Na 1-Studie [5]. Der Brennstab besteht im wesentlichen aus einem austenitischen Hüllrohr (Werkstoff Nr.4550) von $6,7 \text{ mm} \varnothing \times 0,35 \text{ mm}$ mit einvibriertem UO_2 - Brennstoff. Bei den Modellstäben wird der Brennstoff mit Hohlbleipellets (mit der gleichen Masse) simuliert. Die Stäbe werden in Übereinstimmung mit der Na 1-Studie an 9 Stellen unterstützt. Die dabei benutzten Abstandshalter entsprechen dem Wabengitterabstandshalter der Na 2-Studie [6] (Bild 3).

Zur Aufnahme der Referenzdehnung ϵ_{ref} wurde eine Paarung der gekapselten DMS Type SG-122-2A-3 der Firma Microdot an den Brennstab angepunktet [4]. Die Kapillaren mit den Anschlußdrähten wurden durch eine Gummidichtung zwischen den Flanschen aus dem Modell herausgeführt. Ein Gesamtblick auf das Stabbündel mit den Anschlußkapillaren und die äußere Sechskanthülle des Modellsubassemblys zeigt Bild 4.

Zur Aufnahme der Druckpulsationen wurden piezoelektrische Druckaufnehmer der Firma Kistler benutzt. Die Aufnehmer wurden in die Hüllwand des Versuchsmodells so eingebaut, daß die Membrane (Membranendurchmesser 5 mm) des Aufnehmers mit der Innenwand der Modellhülle eine

Ebene bildet (Meßstellen II, III und IV, Bild 1). Auf ähnliche Weise wurden auch die Ein- und Auslaufstutzen des Versuchsmodells mit den Druckaufnehmer instrumentiert (Meßstellen I und V). Für die Bestimmung der hydraulischen Widerstände wurden an die Modellhülle Stutzen für statische Druckmessung angeschweißt (Meßstellen 1 bis 8).

Zur Aufnahme der Querschwingung des Versuchsmodells wurde an die äußere Wand der Sechskanthülle ein Beschleunigungsaufnehmer Type B1M der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik befestigt. Die Meßrichtungen des Beschleunigungsaufnehmers, der DMS-Paarung und der Druckaufnehmer stimmten überein.

3.2 Versuchskreislauf

Der Versuchskreislauf wird auf Bild 5 schematisch dargestellt. Die Umlaufpumpe Type HK 612 (2 Stufen, 6 Schaufeln, 2940 U/min, 30 kW) der Firma Lederle fördert bei der Förderhöhe 78 mWS $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$. Die Rohrleitungsschleife (Rohrdurchmesser 100 mm) mit den Krümmern, sowie auch das Drosselventil wurden mit der Zielsetzung eines minimalen Störpegels der Druckpulsationen konstruiert. Die dadurch erzielten Ergebnisse werden noch im Anhang diskutiert.

Für die Messung des Wasserdurchsatzes wurde Normblende gemäß den VDI-Durchflußmeßregeln DIN 1952 mit einem Durchflußmesser Type TDA 310 der Firma Hartmann und Braun und einem dazu parallel angeschlossenen U-Rohr-Manometer in eine Meßstrecke eingebaut. Mit einem zweiten U-Rohr-Manometer wurden die statischen Druckdifferenzen am Subassembly gemessen. Die Wassertemperaturen vor der Blende und vor der Teststrecke wurden mit geeichten Fe-Konstantan-Thermoelementen mit angeschlossenen Thermospannungsmesser Type m V 38 der Firma Knick gemessen.

3.3 Erfassung und Verarbeitung der Meßdaten

Der Wasserdurchsatz und die entsprechenden, auf das glatte Stabbündel bezogenen mittleren hydrodynamischen Größen (Wassergeschwindigkeit w ,

dynamischer Druck q und Reynoldszahl Re) wurden mit einem Rechenprogramm auf der Rechenanlage IBM 7074 berechnet. Die dafür benötigten Eingangsgrößen: Druckabfall an der Blende, Wassertemperatur vor der Blende und die mittlere Wassertemperatur am Modell wurden an den Meßgeräten abgelesen und auf die Lochkarten manuell übertragen. Es ist allerdings vorgesehen, die Erfassung und Verarbeitung der hydrodynamischen Größen automatisch vorzunehmen. Dafür wird die Datenerfassungsanlage benutzt, auf welche in diesem Paragraph noch näher eingegangen wird.

Die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes des Abstandshalters (Meßstellen 3 und 4) und des 220 mm langen Abschnittes des glatten Stabbündels (ohne Abstandshalter-Meßstellen 4 und 5) erfolgte nach der Gleichung

$$f = \frac{\Delta p}{\rho} \quad (11)$$

Der Druckverlust Δp an dem Abstandshalter enthält dabei den Anteil vom Stabbündelabschnitt vor und hinter dem Abstandshalter, welcher bei der Auswertung nicht abgezogen wurde. Der Widerstandsbeiwert f wird gegen die Reynoldszahl Re graphisch aufgetragen. Der entsprechende hydraulische Durchmesser bezieht sich auf den freien Strömungsquerschnitt des Stabbündels zwischen den Abstandshaltern.

Die Bestimmung der quadratischen Mittelwerte der Referenzdehnung $\sqrt{\epsilon_{ref}^2}$, der Druckpulsationen $\sqrt{p^2}$ und der Beschleunigung $\sqrt{a^2}$ erfolgte auf zweierlei Weise:

- a) direkte Ablesung auf dem Effektivvoltmeter;
- b) Berechnung der Werte aus der Korrelationsfunktion, beziehungsweise der Spektraldichtefunktion. Z.B. errechnet man den quadratischen Mittelwert der Biegedehnung in dem Frequenzband der j -ten Eigenfrequenz nach der Formel

$$\sqrt{\epsilon_j^2} = \sqrt{\int_{\nu_j'}^{\nu_j''} S_{\epsilon}(\nu) d\nu} \quad (12)$$

als Wurzel aus der Fläche im Diagramm der Spektraldichte im Frequenzintervall (ν_j', ν_j'') .

Die Meßgeräteanordnung für die direkte Messung der quadratischen Mittelwerte zeigt Bild 6. Die DMS-Halbbrücke, sowie auch den Beschleunigungsaufnehmer wurden an die Trägerfrequenzmeßverstärker Type KWS/II-5 (Trägerfrequenz 5 kHz) der Firma Hottinger-Baldwin Meßtechnik angeschlossen. Die Druckaufnehmer wurden von den Ladungsverstärkern Type EOM V 21 der Firma Hartmann u. Braun versorgt. Die verstärkten Signale wurden mit dem Effektivvoltmeter Type 3400 A der Firma Hewlett-Packard gemessen. Parallel dazu wurden sie auf dem Schirm eines Zweistrahl-Oszillographen Type H2V18 der Firma Hottinger-Baldwin Meßtechnik sichtbar gemacht; der Zeitverlauf der Signale wurde mit einer Polaroid-Kamera Typ Oscillophot M1 der Firma Steinheil aufgenommen. Die quadratischen Mittelwerte wurden auf den entsprechenden Wert des dynamischen Druckes q normiert und gegen die Reynoldszahl Re graphisch aufgetragen.

Die Bestimmung von Korrelationsfunktionen und Spektraldichten erfolgte in zwei Etappen. In der ersten Etappe wurden die verstärkten Meßsignale von einer Datenerfassungsanlage Modell RG 350 der Firma ERA mit einer hohen Frequenz abgefragt, digitalisiert und in digitaler Form auf einem Magnetband gespeichert. In der zweiten Etappe wurden die beschriebenen Bänder auf der Rechenanlage IBM 360/65 ausgewertet.

Das Blockschema der Datenerfassungsanlage zeigt Bild 7. Die Anlage wird von einem Prozessrechner Type 703 der Firma Raytheon gesteuert. Um die Gleichzeitigkeit der Kanalabfrage zu gewährleisten, werden vor dem elektronischen Multiplexer die Sample- and-Hold-Verstärker vorgeschaltet. Die Daten werden auf das Magnetband blockweise geschrieben; ein Block besteht aus 1024 12-Bits-Worte. Es werden zwei Magnetbandgeräte der Firma Ampex benutzt. Die an der Maschine Type TM 12 mit hoher Bitdichte (800 Zeilen/Zoll) registrierten Daten werden von dem Prozessrechner geprüft und an der Maschine Type TM7 in einem mit der Rechenanlage IBM 360/65 kompatiblen Format neu registriert. Die Anlage kann z.Zt. maximal mit 16 Eingangskanälen betrieben werden; die maximale Abfragefrequenz beträgt 40 000 Daten/sec.

Die auf dem Magnetband gespeicherten Meßdaten werden von der Rechenanlage IBM 360/65 nochmals eingelesen und statistisch ausgewertet.

Bis jetzt wurden Rechenprogramme für die Bestimmung von Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen und den entsprechenden ersten Abschätzungen (im Sinne von Bendat und Piersol [7]) der Spektraldichtefunktion aufgestellt.

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Hydraulische Widerstände

Die Widerstandsbeiwerte ξ des dritten Gitterabstandshalters, sowie auch des 220 mm langen glatten Abschnittes des Subassemblymodells, sind auf Bild 8 gegen die Reynoldszahl aufgetragen. Auf den Gitterabstandshalter allein bezogener Widerstandsbeiwert beträgt $\xi = 2,1$. Dieser Wert ist ziemlich groß. Da außerdem

- 1) die Abnutzungsbeständigkeit (in Bezug auf Brennstabschwingung) dieses Abstandshaltertyps nicht befriedigend ist [4] und
- 2) mit einer größeren Anzahl der Abstandshalter im Subassembly gerechnet werden muß, was einen sehr großen Druckverlust am Reaktorvore zur Folge hat,

wäre es zu empfehlen, die Konstruktion des Abstandshalters nochmals zu prüfen.

Die nach Formel

$$\lambda = \frac{D_H}{\rho} \xi \quad (13)$$

ermittelten λ -Werte des glatten Stabbündels sind kleiner als die entsprechenden Werte eines glatten Rohres mit dem gleichen hydraulischen Durchmesser D_H und mit der gleichen relativen Rauigkeit. Diese Tatsache kann man nur mit der Vermutung erklären, daß die Verwirbelung des Wasserstromes im Subassembly viel größer ist als die, welche nur durch die Wirkung der Reibung in der Grenzschicht eines durchströmten Rohres bei gleicher Reynoldszahl entstehen kann. In anderen Worten kann man sagen, daß die Verwirbelung des Wasserstromes vor dem Subassembly und die Wirkung der Gitterabstandshalter im Sinne der Erhöhung der Reynoldszahl wirken. Zugunsten dieser Behauptung sprechen zwei Argumente:

- 1) nur geringe Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes von der Reynoldszahl. Im Bereich der Reynoldszahlen $(1,7 \div 3,8) \cdot 10^4$ kann eine solche schwache Abhängigkeit nur bei sehr großer relativer Rauigkeit erreicht werden (etwa bei 5%), während in unserem Fall die relative Rauigkeit nur $1 \div 2\%$ beträgt.
- 2) Wie es noch im nächsten Absatz ausführlich beschrieben wird, liegt der gemessene Pegel der Druckpulsationen etwa eine Zehnerpotenz höher als der, welcher in der Grenzschicht eines durchströmten Rohres entsteht.

Diese beiden Erscheinungen beweisen eine stark erhöhte Verwirbelung des Wasserstromes.

3.4.2 Quadratische Mittelwerte

Der quadratische Mittelwert $\sqrt{\epsilon_{ref}^2}$ der Referenzdehnung, dividiert durch den entsprechenden Wert des dynamischen Druckes ρ , wird auf Bild 9 über der Reynoldszahl aufgetragen. Aus dem Diagramm folgt, daß für $Re > 3 \cdot 10^4$ die Abhängigkeit der Größe $\sqrt{\epsilon_{ref}^2} / \rho$ von der Reynoldszahl verschwindet, so daß der quadratische Mittelwert $\sqrt{\epsilon_{ref}^2}$ dem dynamischen Druck ρ direkt proportional wird. Die direkte Proportionalität zwischen dem dynamischen Druck und der Schwingungsamplitude wurde bei der Ableitung einer vereinfachten Formel ($\square 8$], Formel (7)) für eine erste Abschätzung der Amplitude der durch die Kühlmittel hervorgerufenen Brennabtschwingung angenommen. Durch das oben genannte Ergebnis wurde die Berechtigung dieser Annahme bestätigt.

Um die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse zu prüfen, wurde die oben angeführte Messung in sechs Meßreihen bei verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Die Erhöhung der Wassertemperatur hat eine Verschiebung der Meßkurve in Richtung der höheren Reynoldszahlen zur Folge gehabt. Dagegen hat die Ersetzung der Einlaufstrecke zwischen dem Regelventil und dem Versuchsmodell durch einen gekrümmten Gummischlauch mit 100 mm Innendurchmesser eine umgekehrte Tendenz verursacht. In diesem Fall wurde die faktische Unabhängigkeit der Größe $\sqrt{\epsilon_{ref}^2} / \rho$ von Reynoldszahl schon bei $Re = 1,5 \cdot 10^4$ erreicht. Ähnliche Tendenzen, welche auf

den Mechanismus der Erzeugung, Verbreitung und Dämpfung der Druckpulsationen in dem Versuchskreislauf zurückzuführen sind, wurden auch bei der Messung der Druckpulsationen und der Schwingung des Versuchsmodells beobachtet.

Die Abhängigkeit der mittleren quadratischen Referenzdehnung von den hydrodynamischen Größen kann man durch folgende Formel beschreiben:

$$\frac{\sqrt{\epsilon_{\text{ref}}^2}}{q} = C_1 Re^{-C_2} + C_3 \quad (14)$$

Die Konstante C_3 ist für alle Messungen gleich, $C_3 = 4,5 \cdot 10^{-10}$. Die Konstanten C_1 und C_2 werden für verschiedene Bedingungen am Versuchskreislauf unterschiedlich. Der Wert des Exponents C_2 ist verhältnismässig hoch (z.B. für die dritte Meßreihe $C_2 = 3,8$). Das hat zur Folge, daß für höhere Reynoldszahlen die Abhängigkeit von der Reynoldszahl schnell verschwindet.

Auf die oben angeführte Erscheinung kann man offensichtlich die aus der Literatur bekannten Unterschiede in der Angabe des Exponents bei der Abhängigkeit der mittleren Schwingungsamplitude von der Kühlmittelgeschwindigkeit zurückführen. Je nach dem, in welchem Bereich der Reynoldszahlen die Messung durchgeführt wird, kann man aus dem Diagramm verschiedene Werte des Exponents für die Kühlmittelgeschwindigkeit ablesen.

Auf die gleiche Ursache kann man auch die Diskrepanzen in den Meinungen in Bezug auf die Dämpfung zurückführen. An der Gesamtdämpfung ist die Material- und Strukturdämpfung, sowie auch die viskose Dämpfung beteiligt. Was die Material- und Strukturdämpfung anbelangt, wurde in [4] eine schwache Abhängigkeit des Dämpfungsquotienten von der Schwingungsamplitude beobachtet. Diese Abhängigkeit ist so gering, daß sie sich bei den kleinen Änderungen der Schwingungsamplitude, welche bei den Versuchen stattfinden, kaum auswirken kann. Das stimmt auch mit dem für $Re > 3 \cdot 10^4$ geltenden Teil des Diagramms völlig überein. Ansonsten hätte sich eine stärkere Abhängigkeit des Dämpfungsquotienten von der Schwingungsamplitude auf dem Diagramm bemerkbar machen müssen.

Die Resultate der Messung der Druckpulsationen sind auf den Diagrammen 10 bis 14 angeführt. Der quadratische Mittelwert $\sqrt{p^2}$ der Druckpulsationen wird auch hier auf den entsprechenden Wert des auf das glatte Stabbündel bezogenen dynamischen Druckes ρ normiert; das gilt auch für die Druckpulsationen vor und hinter dem Versuchsmodell (Bild 10 und 14). In Richtung von der Meßstelle I bis zur Meßstelle V streuen die auf die großen Reynoldszahlen bezogenen Werte in den Grenzen 0,22 - 0,26; 0,16 - 0,25; 0,06 - 0,18; 0,06 - 0,19 und 0,10 - 0,12. Diese abnehmende Tendenz kann man so interpretieren, daß die Druckpulsationen schon vor dem Versuchsmodell im Versuchskreislauf entstehen und im Versuchsmodell abgedämpft werden. Sie überlagern sich den Pulsationen, die im Versuchsmodell hinter den Abstandshaltern und anderen Hindernissen im Subassembly entstehen. Es ist zu bemerken, daß die in idealen Teststrecken in der Grenzschicht der strömenden Flüssigkeit erzeugten Druckpulsationen etwa eine Zähnerpotenz kleiner sind.

Interessant ist, daß die bei den Druckpulsationen beobachtete starke Streuung der aufgenommenen Kurvenscharen keine entsprechende Parallele im Diagramm der Brennstabschwingungen (Bild 9) hat. Daraus kann man schließen, daß die Brennstabschwingung in Bezug auf die von außen in das Subassembly hineingeschleppten Druckpulsationen nicht sehr empfindlich ist. Diese Tatsache ist für die Übertragbarkeit der in Versuchskreisläufen gewonnenen Ergebnisse auf den Zustand im Reaktor von großer Bedeutung. Es ist allerdings zu empfehlen, daß dieses Problem in der Zukunft noch genauer untersucht wird.

Die Resultate der mit einem Beschleunigungsaufnehmer durchgeführten Messung der Querschwingung des Subassemblykastens sind auf Bild 15 angeführt. Der quadratische Mittelwert $\sqrt{a^2}$ der Beschleunigung, dividiert durch den mittleren dynamischen Druck ρ , wird gegen die Reynoldszahl Re aufgetragen. Die Form der Kurve, sowie auch die Auswirkung der höheren Wassertemperatur und der dämpfenden Einlaufstrecke sind ähnlich wie im Fall der Brennstabschwingung und der Druckpulsationen. Daraus kann man schließen, daß auch die Schwingung des Subassemblykastens im wesentlichen durch die Wirkung der Druckpulsationen verursacht wird.

3.4.3 Korrelationsfunktionen und Spektraldichten

Die Autokorrelationsfunktion der relativen Biegedehnung $R_{\text{Bref}}(\tau)$, der Beschleunigung des Subassemblykastens $R_a(\tau)$ (untere Meßstelle), der Druckpulsationen $R_{\text{PIII}}(\tau)$ und $R_{\text{PIV}}(\tau)$ (Meßstellen III und IV) sind auf Bild 16 als Funktionen der Verzögerung τ aufgetragen. Die Abfragefrequenz beträgt 5000 Abfragen/Kanal.sec. Die Messung wurde bei dem vollen Wasserdurchsatz durchgeführt, $w = 7,05 \text{ m/sec}$, $\rho = 2574 \text{ kp/m}^2$ und $Re = 3,75 \cdot 10^4$. Aus den Diagrammen folgt, daß es sich um korrelierte stochastische Vorgänge mit ausgeprägtem quasi-periodischem Gehalt handelt. Die Perioden dieser Vorgänge betragen etwa 3,4; 1,4; 13 und 13 msec, was in Frequenzen ausgedrückt etwa 300, 720, 77 und 77 Hz sind. Bei diesen Frequenzpunkten sind die Maximalwerte im Diagramm der Spektraldichte zu erwarten. Aus den Diagrammen kann man noch abschätzen, daß die Kupplung zwischen der Schwingung des Subassemblykastens und den Druckpulsationen auf der einen Seite, und der Brennstabsschwingung auf der anderen Seite nur verhältnismäßig schwach wird. Die näheren Einzelheiten lassen sich allerdings nur bei der Untersuchung der Spektraldichtefunktionen ableiten.

