

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

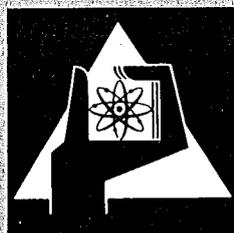
Dezember 1973

KFK 1894

Institut für Reaktorentwicklung

**Untersuchung des Einflusses der Abstandshalter auf die
hydrodynamisch induzierte Schwingung der
Brennelementplatten des Hochflußreaktors Grenoble**

A. De Grande, J. Kadlec



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorentwicklung

KFK 1894

Untersuchung des Einflusses der Abstandshalter
auf die hydrodynamisch induzierte Schwingung
der Brennelementplatten des Hochflußreaktors
Grenoble

A. De Grande
J. Kadlec

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der experimentellen Untersuchung der hydrodynamisch induzierten Schwingung an den Brennelementplatten des Hochflußreaktors Grenoble für zwei technologische Varianten des Brennelementes. Der Einfluß der Abstandshalter auf die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenschwingungsformen einer Brennelementplatte wurden an einem Versuchsstand mit elektromagnetischer Schwingungserregung untersucht. Die Untersuchung des Einflusses der Abstandshalter auf die hydrodynamisch induzierte Schwingung der Brennelementplatten wurde an einem Wasserversuchskreislauf durchgeführt. Dafür wurde ein Brennelementsegment mit vierzehn Brennelementplatten benutzt. Der Aufbau der experimentellen Anordnung und die Resultate der Experimente sind detailliert beschrieben und diskutiert.

Abstract

Investigation of the Influence of Spacers on the Flow-Induced Vibrations of Fuel Plates of the Grenoble High Flux Reactor

This work deals with the experimental investigation of the parallel flow-induced vibrations of fuel plates for two technological variants of the fuel assembly. The influence of spacers on the natural frequencies and on corresponding normal modes of one fuel plate was investigated on experimental equipment with electromagnetic excitation of vibrations. Investigations were carried out of the influence of spacers on the flow induced vibrations of the fuel plates, using the segment of the fuel assembly with fourteen plates. A detailed description is presented of the experimental facilities used and the results of the experiments are indicated and discussed.

Zusammenfassung

Abstract

| | |
|---|----|
| 1. Einleitung und Formulierung der Aufgabe | 1 |
| 2. Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser | 2 |
| 2.1 Versuchsaufbau | 2 |
| 2.2 Resultate der Untersuchungen | 4 |
| 2.2.1 RMS-Werte | 5 |
| 2.2.2 Kreuzspektraldichtefunktionen | 7 |
| 3. Schwingungsuntersuchungen im Labor | 11 |
| 3.1 Versuchsaufbau | 12 |
| 3.2 Resultate der Untersuchungen | 12 |
| 4. Schlußfolgerungen | 14 |
| Literatur | 15 |

1. Einleitung und Formulierung der Aufgabe

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Schwingungsuntersuchungen wurden aufgrund von Aufträgen des Instituts Max von Laue - Paul Langevin (Hochflußreaktor Grenoble) im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung des Schwingungszustandes der Brennelementplatten für jede der zwei vorgesehenen technologischen Varianten des Brennelementes (mit und ohne Abstandshalter) und für die im Reaktorbetrieb naheliegende Bedingung (Wassergeschwindigkeit 15,5 m/sec). Die erarbeiteten Resultate sollten den Auftraggeber bei der Festlegung der endgültigen technologischen Variante des Brennelementes unterstützen.

Das für die Untersuchungen angefertigte Brennelementmodell ist in Abb. 1 und 2 dargestellt. Es umfaßt zwei Testsegmente mit je 14 Brennelementplatten und zwei kammförmigen Abstandhaltern an der Eintritts- und Austrittsseite des Kühlmittels. Eines dieser Segmente wurde für Schwingungsuntersuchungen instrumentiert, wie es in Kap. 2 detailliert spezifiziert ist.