Die den angeführten Korrelationsfunktionen entsprechenden Spektraldichtefunktionen sind auf Bild 17 aufgetragen. Um zunächst eine Übersicht über ein breiteres Frequenzspektrum zu bekommen, wurde die Grenzfrequenz auf 2500 Hz festgelegt; die äquivalente Filterbandbreite beträgt 10 Hz. Aus den Diagrammen folgt, daß der wesentliche Teil der Schwingungsenergie im Frequenzspektrum bis etwa 500 Hz enthalten ist, was eine Herabsetzung der Grenzfrequenz und damit auch eine Verkleinerung der äquivalenten Filterbandbreite ermöglicht. Davon wird noch weiter in diesem Paragraph Gebrauch gemacht.

Die Kurven hatten gemeinsame Maxima bei den Frequenzen von etwa 20, 80, 200 und 300 Hz. Die Frequenz 300 Hz z.B. stimmt mit der Frequenz der Druckpulsationen in der Pumpe gut überein (6 Schaufeln x 49 Umdrehungen/sec). Die schwingungserzeugende Energie kann von der Quelle zu den Brennstäben sowohl über das strömende Wasser, als auch über die Rohrleitung übertragen werden. Die diskrete Struktur der Spektral-

dichtefunktionen der Druckpulsationen deutet darauf hin, daß eventuelle Resonanzen in der Rohrleitung stattfinden können. Solche Erscheinungen wurden auf dem Schirm des Kathodenstrahloszillographen auch tatsächlich beobachtet und zwar bei niedrigeren Wassergeschwindigkeiten, wo eine intensive Wirbelbildung hinter dem Regelventil zu erwarten ist. Die dadurch entstehenden, fast harmonischen, starken Druckpulsationen können sich auf die Brennstabschwingung ungünstig auswirken, wie es auf Bild 18 demonstriert wird. Die beiden Photographien wurden bei dem gleichen mittleren Wasserdurchsatz aufgenommen. Nach der oberen Photographie findet eine einfache Resonanz zwischen den Druckpulsationen und der Brennstabschwingung statt; nach der unteren Photographie wird die Grundfrequenz verdoppelt. Die Tatsache, daß die Druckpulsationen, welche die Brennstabschwingung verursachen, selbst aus anderen Teilen des Versuchskreislaufes in die Teststrecke hineingeschleppt werden können, hat folgende zwei Probleme zur Folge:

- 1) Voraussetzung für die Durchführung der Brennstabschwingungsuntersuchungen ist es, daß die dabei gewonnenen Ergebnisse auf den Betriebszustand im Reaktor völlig übertragbar sind. Eine Überprüfung dieser Übertragbarkeit wird also von Bedeutung sein. Da zur Zeit noch keine Ergebnisse aus Vergleichsmessungen im Reaktor und im Versuchslauf vorliegen, wird zunächst eine Reihe von Vergleichsmessungen an verschiedenen Versuchskreisläufen im IRE und bei Euratom-Ispra durchgeführt.
- 2) Das hohe Niveau der von dem Versuchskreislauf herrührenden Druckpulsationen wird sich den Druckpulsationen, welche in der Strömungsgrenzschicht entstehen, überlagern und dadurch die auf das Sub - assembly bezogenen Meßwerte verfälschen. Um das zu vermeiden, wird der vorhandene Versuchskreislauf umgebaut. Im Anschluß daran werden dann die geplanten Untersuchungen der Mikrostruktur der Kühlmittelströmung und die Korrelationsmessungen zwischen den Druckpulsationen und der Brennstabschwingung in Angriff genommen. Auf das Problem des Umbaus des Kreislaufes wird im Anhang nochmals kurz eingegangen.

Die Feinstruktur der Brennstabsschwingung ist auf Bild 19 gut ersichtlich. Auf dem obersten Diagramm wird die Spektraldichte $S_{\epsilon}(\nu)$ der Referenzdehnung aufgetragen; weiter folgen die Spektraldichte $S_a(\nu)$ der Beschleunigung des Subassemblykastens (untere Meßstelle) und der reale und der imaginäre Teil $C_{\epsilon a}(\nu)$ und $Q_{\epsilon a}(\nu)$ (Co - spectral density function und quadrature spectral density function - [7]) der Kreuzspektraldichtefunktion $S_{\epsilon a}(\nu)$ der relativen Dehnung ϵ_{ref} und der Beschleunigung a . Es gilt [7]

$$S_{\epsilon a}(\nu) = C_{\epsilon a}(\nu) - i Q_{\epsilon a}(\nu), \quad (15)$$

wo $i = \sqrt{-1}$. Die Messung wurde bei $w = 6,8 \text{ m/sec}$ durchgeführt; $Re = 3,66 \cdot 10^4$, $t_{\text{wasser}} = 20^\circ\text{C}$. Die Grenzfrequenz beträgt 1250 Hz, die äquivalente Filterbandbreite beträgt 2,5 Hz. Erst durch diese schmale Filterbandbreite wird es ermöglicht, die den einzelnen Eigenfrequenzen entsprechenden Frequenzbänder voneinander zu unterscheiden. Aus dem Diagramm der Kreuzspektraldichte folgt, daß die beiden Signale im Frequenzband von 175 bis 500 Hz miteinander korreliert sind. Daraus kann man schließen, daß die auf dieses Frequenzband bezogene Brennstabsschwingung durch die Erschütterungen der Teststrecke verursacht wird. Die nachfolgende Analyse wird sich deshalb nur für den Bereich der niedrigsten Eigenfrequenzen des Brennstabes begrenzen.

Auf dem Diagramm der Spektraldichtefunktion $S_{\epsilon}(\nu)$ sind die in Arbeit [4] berechneten vier Eigenfrequenzen des Brennstabes ν_1 bis ν_4 durch vertikale Linien angedeutet. Die Übereinstimmung zwischen den berechneten Eigenfrequenzen und den Positionen der Peaks im Diagramm ist sehr gut und die den einzelnen Eigenfrequenzen zugeordneten Frequenzbänder sind deutlich zu erkennen. Daraus kann man schließen, daß die in Kapitel 2 getroffenen Annahmen plausibel sind. Die aus der Spektraldichtefunktion $S_{\epsilon}(\nu)$ nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren umgerechneten Spektraldichtefunktionen werden auf den Bildern 20 bis 23 dargestellt. Die aus diesen Funktionen nach Gleichung (12) berechneten, den einzelnen Frequenzbändern zugeordneten quadratischen Mittelwerte der relativen Dehnung $\sqrt{\epsilon_j^2}$ und der Auslenkung $\sqrt{y_j^2}$, sowie auch die berechneten und die gemessenen Eigenfrequenzen ν_j^{ber} und ν_j^{gem} ,

sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Spektraldichtefunktionen der Auslenkung, bezogen auf die Stellen des Brennstabes mit den Koordinaten $x = 244,5$ und $x = 215,5$ werden auf den Diagrammen 20 und 21 graphisch aufgetragen. Wie in der Arbeit [4] ausführlich beschrieben, sind an diesen Stellen bei niedrigen Frequenzen die größten Amplituden zu erwarten. Die Spektraldichtefunktionen der relativen Dehnung, bezogen auf die Stellen $x = 228,5$ und $x = 196,5$ sind in die Diagramme 22 und 23 eingezeichnet. Diese Koordinaten entsprechen den Stellen des achten und des siebenten Abstandshalters, wo Biegespannungsspitzen auftreten (die Diagramme der Durchbiegungs- und Biegedehnungskurven des Na 1-Brennstabes sind in der Arbeit [4] angeführt.). Diese Stellen sind besonders gefährdet, da hier gleichzeitig mit den Biegespannungsspitzen neben der Korrosion noch Thermospannungen, Materialabreibung und erhöhte Temperatur auftreten. Das Zusammentreffen dieser Effekte kann verursachen, daß die sich bildende Schutzschicht an der Brennstabhülle sukzessiv abspringen wird, so daß die Hülle schneller durchkorrodieren und damit das Kühlmittel mit dem Brennstoff in unmittelbaren Kontakt kommen kann.

Das Phänomen der Materialermüdung bei zyklischer Belastung und gleichzeitiger Einwirkung der Reibungskorrosion wurde nach Heywood [9] erst seit Mitte der fünfziger Jahre untersucht (trotz der Tatsache, daß dieses Phänomen etwa 90% der Ermüdungsbrüche verursacht). Über die Keilwirkung des Kühlmittels (sukzessive Vergrößerung des Risses durch Eindringung der Flüssigkeit in den geöffneten Riß und Entstehung einer Druckwelle bei Schließung des Risses) ist heute noch fast nichts bekannt. Da aus diesen Gründen keine Unterlagen vorhanden sind, kann z.Zt. auch noch keine sichere Aussage über die Lebensdauer der Brennstabhülle gemacht werden. Die Gewinnung zuverlässiger Informationen über die Ermüdungseigenschaften der Brennstabhülle wird so zu einer aktuellen Aufgabe auf dem Gebiet der Brennstabschwingung. Die experimentell gewonnenen Werte über den Schwingungszustand der Brennstäbe sollten bei der Spezifizierung der Ermüdungsversuche mit dem Reaktorbetrieb ähnlichen Bedingungen benutzt werden, um auf diese Weise die Ermüdungsversuche auf eine dem Problem angemessene Basis zu stellen.

4.0 Schlußfolgerungen

Eine theoretisch-experimentelle Methode für die Bestimmung des durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungszustandes der Brennstäbe wurde ausgearbeitet und praktisch erprobt. Das Verfahren beinhaltet folgende vier Schritte:

1. Berechnung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenfunktionen der freien, ungedämpften Schwingung des Brennstabes und Auswahl einer geeigneten Stelle am Brennstab, wo die relative Biegedehnung (Referenzdehnung) für alle zu erwartenden Schwingungsformen gemessen wird [2].
2. Instrumentierung des Brennstabes mit den Dehnungsmeßstreifen und experimentelle Verifizierung der Berechnung im Labor [3]. Bei diesem Schritt wird ebenfalls die Zuverlässigkeit der Dehnungsaufnahme geprüft.
3. Digitale Aufnahme des Zeitverlaufes der Referenzdehnung des schwingenden Brennstabes während eines Versuches oder im Reaktorbetrieb und nachfolgende rechnerische Bestimmung der Spektraldichtefunktion der Referenzdehnung.
4. Berechnung der Spektraldichtefunktionen und der entsprechenden quadratischen Mittelwerte der Auslenkungen und der relativen Biegedehnungen (bzw. Biegespannungen) für alle Stellen am Brennstab, wo große Auslenkungen oder Biegespannungen zu erwarten sind. Diese Information wird für die Bewertung der im Versuch oder Betrieb aufgetretenen Schwingungsschäden oder für die Spezifizierung der Ermüdungsversuche benötigt.

Die Methode wurde für die Konstruktionsvariante des Subassemblybündels mit Gitterabstandshaltern entworfen. Sie ist für alle in Betracht kommenden Temperaturen und Kühlmittel für die Schwingungsuntersuchungen sowohl in Versuchsloops als auch im Reaktor anwendbar.

Die Erprobung der Methode erfolgte an einem Modellsbündel mit 36 Modellstäben und einem Originalbrennstab der Na 1 Studie. Für den

quadratischen Mittelwert $\sqrt{\epsilon_{ref}^2}$ der Referenzdehnung ϵ_{ref} wurde folgende Abhängigkeit von dem mittleren dynamischen Druck q des Kühlmittels und von der mittleren Reynoldszahl Re festgestellt:

$$\frac{\sqrt{\epsilon_{ref}^2}}{q} = C_1 Re^{-C_2} + C_3$$

Für C_3 wurde der Wert $C_3 = 4,5 \cdot 10^{-10}$ gefunden; C_1 und C_2 hängen von den Bedingungen am Versuchskreislauf (Wassertemperatur, Saugdruck an der Pumpe, Dämpfungsglieder in der Rohrleitung) ab.

Eine ähnliche Aussage wie für $\sqrt{\epsilon_{ref}^2}$ gilt auch für den quadratischen Mittelwert der Druckpulsationen $\sqrt{p^2}$ in der Strömungsgrenzschicht an der Innenwand des Modellsubassemblies. Da die im Subassembly entstehenden Druckpulsationen von den Druckpulsationen des Versuchskreislaufes gestört sind, wird für zukünftige Untersuchungen ein Umbau des Versuchskreislaufes empfohlen.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- [1] Kadlec, J.:
Allgemeine Betrachtung über die durch die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Schwingungen der Brennstoffstäbe des schnellen Reaktors 1000 MW.
Externer Bericht 8/66-5, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, Dezember 1966
- [2] Kadlec, J.:
Rechnungsverfahren für die Bestimmung der Eigenfrequenzen, der Normalfunktionen und der Dehnungsfunktionen querschwingender Brennstäbe.
Externer Bericht 8/66-9, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorentwicklung, September 1966
- [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 3718 d, 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 3977 d, Januar 1969
- [5] Smidt, D., Müller, A.:
Referenzstudie für den 1000 MW_e natriumgekühlten schnellen Brutreaktor(Na1).
KFK-Bericht 299, Dezember 1964

- [6] Gast, K., Schlechtendahl, E.G.:
Schneller natriumgekühlter Reaktor Na-2.
KFK-Bericht 660, EUR 3706 d, Oktober 1967
- [7] Bendat, J.S., Piersol, A.G.:
Measurement and Analysis of Random Data.
John Wiley & Sons, Inc. New York, 1966
- [8] 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
- [9] Heywood, R.B.:
Design^{ing} against Fatigue.
Chapman and Hall Ltd., London 1962
- [10] Seifritz, W., Stegemann, D.:
Ein Zweidetektor-Kreuzkorrelationsexperiment zur Bestimmung
von Reaktorparametern aus dem Neutronenrauschen.
Nukleonik 1967, 9, 4, 169-179
- [11] Schlichting, H.:
Grenzschicht-Theorie.
G. Braun Verlag, Karlsruhe, 1965
- [12] Bakewell, H.P., Carey, G.F., Libuha, J.J., Schloemer, H.H.,
Von Winkle, W.A.:
Wall Pressure Correlations in Turbulent Pipe Flow.
U.S. Navy Underwater Sound Lab. Rep. Nr. 559, August 1962

[13] Carey, G.F., Chlupsa, J.E., Schloemer, H.H.:
Acoustic Turbulent Water-Flow Tunnel.
J. Acoust. Soc. of America 1967, 41, 2, 373-379

Anhang 1

Instrumentierung des Brennstabes für Schwingungsuntersuchungen im Natrium

Die im Bericht geschilderte Methode zur Messung der Brennstabschwingungen mittels an den Brennstäben angebrachter Dehnmeßstreifen läßt sich auch auf Brennstabbündel im strömenden Natrium anwenden soweit es gelingt, die Brennstäbe entsprechend zu instrumentieren. Die zwei Hauptschwierigkeiten dabei sind die Forderung nach Temperaturbeständigkeit der DMS im Bereich hoher Temperaturen und die absolute Dichtheit der Brennstäbe, bzw. der DMS gegen Natrium. Um eine solche Instrumentierung zu erreichen wurde eine besondere Technologie erprobt, die im folgenden näher erläutert wird.

Für diesen Anwendungsfall kommen nur DMS in Frage, deren Anschlüsse in Stahlkapillaren mit Oxydkeramik als Isolationsmaterial verlegt sind. Den hier gestellten Anforderungen werden die gekapselten DMS in Integral Lead Version der Fa. Microdot am besten gerecht. Im Vorversuch einer Instrumentierung wurde deshalb ein DMS der Type SG 123-1A-2 (Microdot) benutzt. Die für den Einsatz im Natrium zu instrumentierenden Brennstäbe haben einen Außendurchmesser von 6 mm und eine Wandstärke von 0,38 mm [6]. Um den DMS an der gewünschten Stelle im Innern des Brennstabes anzuschweißen, wurde der Stab an dieser Stelle auf einer Länge von 60 mm bis zur Hälfte des Durchmessers abgefräbt. Für das fehlende Stück wurde ein Deckel in Form einer Halbschale angefertigt, die spielfrei in die Aussparung des Stabes passen muß. (Bild A 1). Somit ist die Innenseite des Rohres zugänglich und man kann in das Rohr selbst und in die Halbschale die DMS aufbringen.

Bei dem genannten Versuch wurde ein Dehnmeßstreifen unter Benutzung einer Vorrichtung, die ein Verziehen verhindert, in die Halbschale eingeschweißt (Bild A2).

Das Rohr wird sodann durch die Halbschale geschlossen, die durch die zwei Hülsen, im Bild 1 erkenntlich, zentriert und gehalten wird. Die Nahtstellen werden im Anschluß in einer Elektronenstrahlschweißmaschine des Typs ES 1014 von der Fa. Zeiss verschweißt. Um einwandfreie Schweißnähte zu erhalten, ist äußerste Sauberkeit und Genauigkeit der Teile

erforderlich. Das geschweißte Rohr ist im Bild A3 zu sehen. Die Herausführung der Kapillare aus dem Brennstab erfolgt durch einen Stopfen, der in einer besonderen Schweißvorrichtung im Argon arc-Verfahren mit dem Brennstabrohr und der Kapillare verschweißt ist, Bild A4.

Bei dem anschließend durchgeführten Helium-Lecktest ergab sich eine absolute Dichtheit der Schweißungen an der Halbschale und in der Durchführung der Kapillare. Die Gegenseite des Brennstabes wird ebenfalls durch einen verschweißten Stopfen verschlossen. Untersuchungen im Natrium werden mit dem so präparierten Versuchsrohr noch erfolgen. Ergebnisse aus ähnlichen Versuchen lassen jedoch bei dieser Methode gute Erfolge erwarten.

Anhang 2

Druckpulsationen im Versuchskreislauf

Für die Bestimmung der im Wasserkreislauf entstehenden Druckpulsationen wurde die Teststrecke durch ein glattes Kreisrohr ^{100 mm \varnothing} mit zwei Druckmeßstellen ersetzt. Die erste Meßstelle lag 100 mm in der Strömungsrichtung hinter dem unteren Flansch (Bild 5), die zweite Meßstelle war 2000 mm höher. Die Druckpulsationen wurden mit den an die Messverstärker KWS/II-5 (Hottinger) angeschlossenen induktiven Druckaufnehmern der Type P1M (Membranendurchmesser 20 mm; Fa. Hottinger) aufgenommen. Der quadratische Mittelwert der Druckpulsationen $\sqrt{\overline{p^2}}$ wurde mit dem Effektivvoltmeter Type 3400 A (Hewlett-Packard) gemessen. Für die Bestimmung der Spektraldichtefunktion der Druckpulsationen wurde das verstärkte Signal mit dem Magnetbandgerät Type 1300 (FM-Aufzeichnung; Ampex) auf das Magnetband aufgenommen und nach dem in [10] beschriebenen Verfahren analog ausgewertet. Die hydrodynamischen Größen wurden nach dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren bestimmt. Die maximale Wassergeschwindigkeit U_{∞} in der Rohrmitte wurde aus der mittleren Geschwindigkeit w nach [11] umgerechnet.

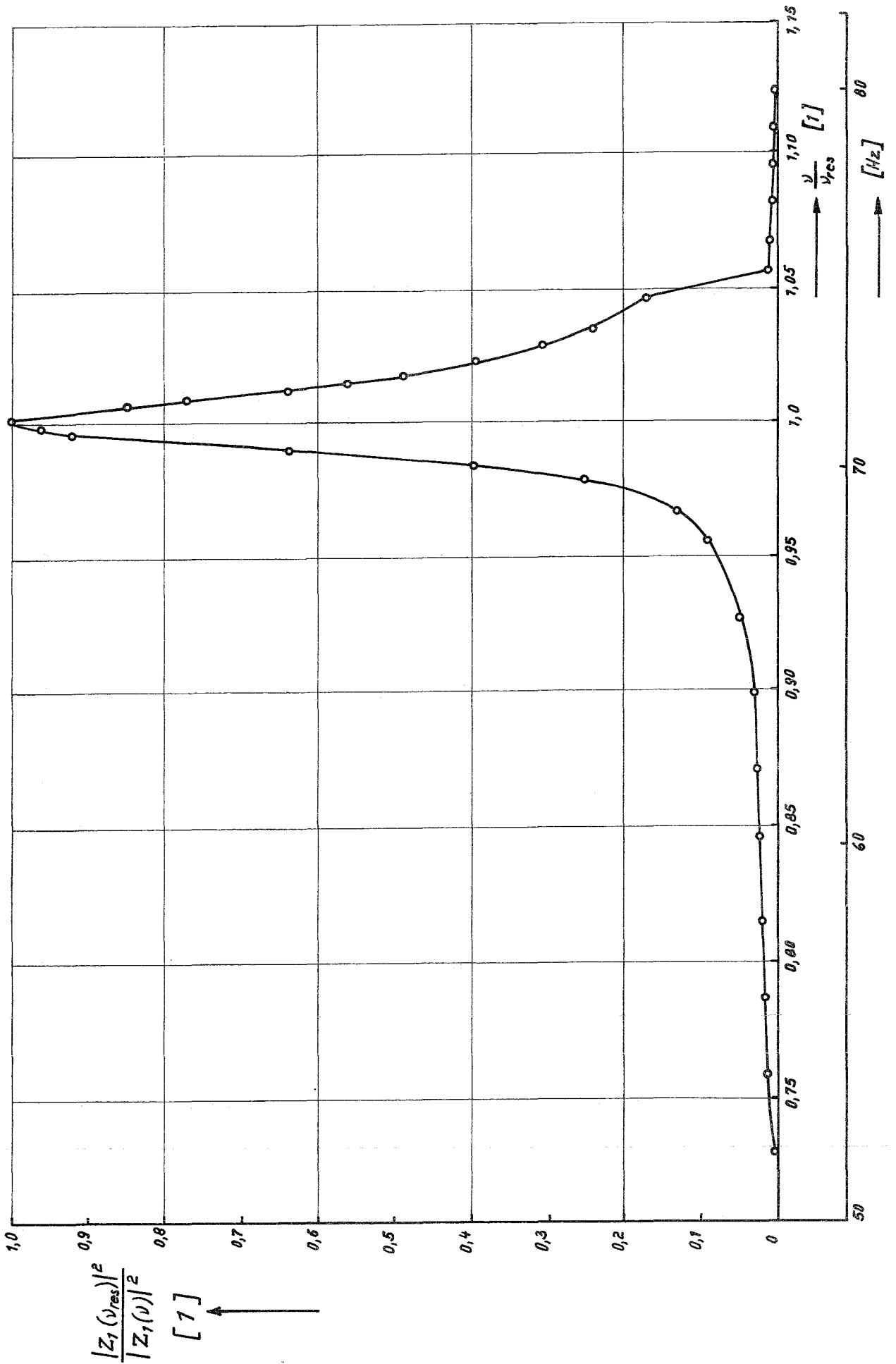
Um die Einflüsse der Bedingungen am Kreislauf untersuchen zu können,

wurde eine ganze Reihe von Messungen durchgeführt. Die Resultate aus den Messungen, bei welchen das niedrigste Niveau der Druckpulsationen erzielt wurde, sind auf Bild A5 angeführt. Die mit den Symbolen ■ , ▼ ● und ▲ bezeichneten Meßwerte wurden an der unteren Meßstelle aufgenommen (Eintritt des Wassers in die Teststrecke), die Symbole □, ▽ , ○ und △ beziehen sich auf die obere Meßstelle.

Trotz allen Gegenmaßnahmen ist das verbleibende Niveau der Druckpulsationen noch sehr hoch und übersteigt das minimal erreichbare Niveau mindestens um zwei Zehnerpotenzen. Die Erhöhung der Wassertemperatur verursacht die Verschiebung der gemessenen Kurve zu den höheren Reynoldszahlen, wie es bei den anderen Versuchen der Fall war (Kap.3.4.2). Ähnliche Wirkung hat die Herabsetzung des statischen Druckes im Kreislauf. Diese Resultate lassen darauf schließen, daß die Druckpulsationen teilweise auf die Entstehung der *Kavitation* zurückzuführen sind.

Ein Diagramm der Spektraldichtefunktion für den Frequenzbereich 10 bis 225 Hz zeigt Bild A6. Die Messung bezieht sich auf $Re=2,72 \cdot 10^5$, $\rho = 343 \text{ kp/m}^2$ und $w = 2,57 \text{ m/sec}$; die Filterbandbreite beträgt 6 Hz. Die Frequenz des Maximalwertes im Diagramm entspricht der Pumpendrehzahl, woraus man auf eine Unsymmetrie des Schaufelrades schließen kann. Die Spektraldichtefunktion in dimensionsloser Form ist auf Bild A7 aufgezeichnet. Zum Vergleich sind auf dem gleichen Diagramm auch die experimentell ermittelten Werte von anderen Autoren aufgetragen. Die Werte von Bakewell et al. [12] wurden in einem Kreisrohrkanal gemessen, die Werte von Carey et al. [13] hat man in einem für akustische Messungen speziell entwickelten Wasserversuchskreislauf gewonnen. Um die Übertragung der Schwingungen und der Druckpulsationen auf die Teststrecke zu reduzieren, hat man die einzelnen Teile dieses Kreislaufes durch Gummischläuche verbunden. Vor und hinter der Teststrecke sind große Dämpfungsbehälter eingesetzt. Wie auf Bild A 7 zu sehen ist, haben sich diese Maßnahmen sehr gut bewährt. Aus diesem Grunde werden sie auch bei dem geplanten Umbau unseres Versuchskreislaufes berücksichtigt.

Bild 1: Mechanische Impedanz des Brennstabes



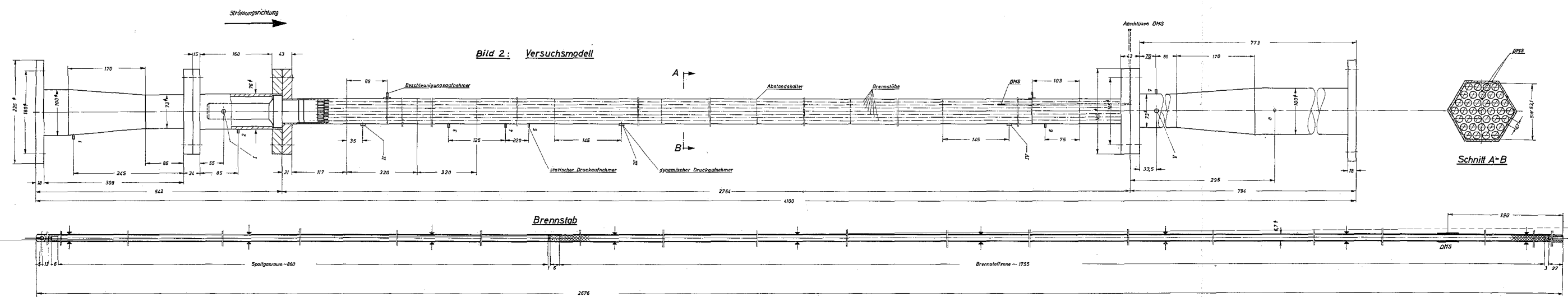


Bild 2: Versuchsmodell

Schnitt A-B

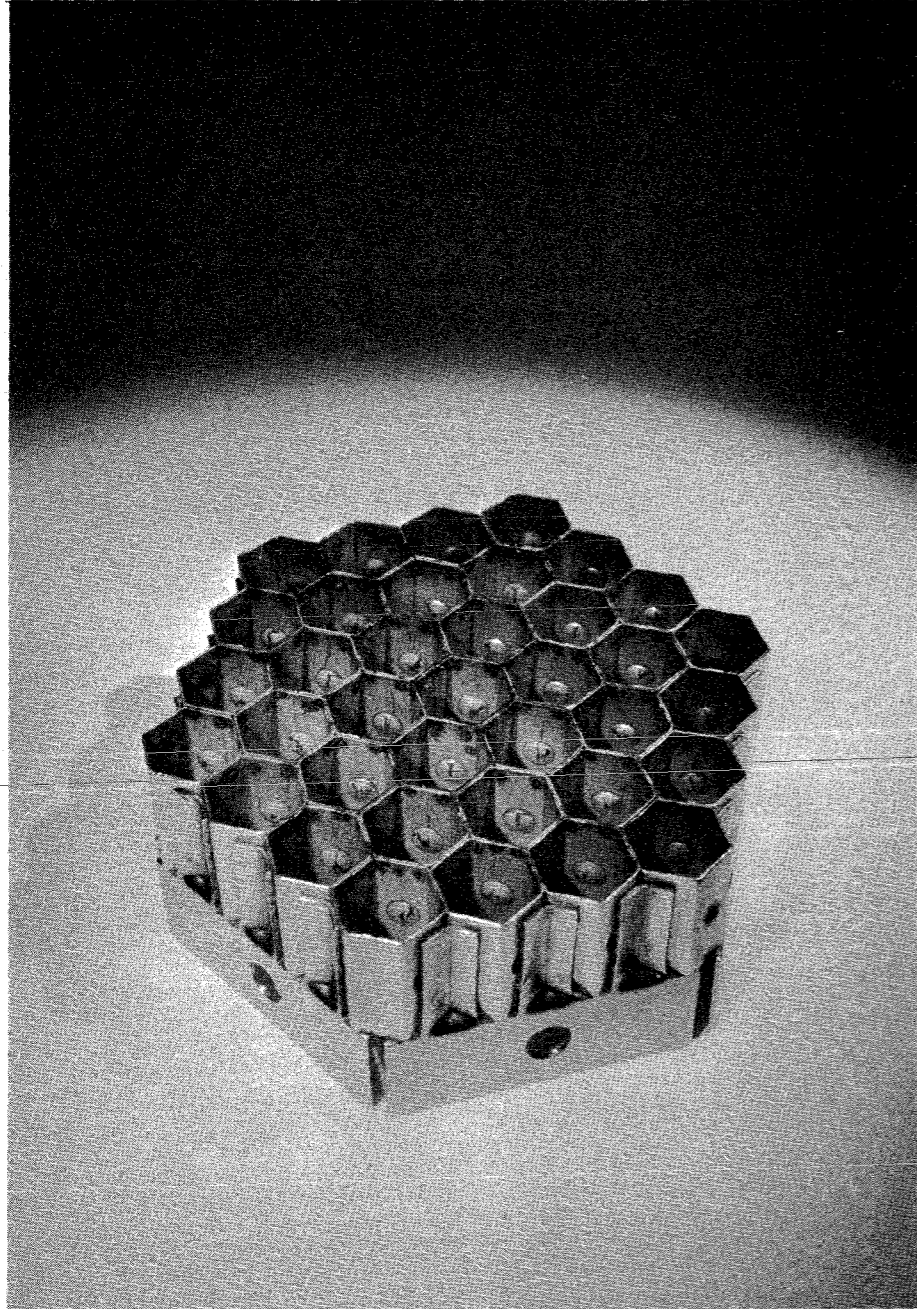


Bild 3: Gitterabstandshalter

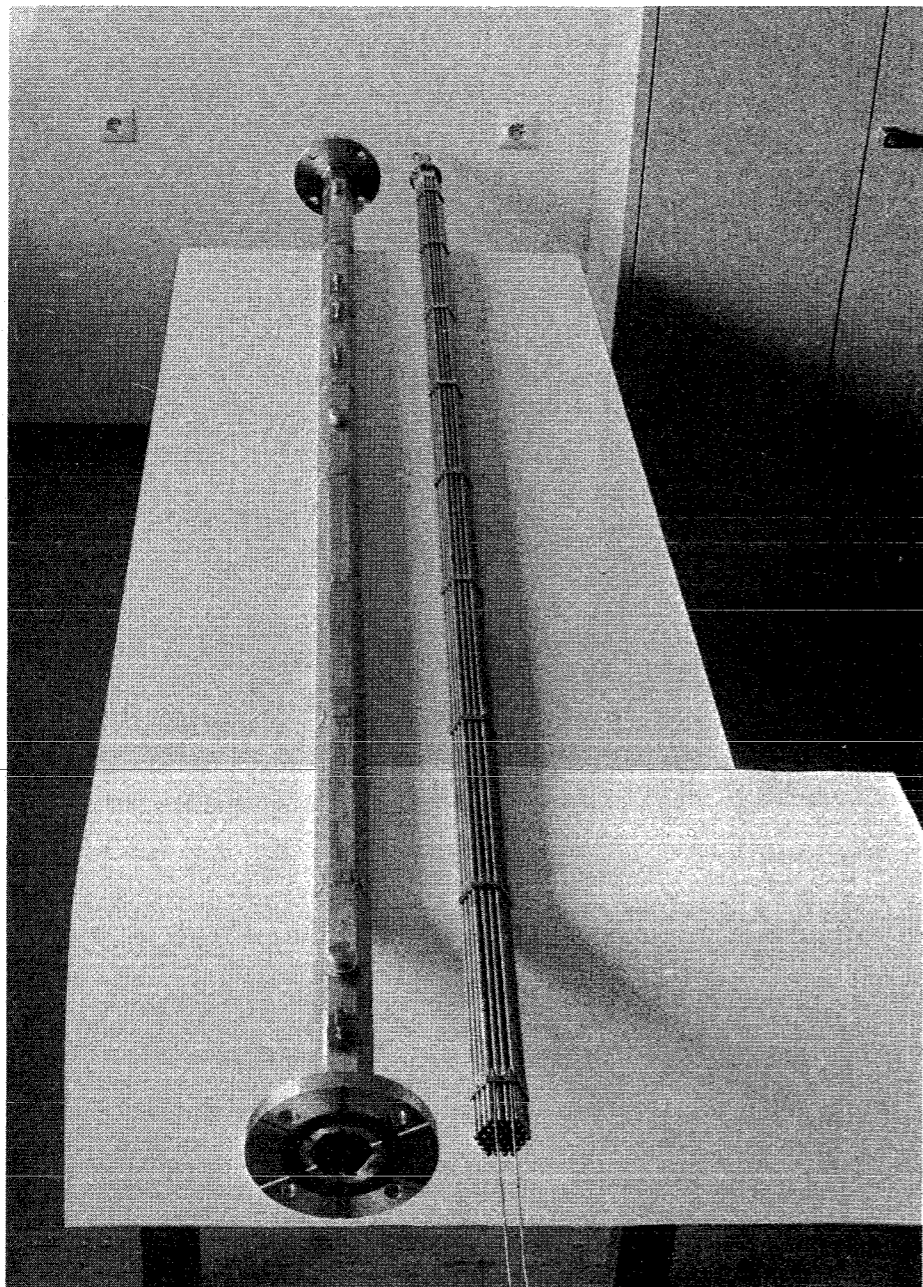


Bild 4: Modellsubassembly

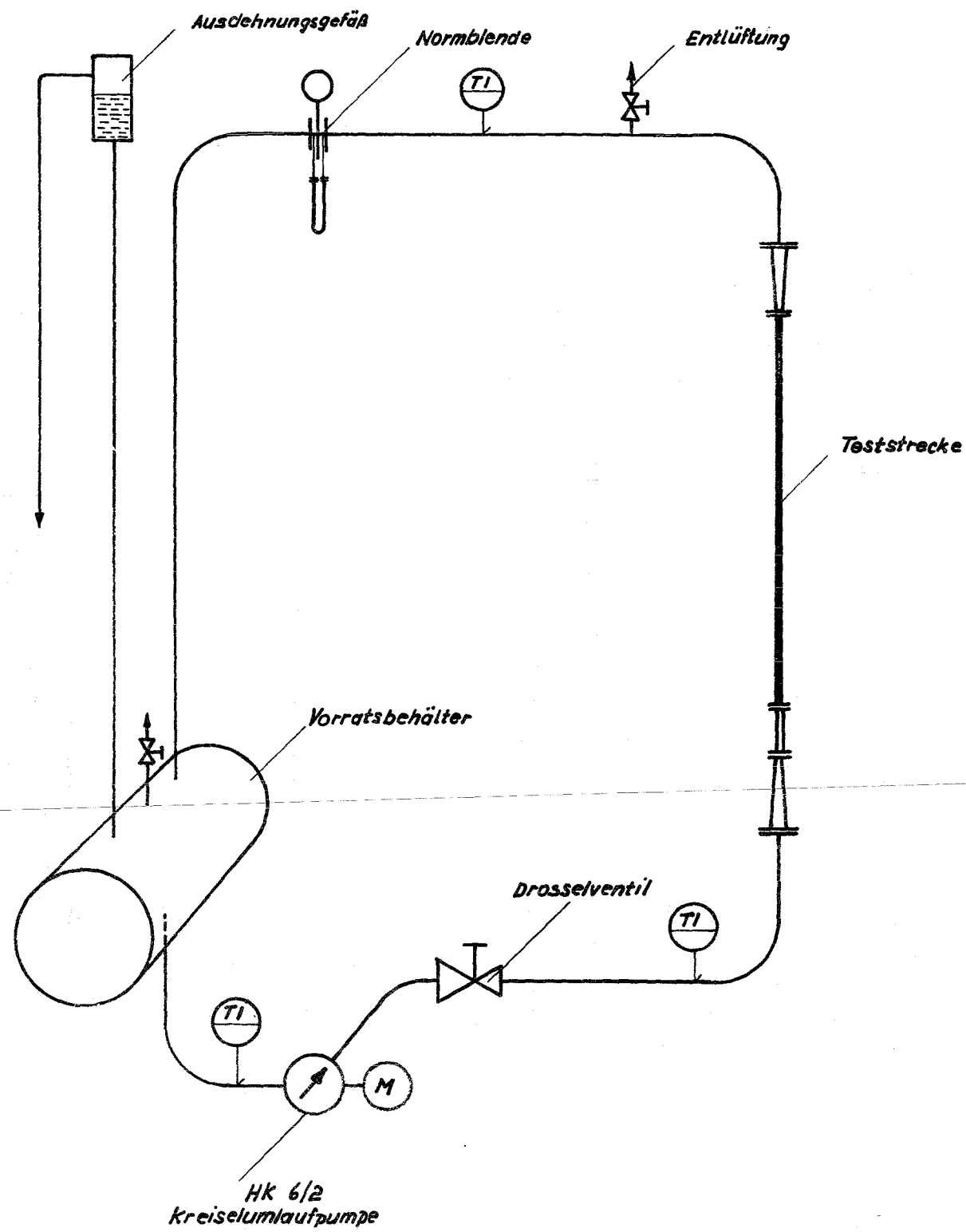


Bild 5 : Versuchskreislauf

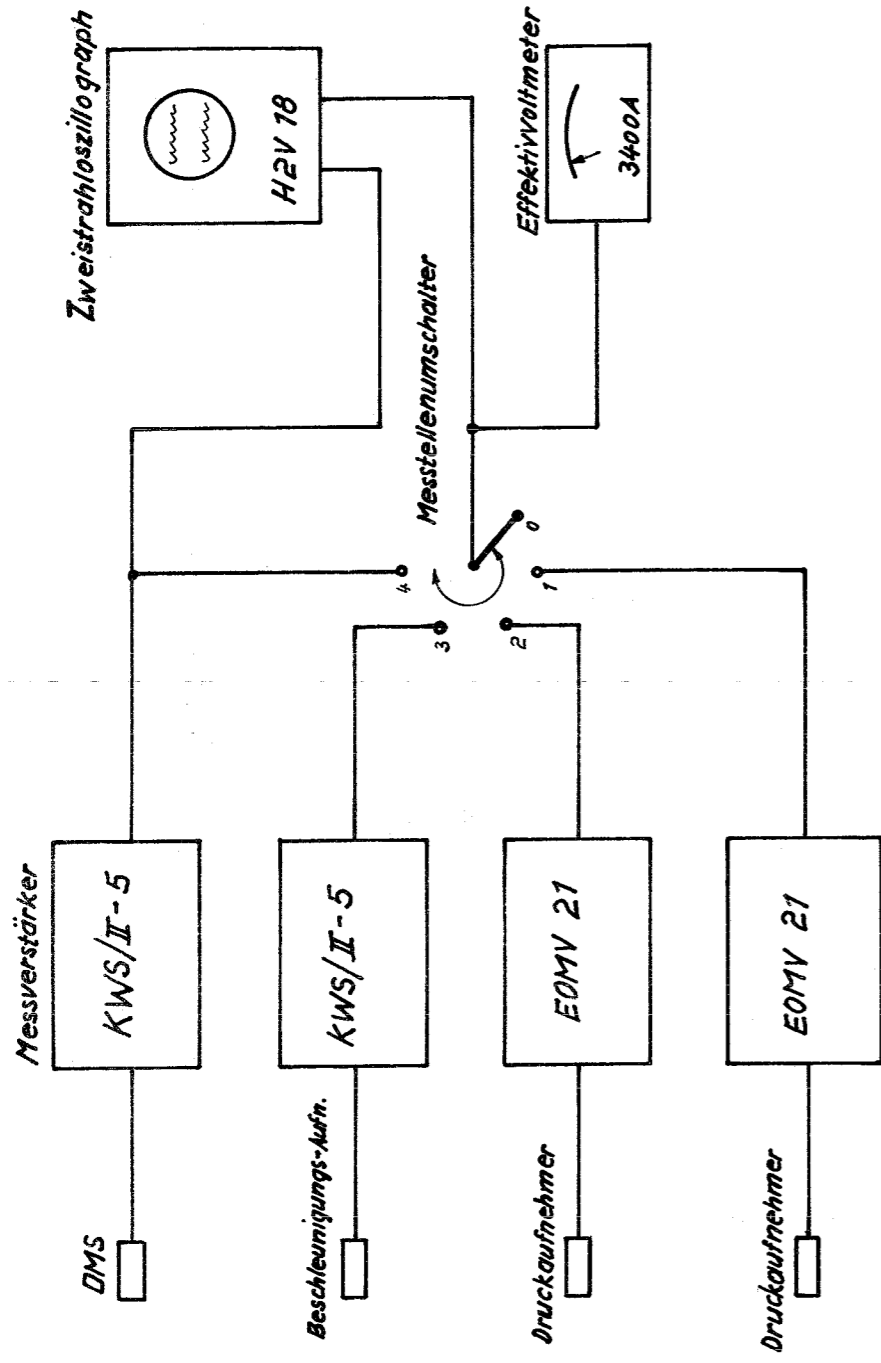


Bild 6 : Messgeräteanordnung für die Bestimmung der quadratischen Mittelwerte

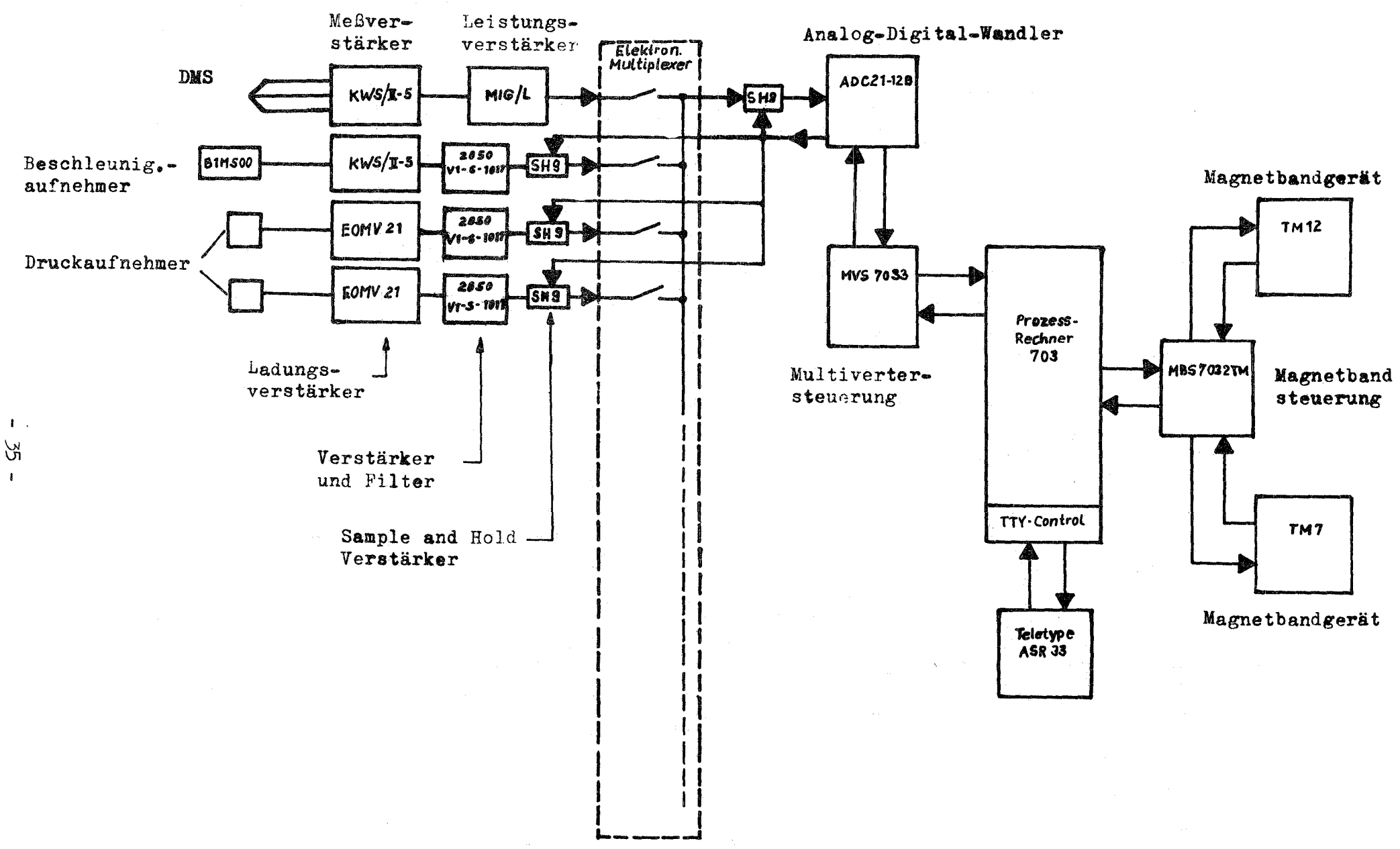


Bild 7: Blockscheema der Datenerfassungsanlage

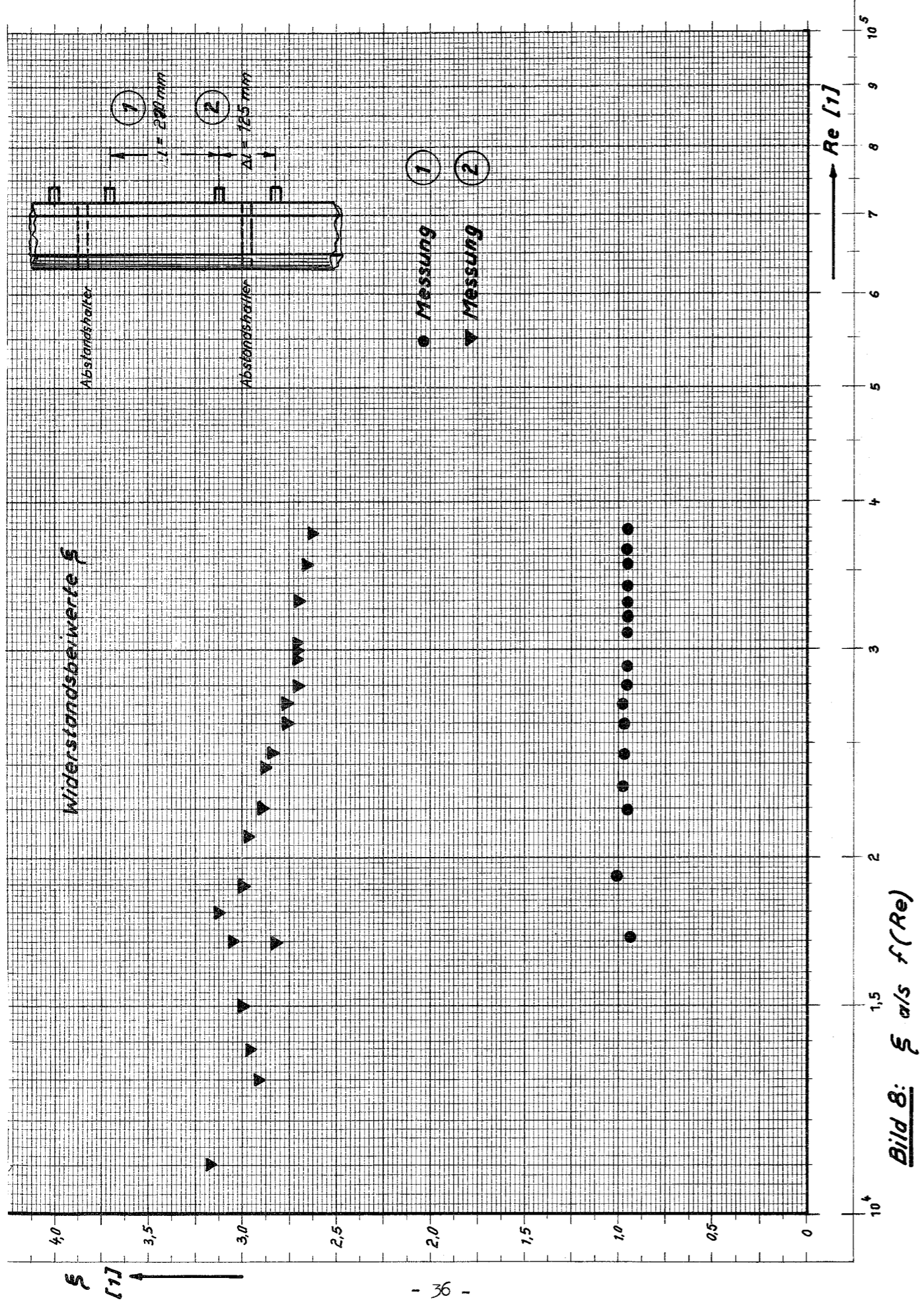


Bild 8: ξ als $f(Re)$

$10^4 \frac{E}{\rho}$
[cm²/kg]

- 2. Messreihe, ($t_m = 20^\circ\text{C}$)
- 3. Messreihe, ($t_m = 19,2^\circ\text{C}$)
- 4. Messreihe, ($t_m = 27,35^\circ\text{C}$)
- 5. Messreihe, ($t_m = 28,50^\circ\text{C}$)
- 6. Messreihe, ($t_m = 27,25^\circ\text{C}$)
(mit Gummistaudschkammer)

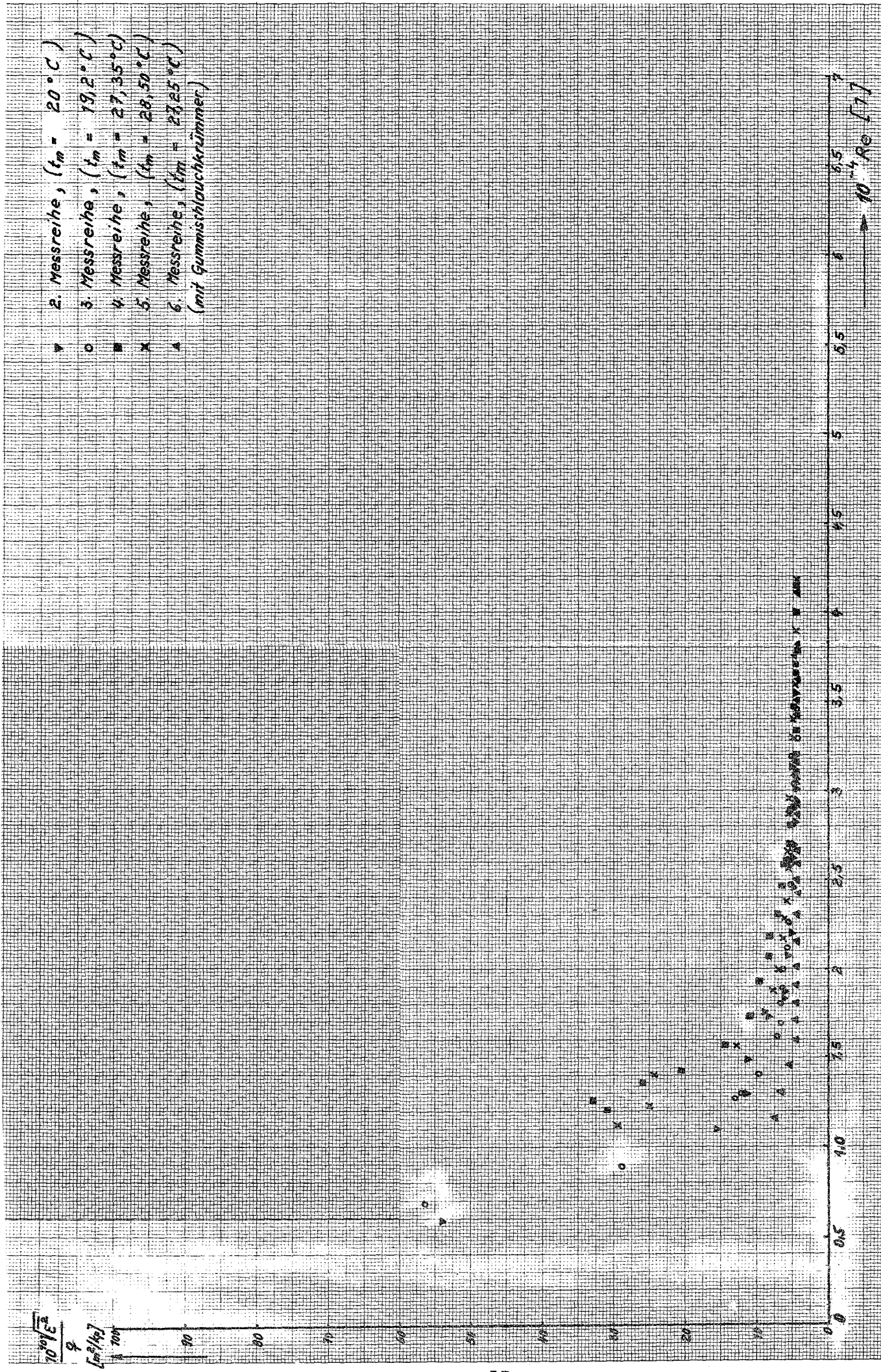
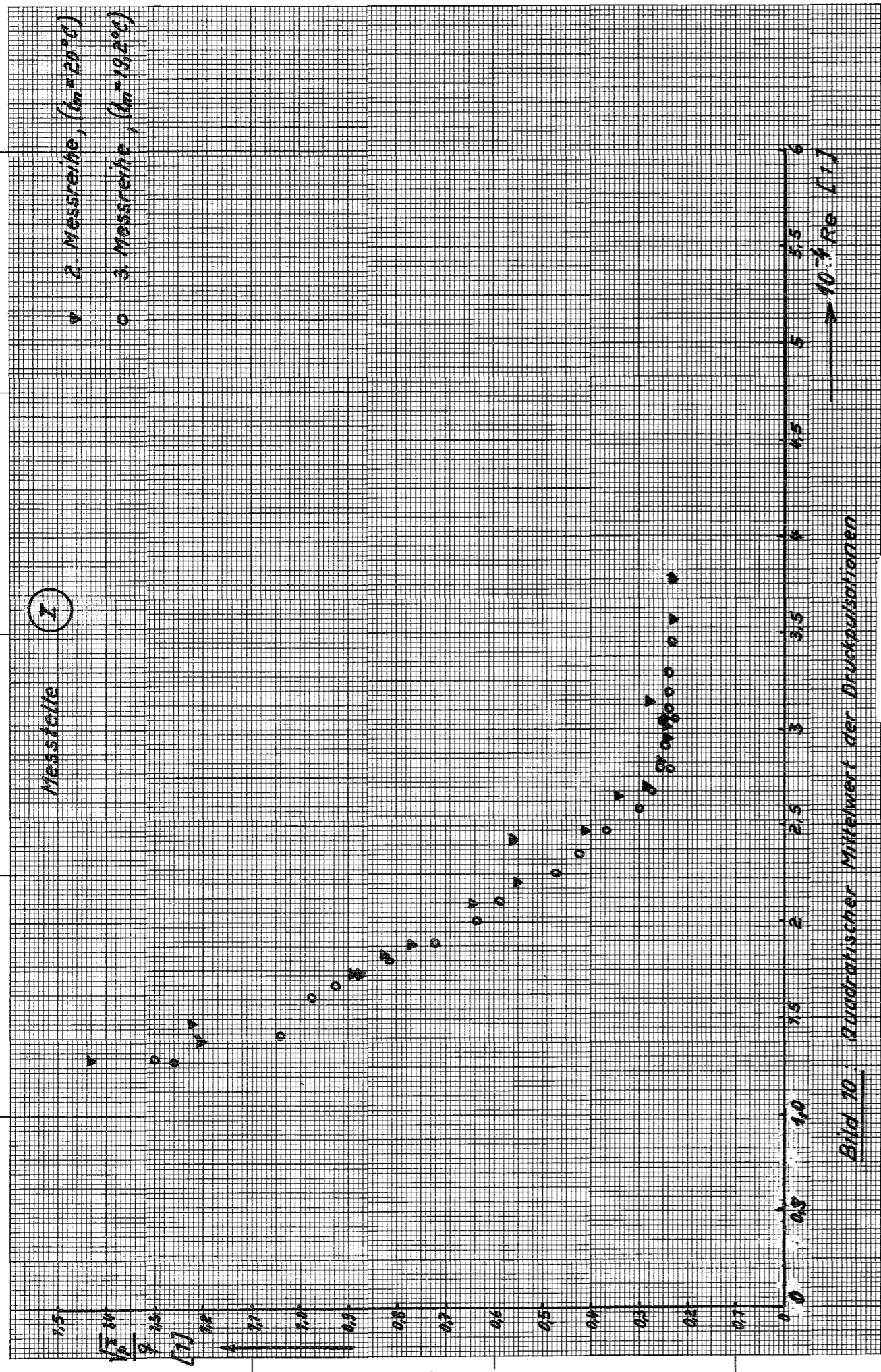


Bild 9: Quadratische Mittelwerte der relativen Biegedehnung



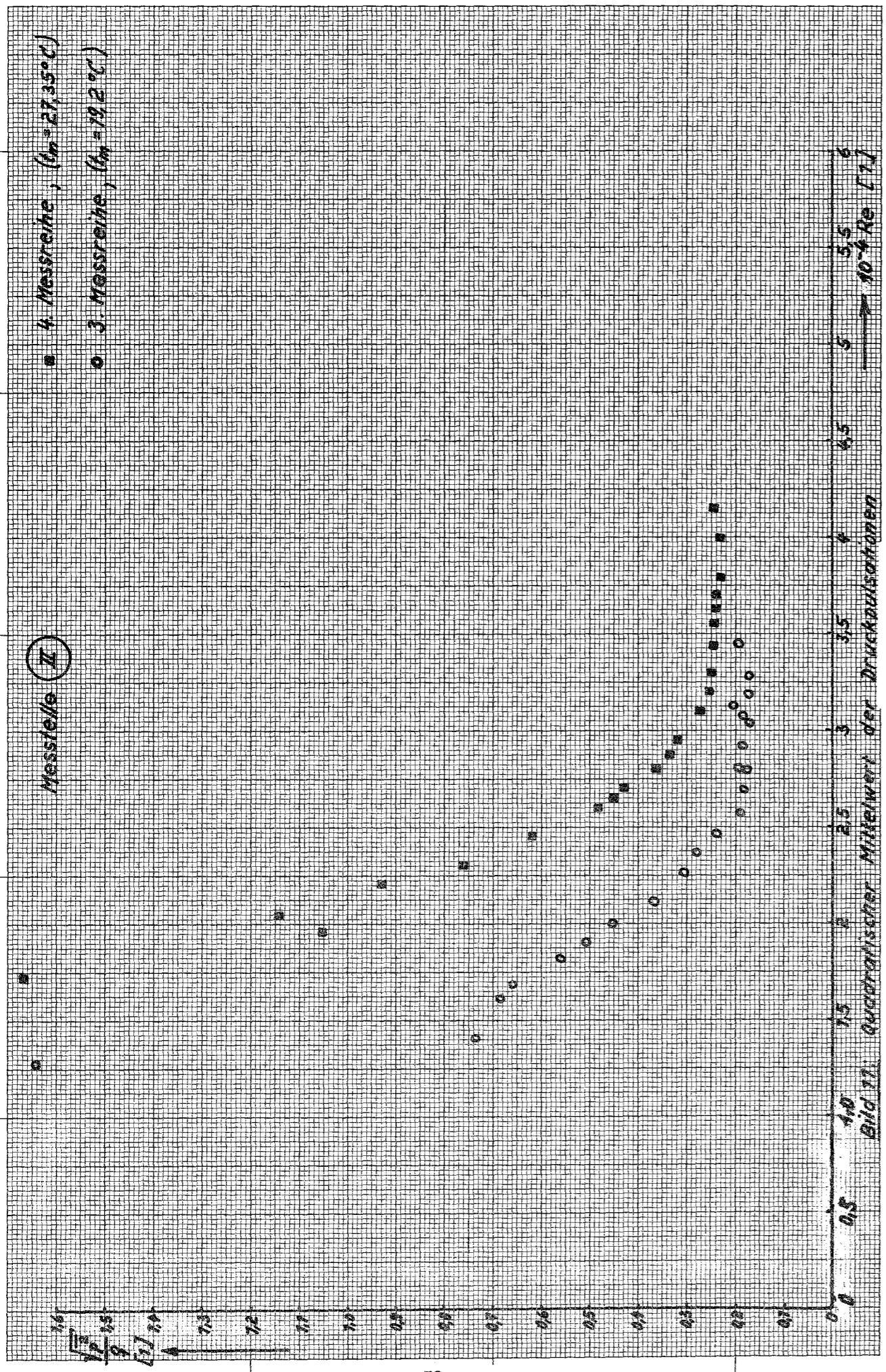


Bild 17: Quadratischer Mittelwert der Druckschwankungen

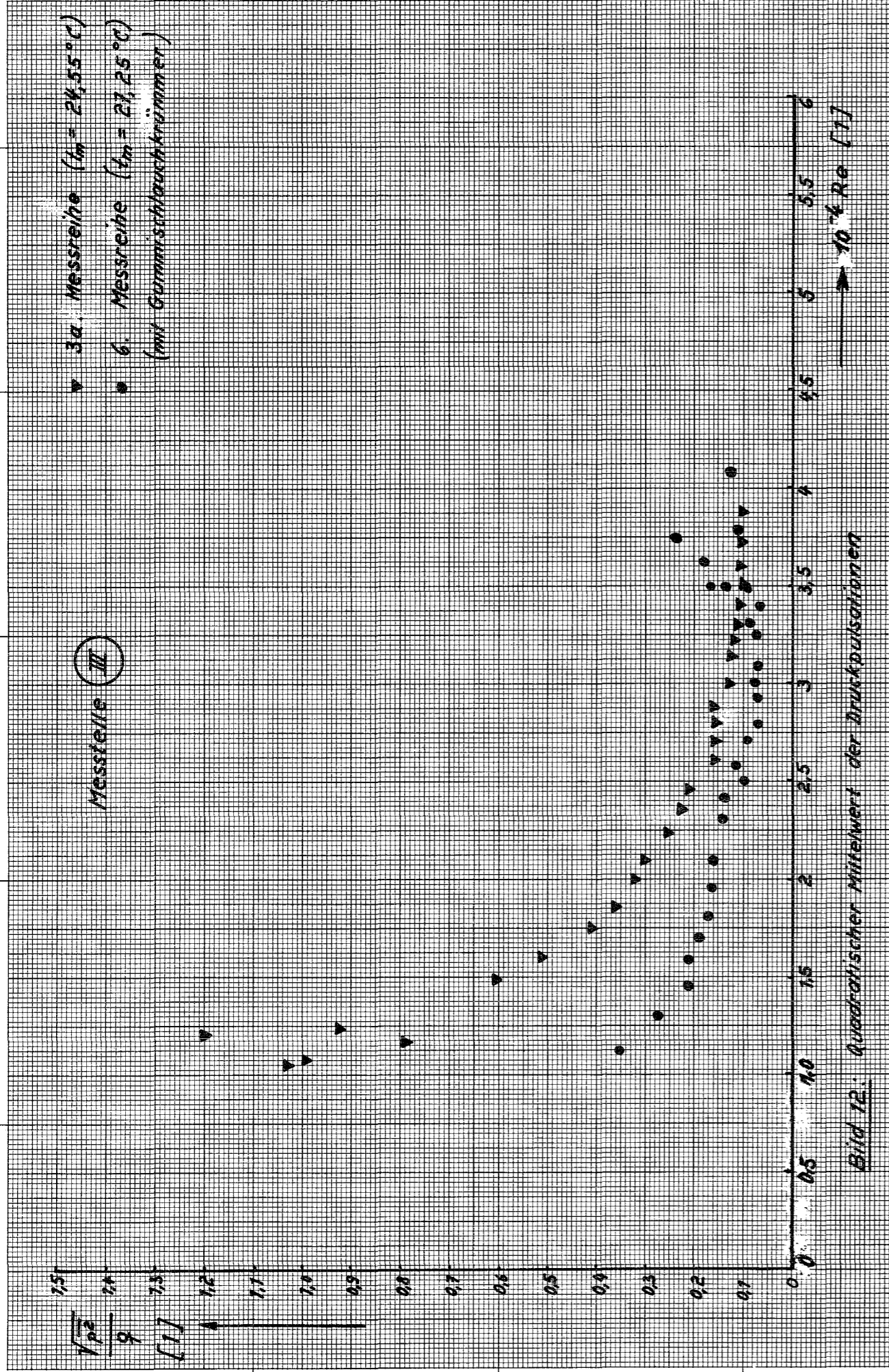


Bild 12. Quadratischer Mittelwert der Druckpulsationen

Messreihe IV

- ▼ 2. Messreihe, ($t_m = 20^\circ\text{C}$)
- 3. Messreihe, ($t_m = 19,2^\circ\text{C}$)
- 6. Messreihe, ($t_m = 22,25^\circ\text{C}$)
(mit Gummischlauchkrümmer)

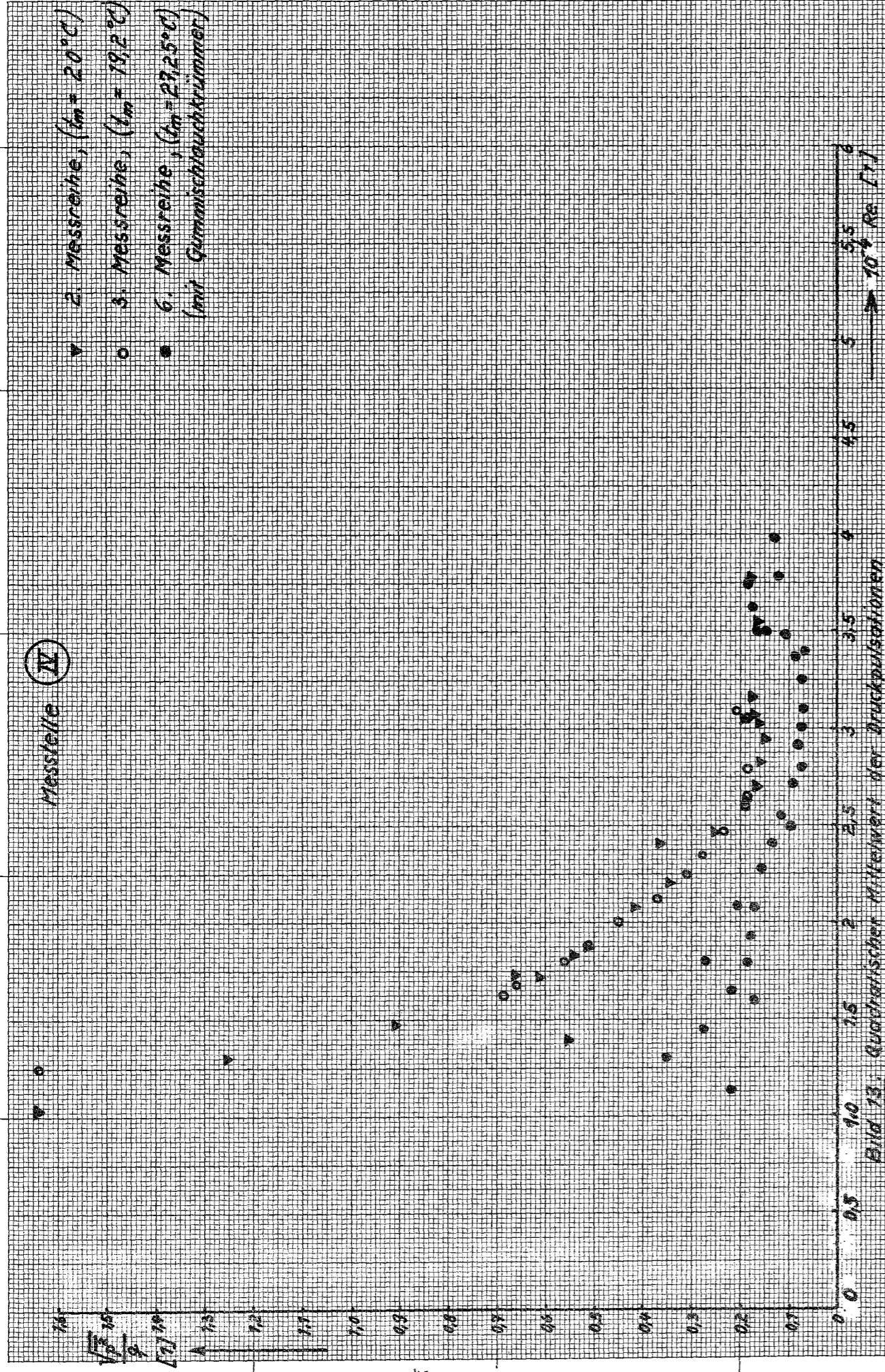


Bild 13: Quadratischer Mittelwert der Druckpulsationen

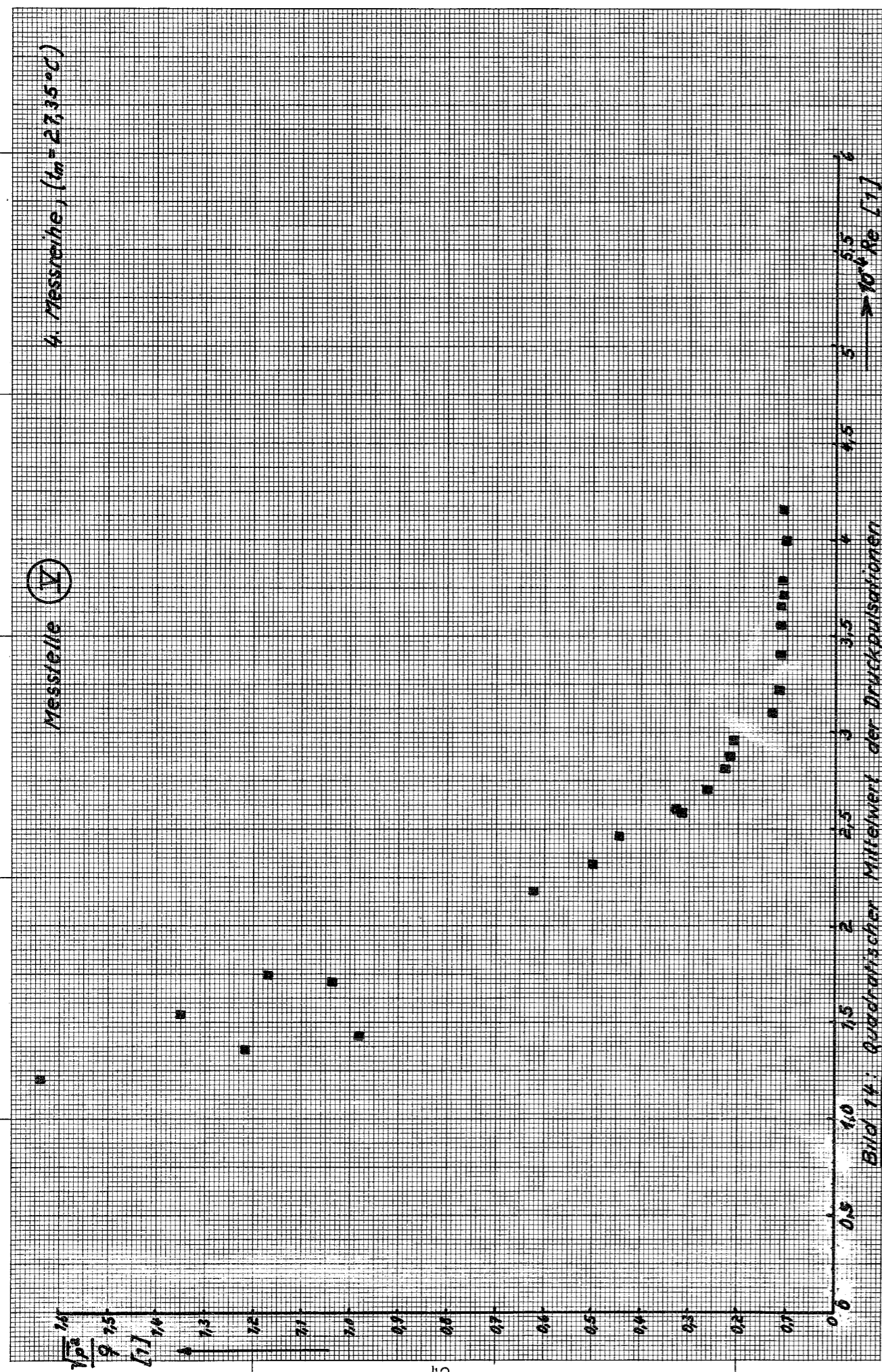


Bild 14: Quadratischer Mittelwert der Druckpulsationen

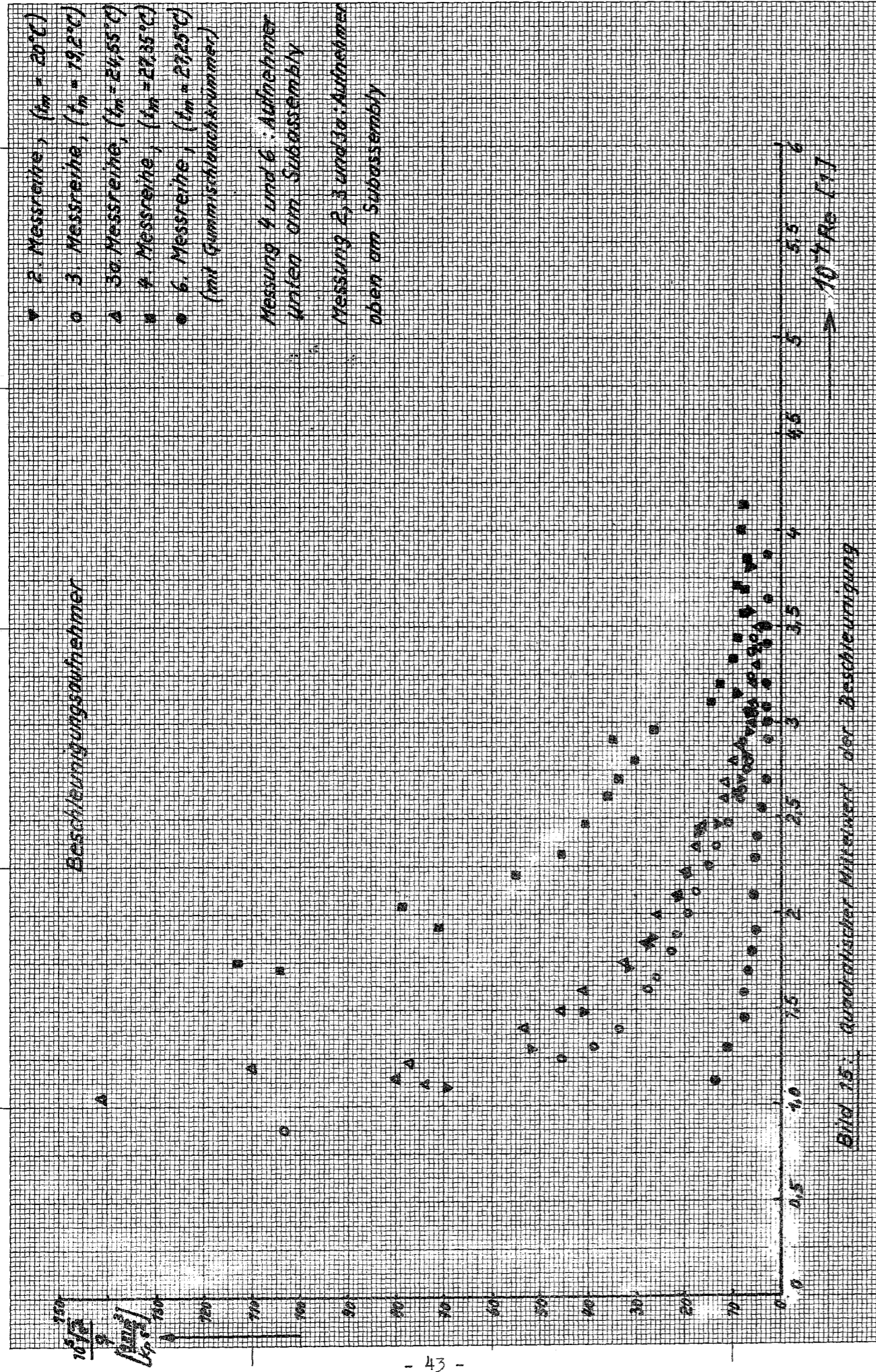


Bild 15: Ausdatierter Mittelwert der Beschleunigung

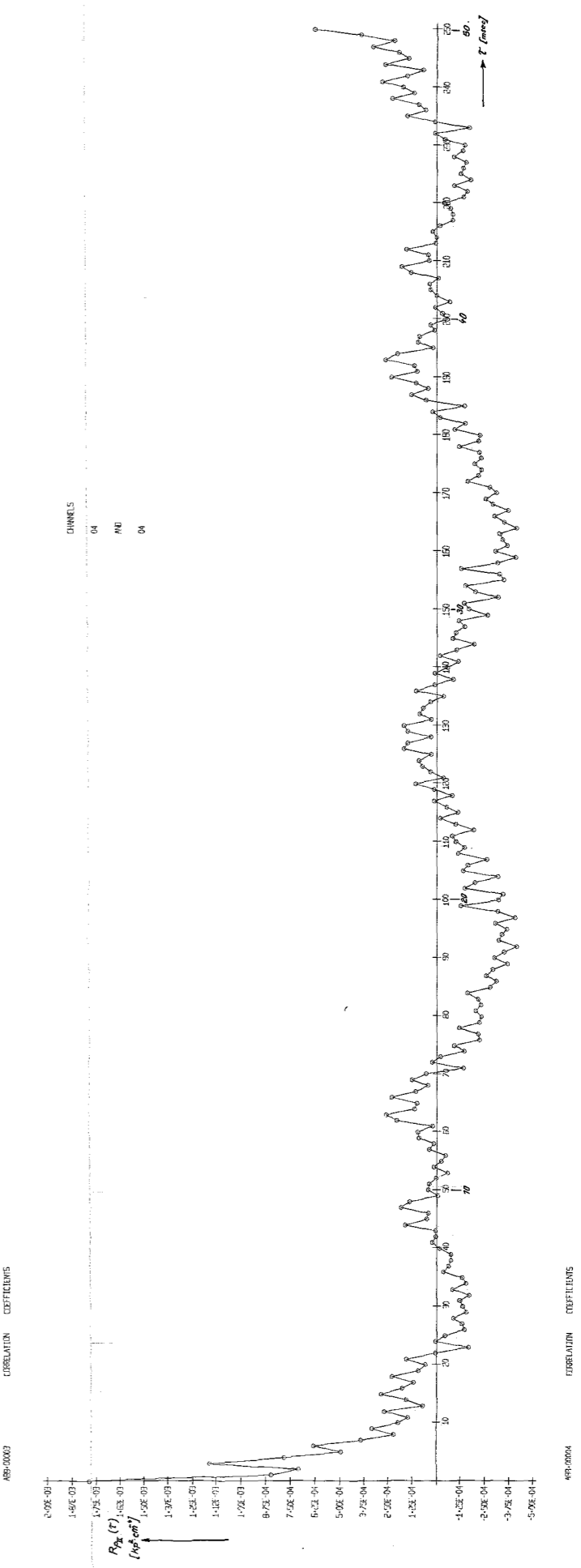
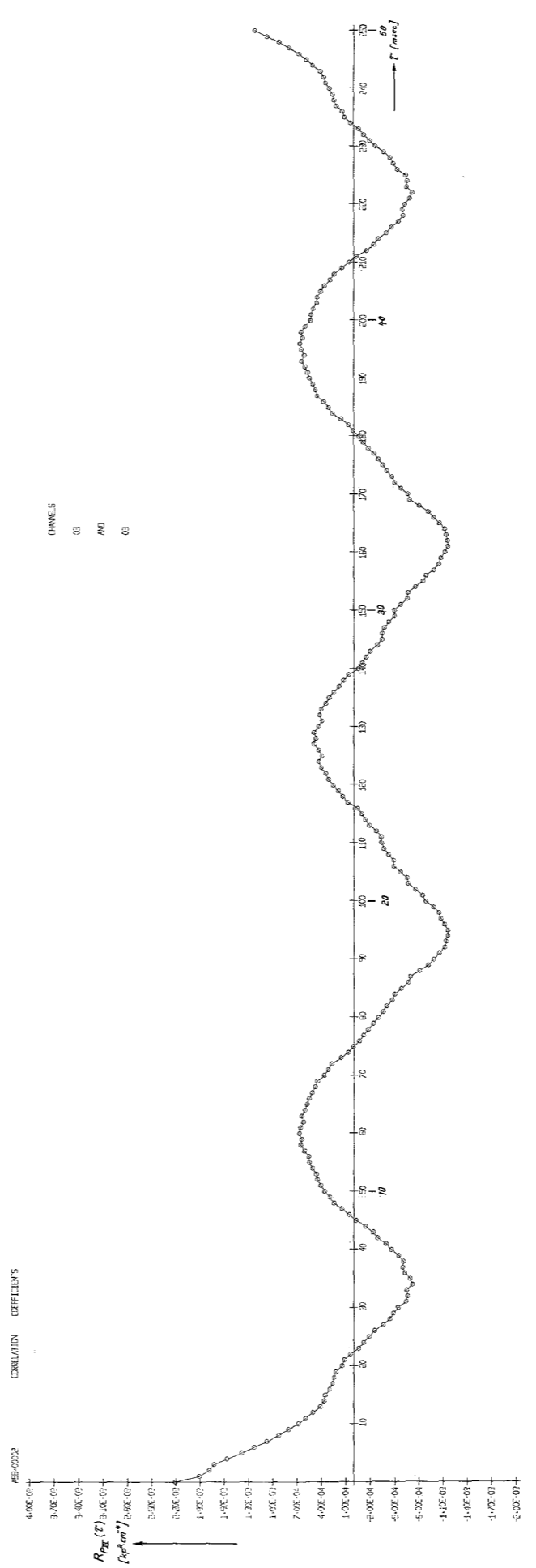
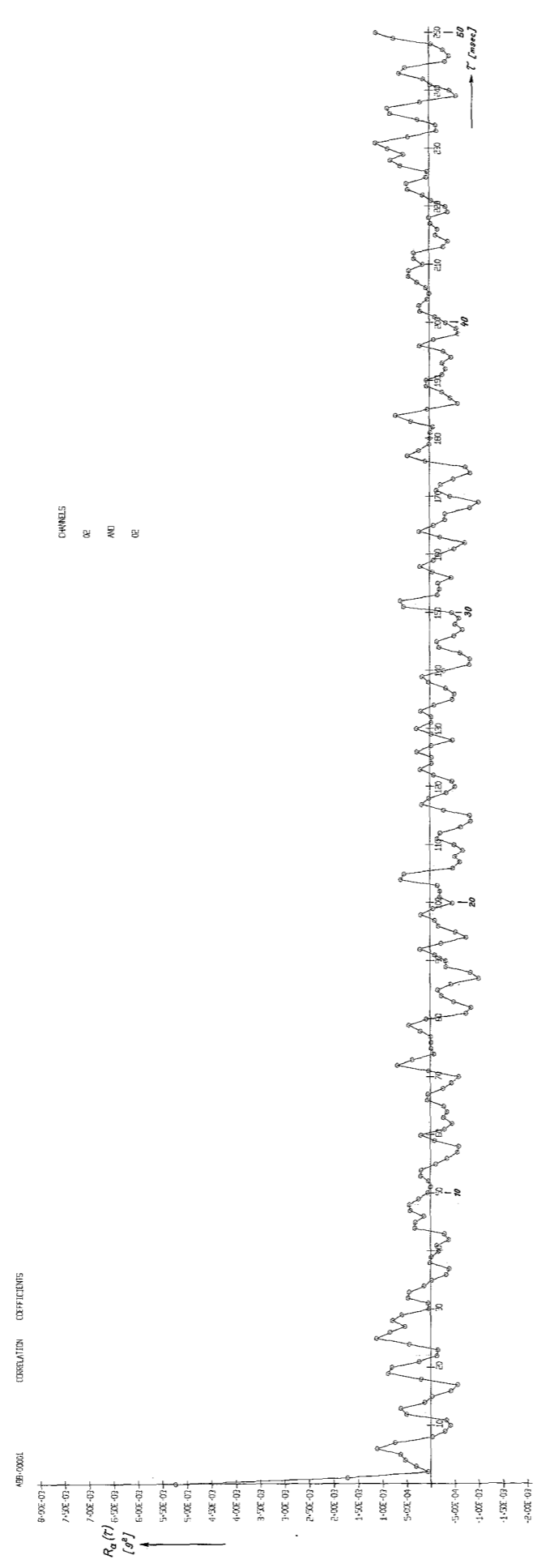
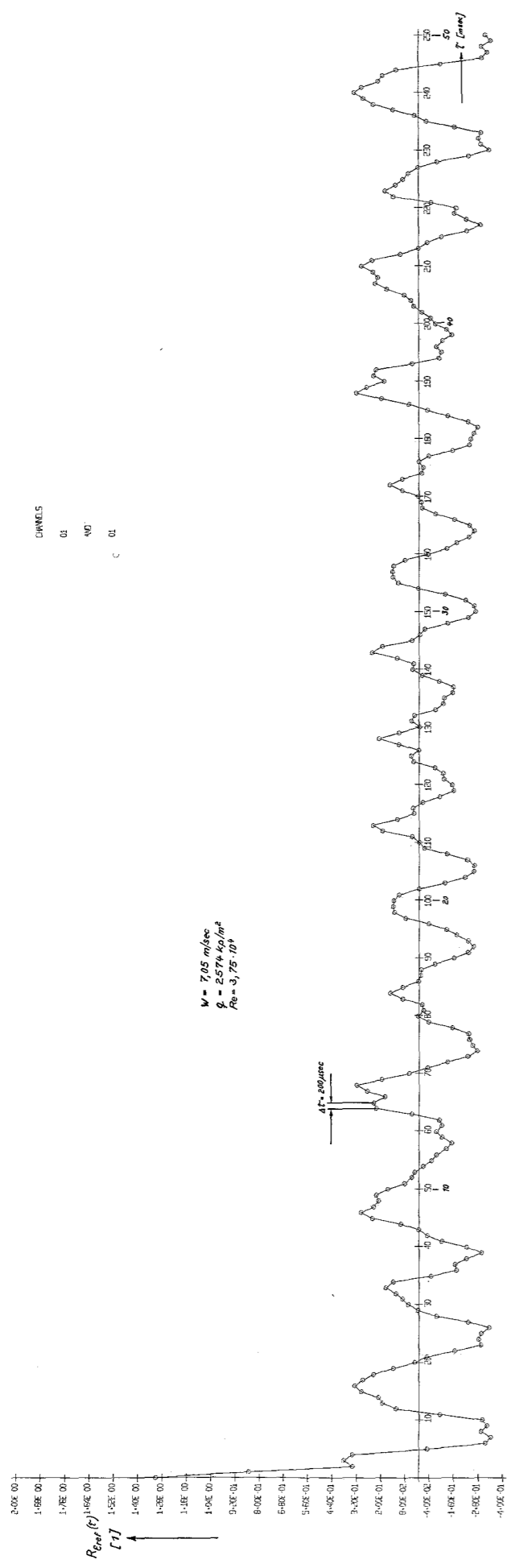
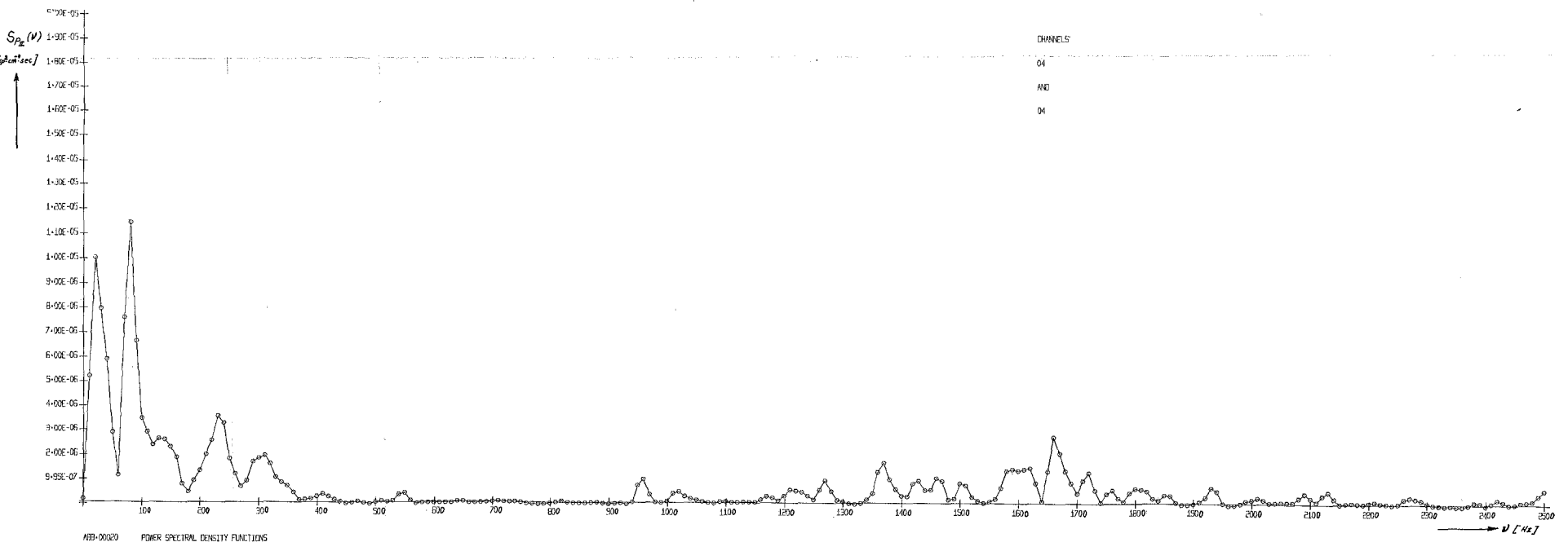
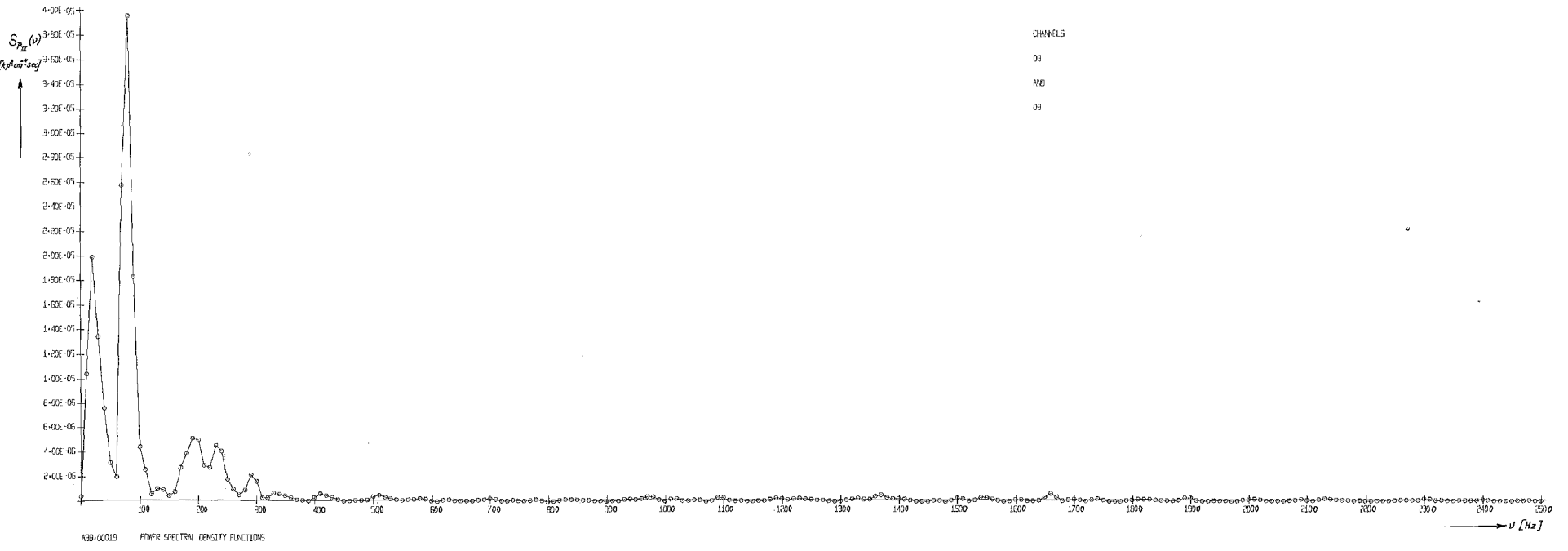
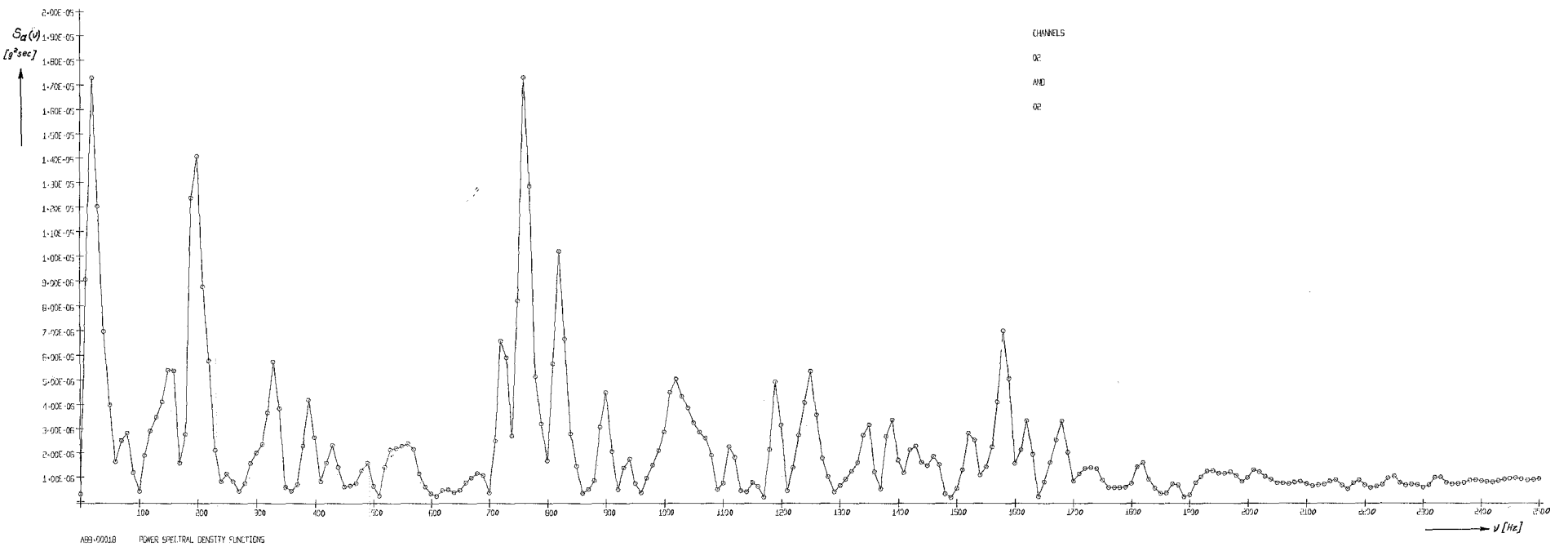
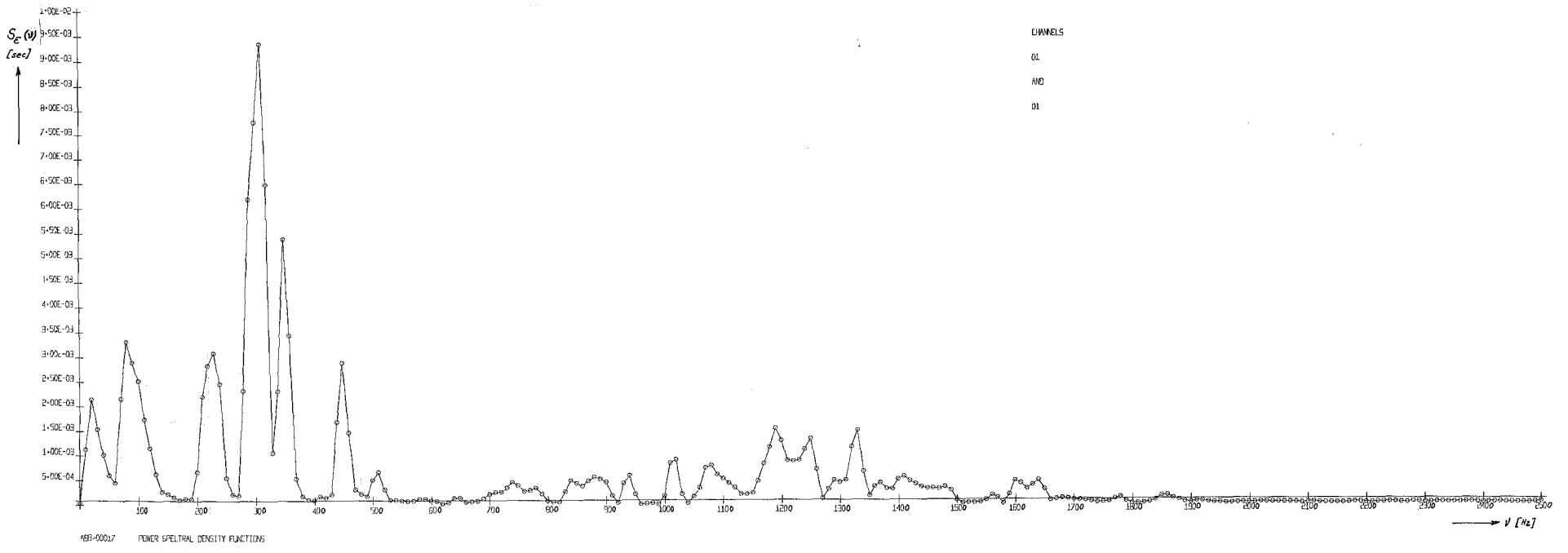
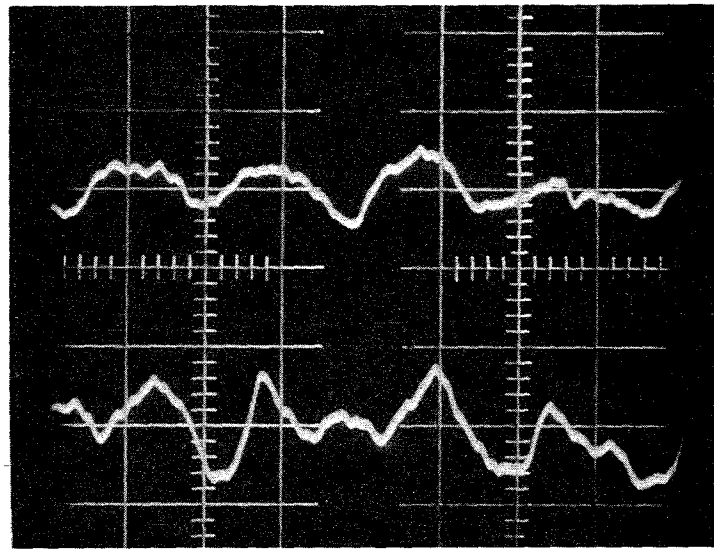


Bild 16: Autokorrelationsfunktionen



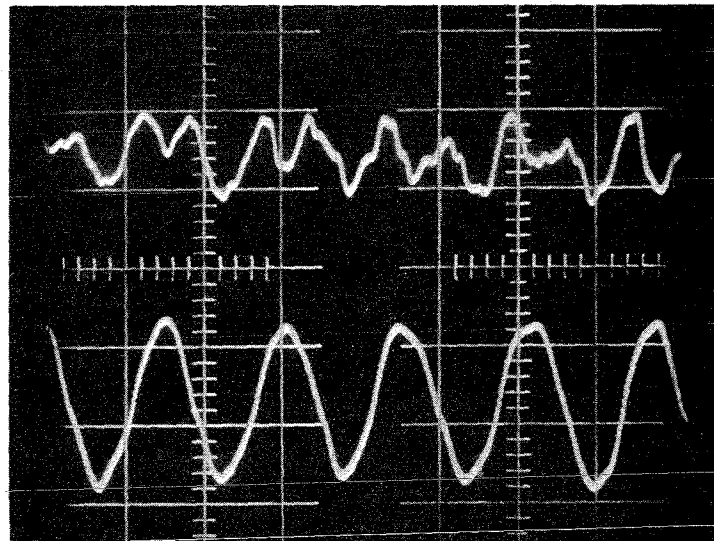
- 45 -

Bild 17: Spektraldichtefunktionen



→ 3 ms/cm

obere Kurve: \mathcal{E}_{ref} $w = 1,93 \text{ m/sec}$
 untere " : p_{III} $Re = 1,12 \cdot 10^4$



→ 3,8 ms/cm

obere Kurve: \mathcal{E}_{ref} $w = 1,93 \text{ m/sec}$
 untere " : p_{II} $Re = 1,12 \cdot 10^4$

Bild 18: Resonanzerscheinungen

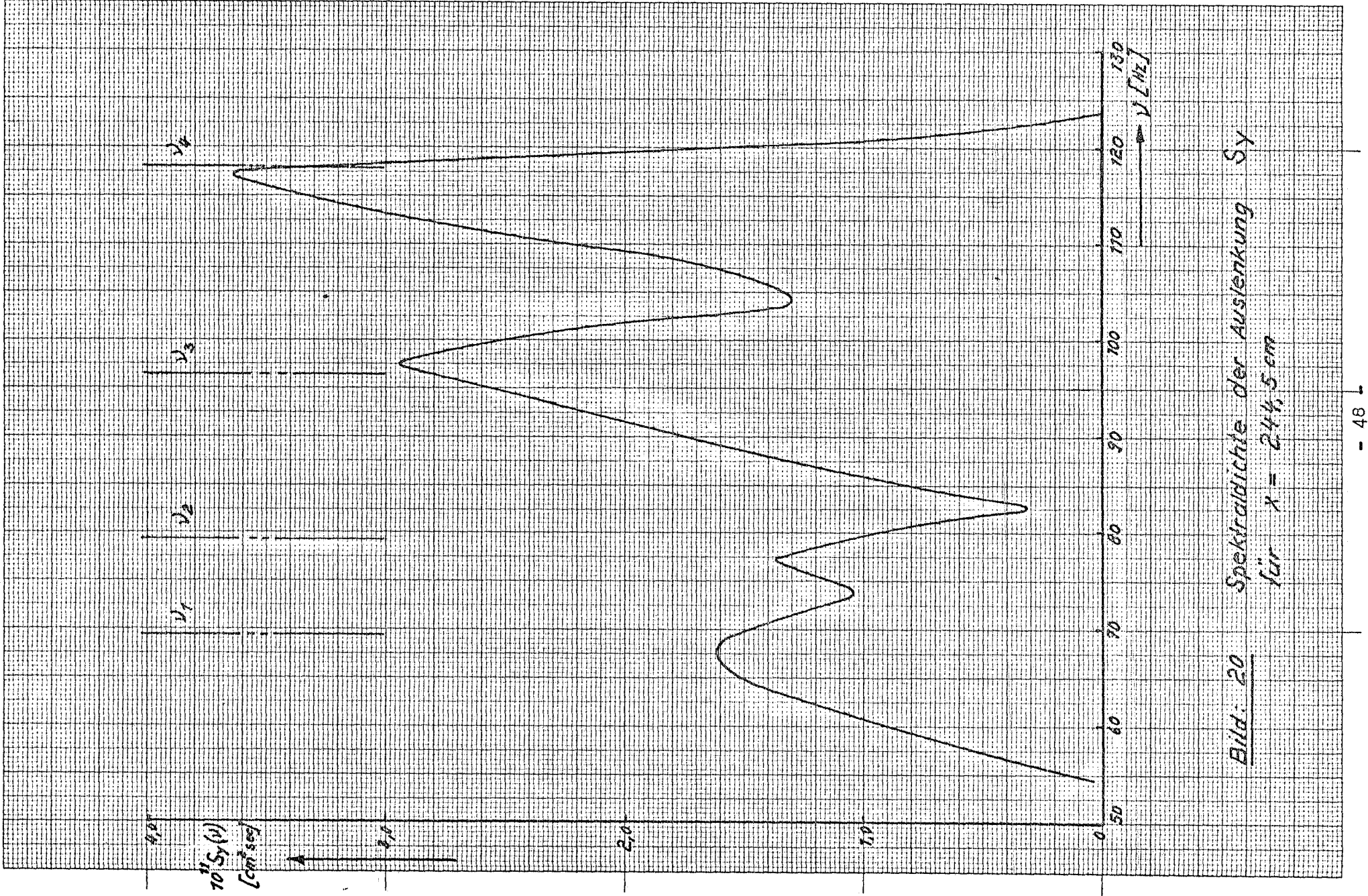


Bild: 20 *Spektraldichte der Auslenkung S_y für $\alpha = 244,5 \text{ cm}$*

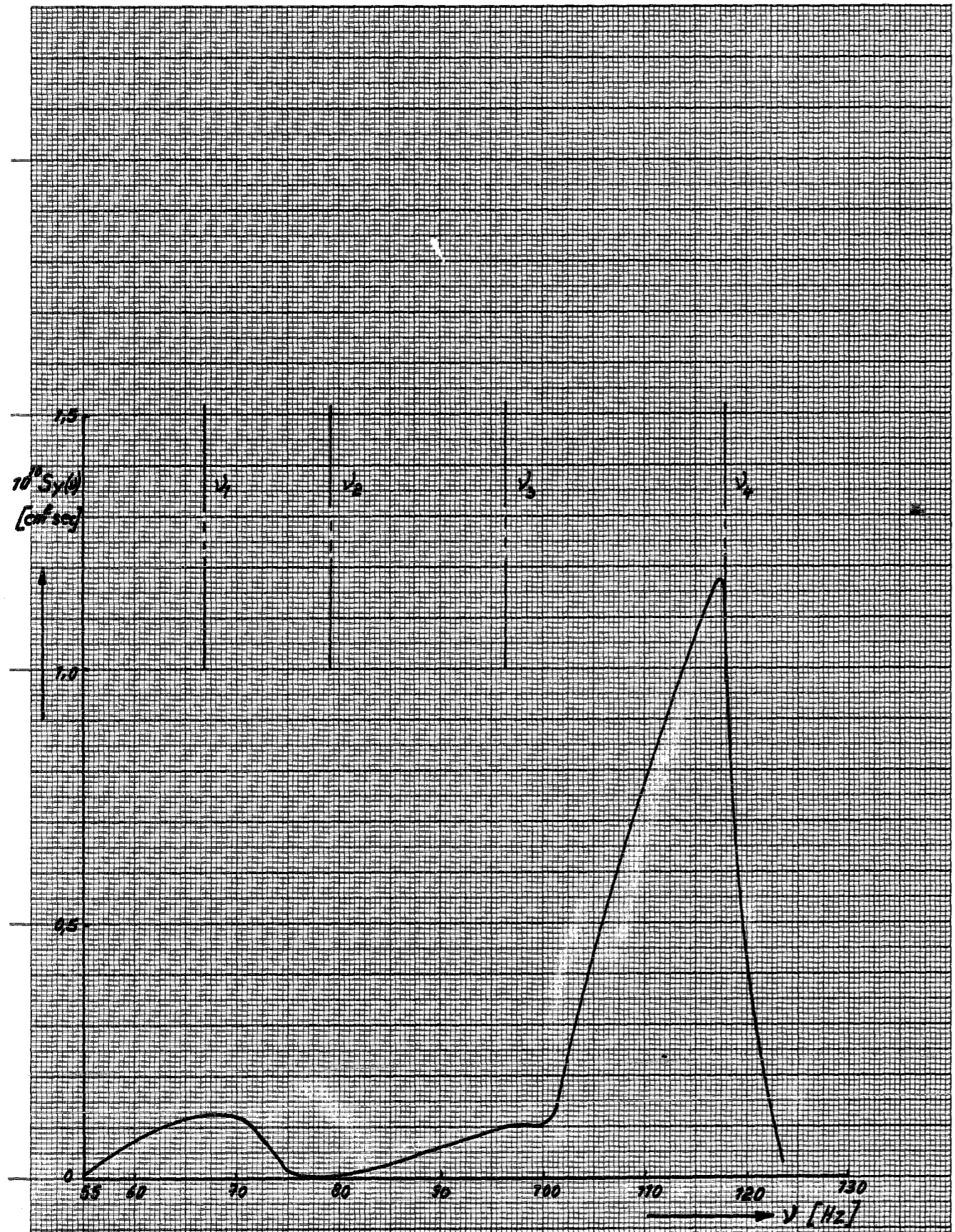


Bild: 21 Spektraldichte der Auslenkung S_y
für $x = 215,5 \text{ cm}$

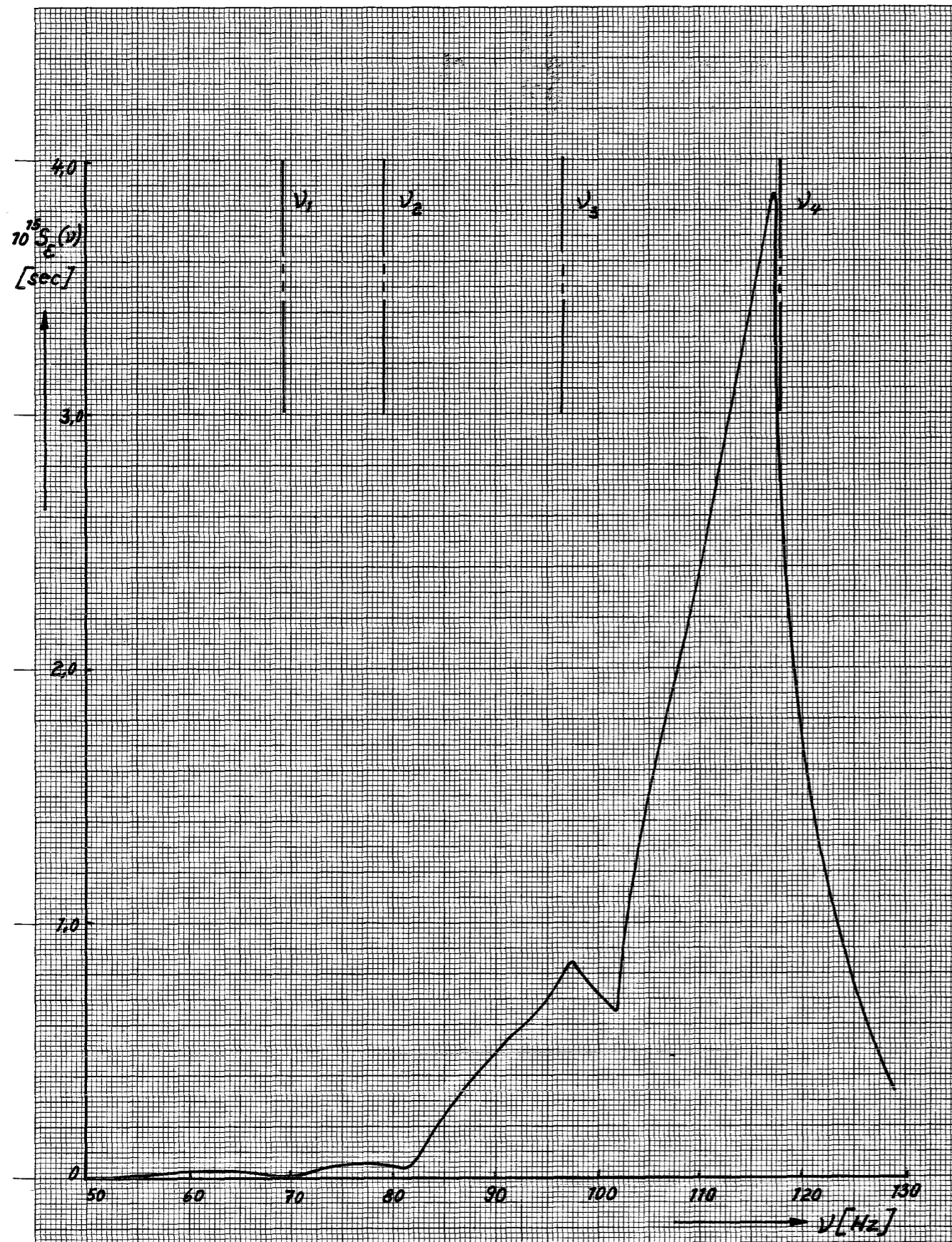


Bild 22 Spektraldichte der relativen Biegedehnung S_e
für $x = 228,5 \text{ cm}$

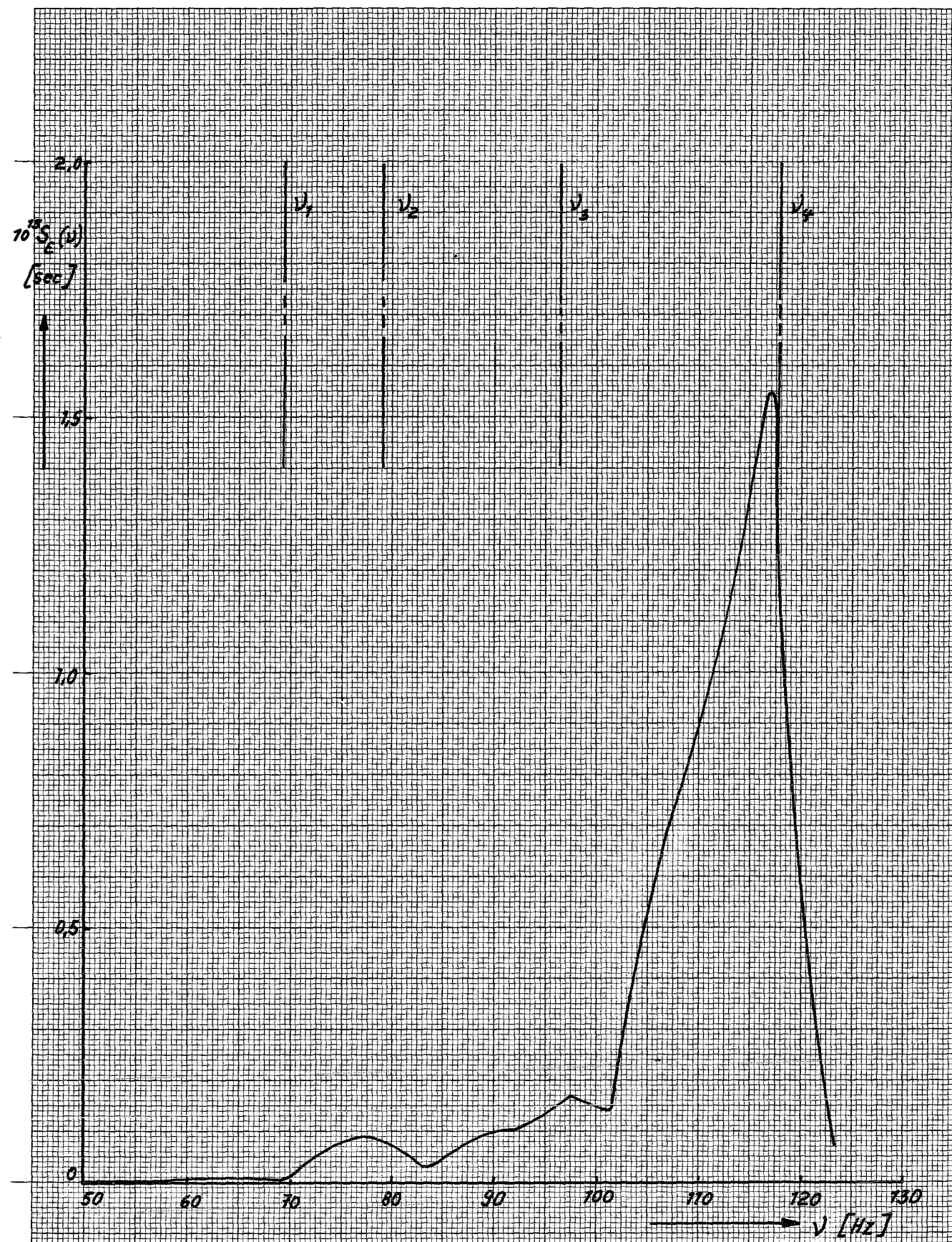


Bild: 23 Spektraldichte der relativen Biegedehnung S_e
für $x = 196,5$ cm

j	$\gamma_{j\text{ber}}$	$\gamma_{j\text{gem}}$	$10^5 \sqrt{y_j^2} \text{ [cm]}$		$10^8 \sqrt{\epsilon_j^2} \text{ [1]}$	
	[Hz]	[Hz]	x = 244,5	x = 215,5	x = 228,5	x = 196,5
1	69,2	67,5	1,465	2,00	1,414	1,265
2	79,1	77,5	0,955	0	2,0	38,70
3	96,3	97,5	2,00	1,482	10,05	6,55
4	117,8	117,8	1,765	5,410	22,24	19,0

Tabelle 1: Quadratischer Mittelwert der Auslenkung und der relativen Biegedehnung in den Frequenzbändern der ersten vier Eigenfrequenzen

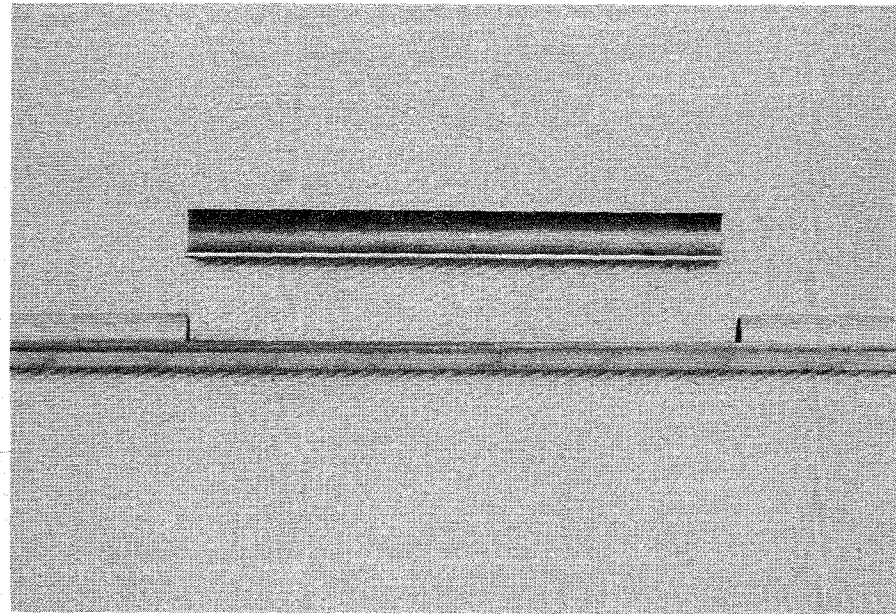


Bild A1: Brennstabrohr mit Ausfräsung und
Deckel-Halbschale

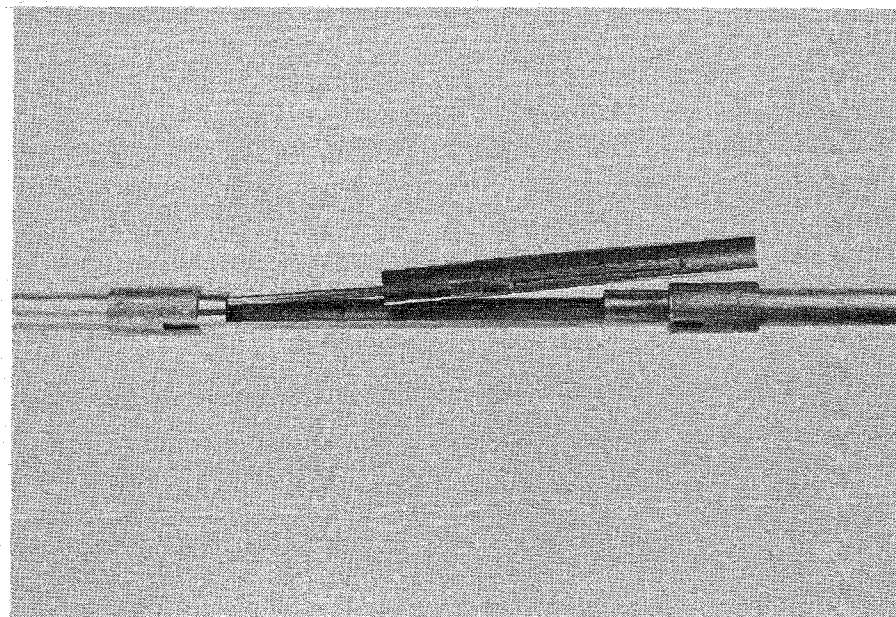


Bild A2: Brennstabrohr und Halbschale mit
eingeschweißtem Dehnmeßstreifen

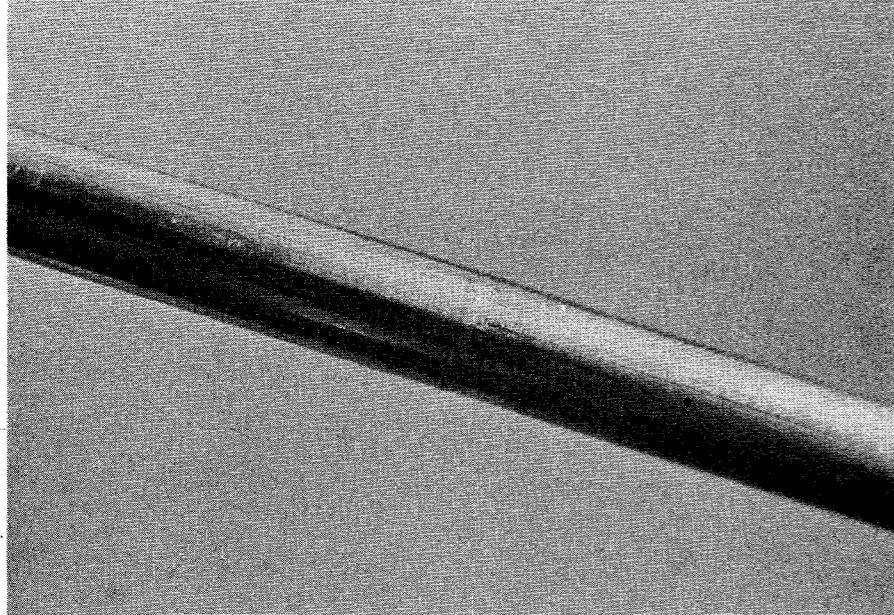


Bild A3: Brennstabrohr nach der Elektronenstrahlschweißung der Halbschale mit dem Rohr

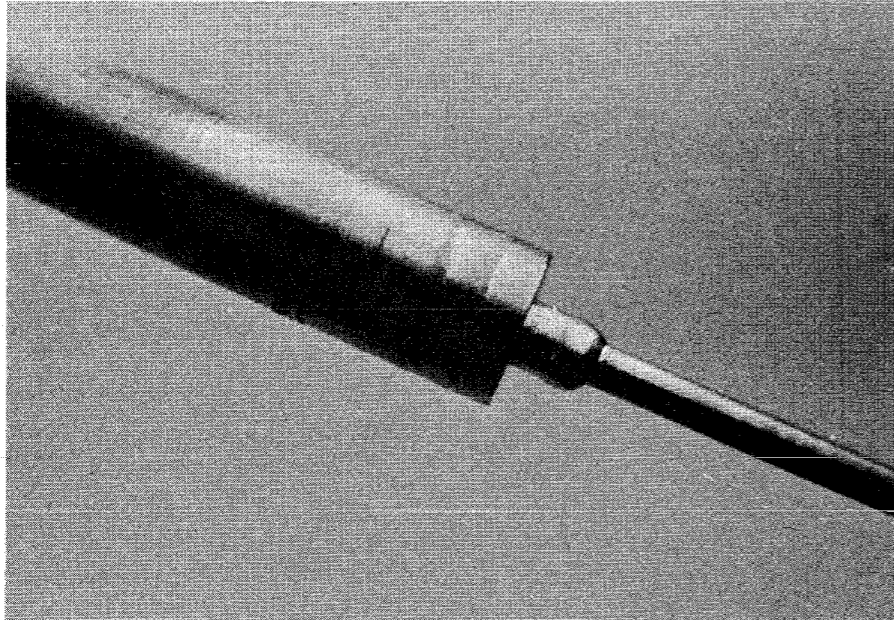
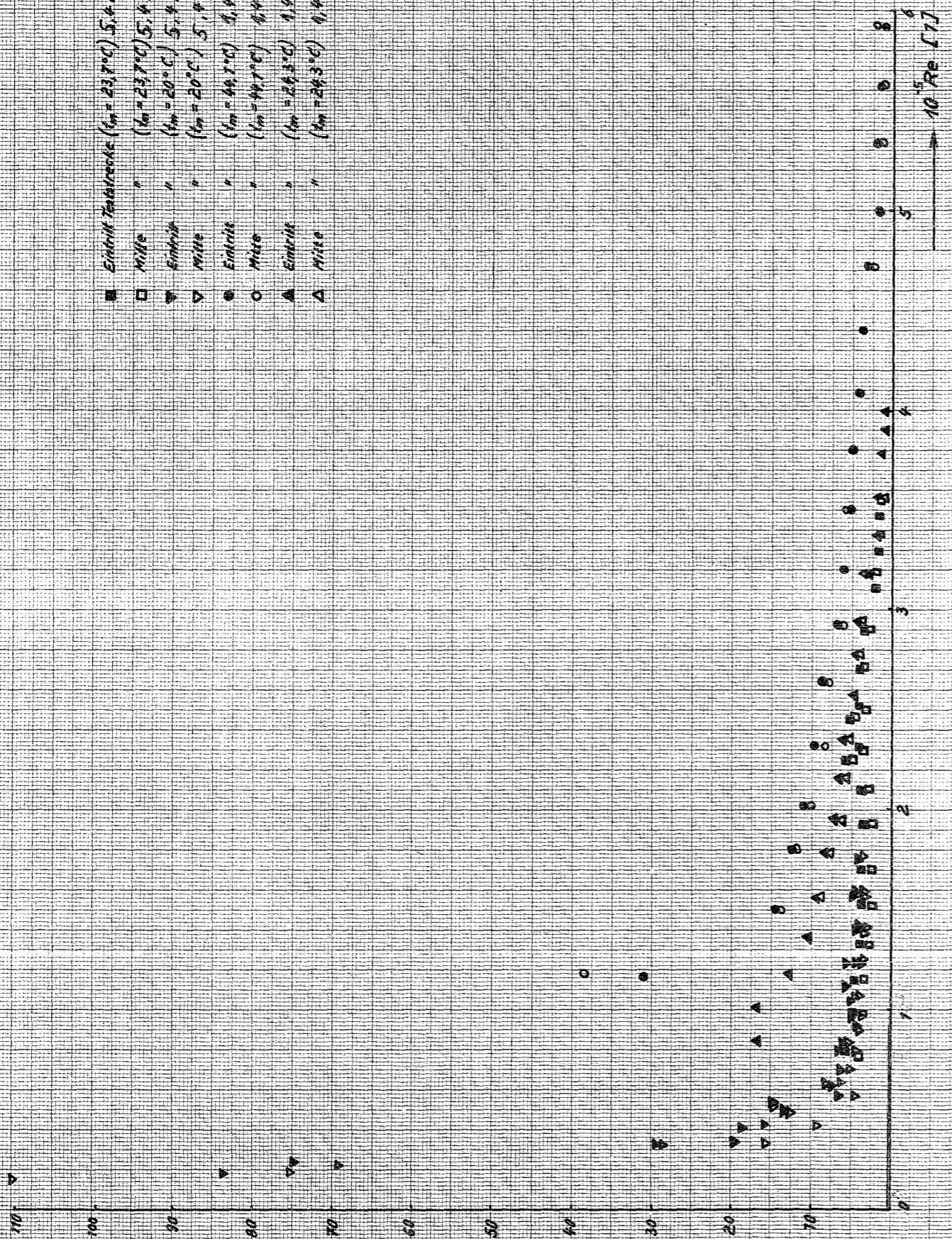


Bild A4: Brennstabrohrende mit Schweißung der Kapillarrohrdurchführung

$\frac{\sqrt{p}}{\rho}$
[17]



■	Eintritt Testrecks ($v_m = 23,7^\circ\text{C}$)	5,4 mWS	Saugdruck
□	Mitte "	($v_m = 23,7^\circ\text{C}$)	5,4 mWS
▽	Eintritt "	($v_m = 20^\circ\text{C}$)	5,4 mWS
△	Mitte "	($v_m = 20^\circ\text{C}$)	5,4 mWS
●	Eintritt "	($v_m = 49,2^\circ\text{C}$)	9,4 mWS Saugdruck
○	Mitte "	($v_m = 49,2^\circ\text{C}$)	9,4 mWS
▲	Eintritt "	($v_m = 24,3^\circ\text{C}$)	9,4 mWS
△	Mitte "	($v_m = 24,3^\circ\text{C}$)	9,4 mWS

Bild A5: Druckpulsationen im Versuchskreislauf

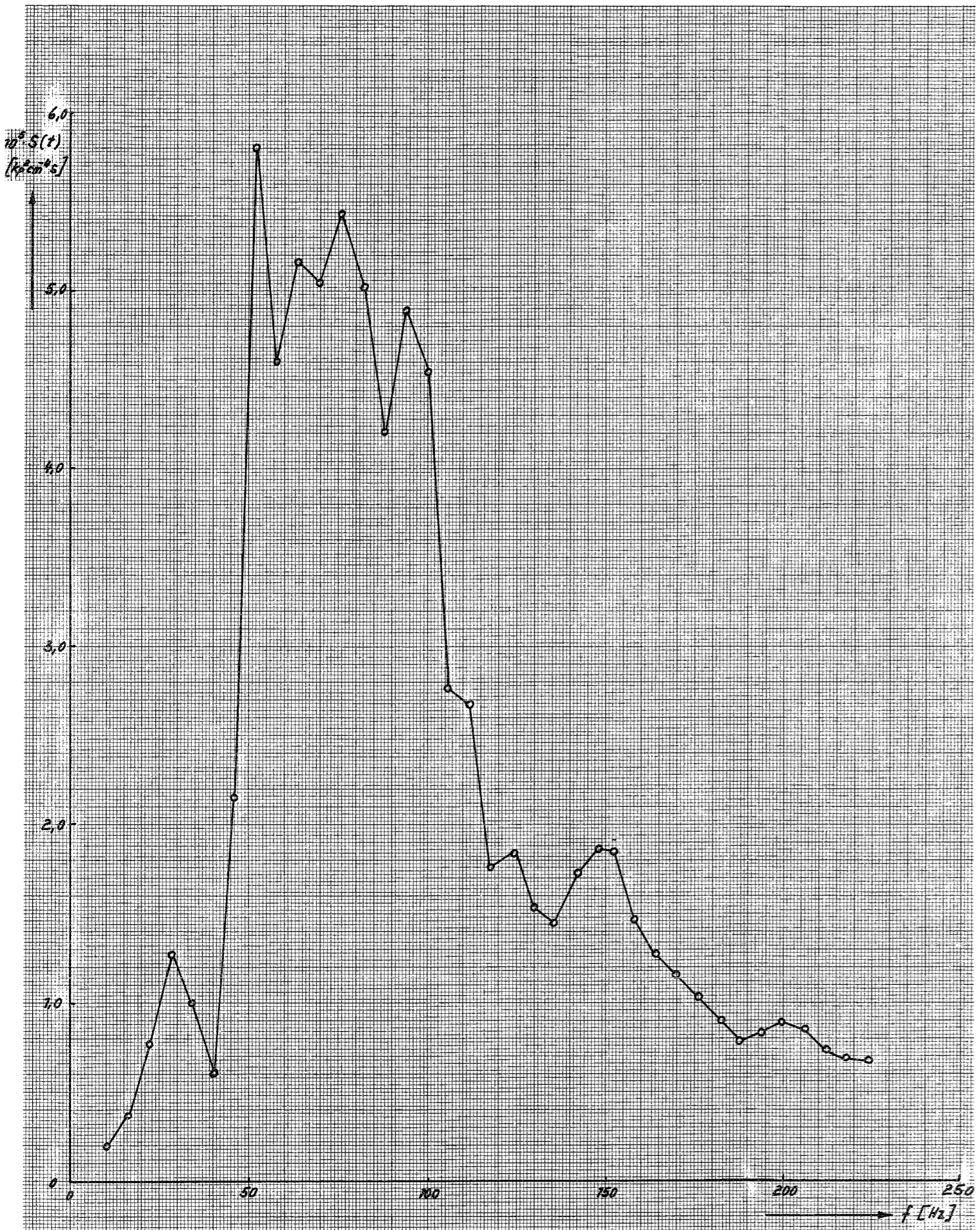


Bild A 6: Spektraldichte der Druckpulsationen im Versuchskreislauf

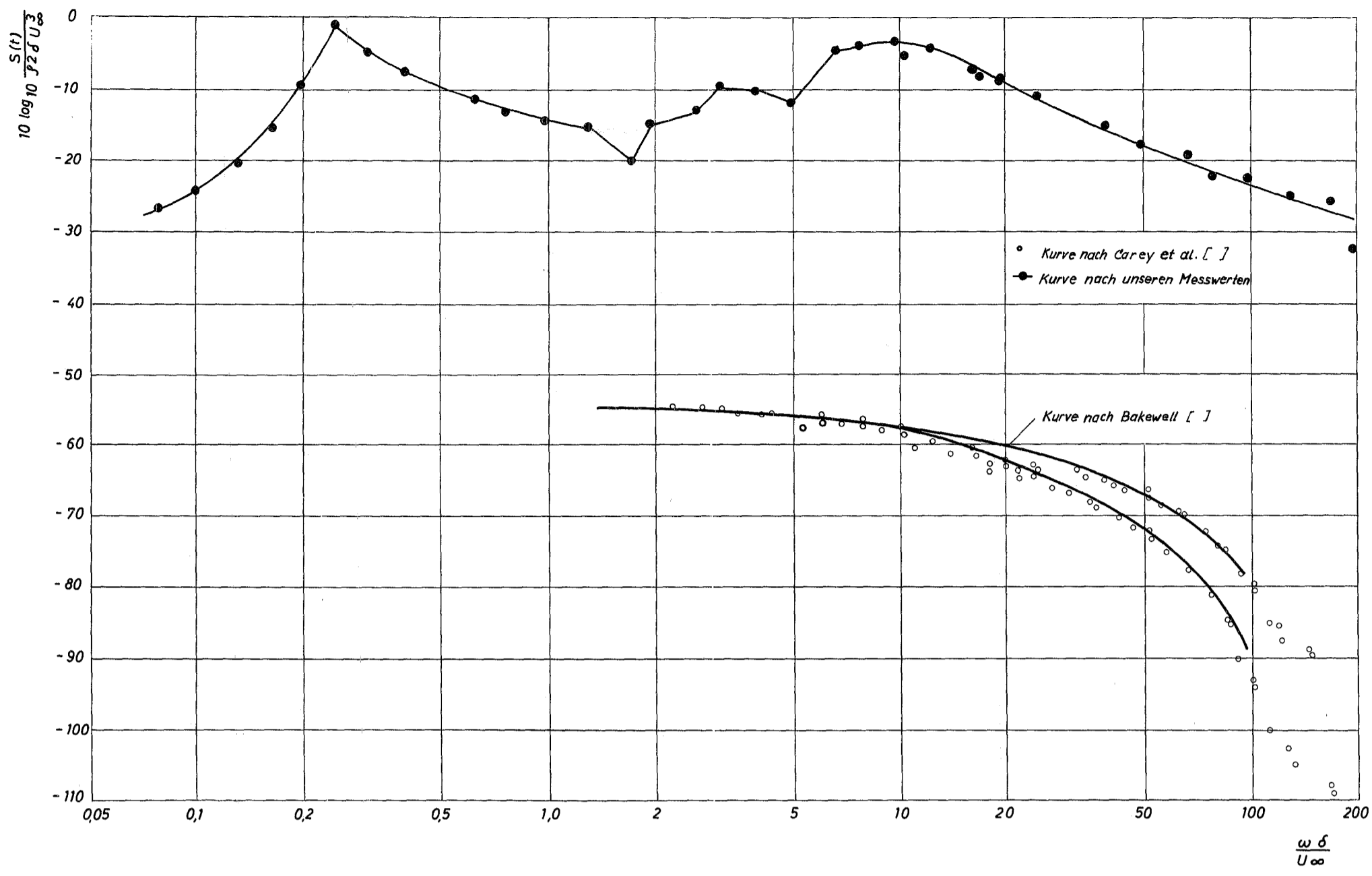


Bild A 7: Dimensionslose Spektraldichte der Druckpulsationen im Versuchskreislauf