Bei der Durchführung der Arbeiten wurde ein zweistufiges, im Bericht [1] näher erläutertes Untersuchungsverfahren benutzt. Im ersten Schritt dieses Verfahrens werden die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenfunktionen der freien Schwingung einer einzelnen Brennelementplatte im Labor bestimmt. Aufgrund der dabei gewonnenen Resultate werden geeignete Meßpositionen für die Instrumentierung der für die Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser bestimmten Platten mit Referenzdehnungsmeßstreifen ausgewählt. Im zweiten Schritt werden die Zeitverläufe der in den Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser gewonnenen Signale der Referenz-DMS registriert und ausgewertet. Diese Versuche werden in einem Wasserversuchskreislauf durchgeführt, wobei die instrumentierten Platten im Brennelementmodell montiert sind.

Der Versuchsaufbau und die Resultate der Schwingungsuntersuchungen werden für beide technologische Variationen des Brennelementes in Kap. 2 erläutert und diskutiert. Die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenschwingungsformen der Brennelementplatte des Hochflußreaktors Grenoble wurden schon in der Arbeit [1] detailliert untersucht. Dabei

wurden auch die Meßpositionen für die Referenz-DMS bestimmt. Im Rahmen der in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden deshalb nur zwei typische Eigenschwingungszustände für jede technologische Variante der Brennelementplatte untersucht. (Kap. 3) Die aus der gesamten Arbeit resultierenden Schlußfolgerungen sind in Kap. 4 kurz zusammengefaßt.

2. Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser

2.1 Versuchsaufbau

Das in Abb. 1 und 2 abgebildete Brennelementmodell wurde bei der Fa. CERCA in Romans (Frankreich) hergestellt und instrumentiert. Dieses Modell unterscheidet sich vom Originalbrennelement in folgenden vier Punkten:

1. der Brennstoff der Brennelementplatten ist nicht angereichert;
2. nicht alle Plattenpositionen sind besetzt;
3. ein Segment wurde für Schwingungsuntersuchungen instrumentiert, ein zweites für Strömungsuntersuchungen (über Strömungsuntersuchungen wird im Bericht [2] separat berichtet).
4. Mit Ausnahme von beiden für die Untersuchungen bestimmten Segmente wurde aus Festigkeitsgründen der übrige Hohlraum zwischen den beiden konzentrischen Rohren mit einer Kunstharzfüllung ausgefüllt.

Alle anderen Werkstoffe und Dimensionen sowie auch die Herstellungstechnologie entsprachen dem Originalbrennelement.

Das für die Schwingungsuntersuchungen bestimmte Segment des Brennelementes besteht aus 14 Brennelementplatten und 13 Unterkanälen. Die beiden äußeren Platten sind mit der Kunstharzfüllung fest verbunden und bilden die zwei äußeren Wände in Umfangsrichtung des Versuchssegments. Die übrigen zwei Außenwände werden von den beiden konzentrischen Rohren des Brennelementes gebildet (Abb. 2). Die beiden, den evolventen Außenwänden des Versuchssegmentes benachbarten Platten wurden nicht instrumentiert. Die übrigen zehn Brennelementplatten, die in der Mitte des Testsegments positioniert sind, wurden insgesamt mit 20 Hochtemperatur-DMS bestückt. Diese, gegen die Wassereinwirkung speziell präparierten

DMS, wurden in Gruppen von 1-3 DMS/Platte installiert. Dafür wurden zwei DMS-Typen eingesetzt: DMS-Typ EA-13-125TD-120 der Fa. MICRO-MEASUREMENTS (wird weiter in diesem Bericht als Typ A bezeichnet) und der DMS-Typ BAE-13-125TD-120 der Fa. BEAN (wird als Typ B bezeichnet). Die DMS mit den entsprechenden Anschlußdrähten wurden mit dem Hochtemperaturcement Typ GA 60 der Fa. VISHAY-MICROMESURE auf die Brennelementplatten aufgeklebt und mit einer Isolationsschicht des Abdeckmittels Typ M 600 der gleichen Firma abgedeckt. Danach erfolgte noch eine vierfache Abdeckung mit dem Hochtemperaturcement Typ GA 60. Die Gesamtdicke aller Schichten beträgt 0,3-0,45 mm. Die Anschlußdrähte wurden in 1,5 mm breiten und ca. 0,2 mm tiefen Nuten eingebettet und durch das Außenrohr aus dem Brennelement herausgeführt.

In der Arbeit [1] wurden 13 Meßpositionen für die DMS spezifiziert, die für die Erfassung der 6 ersten Eigenschwingungszustände der Brennelementplatte ausgewählt wurden. Da während der Brennelement-Entwicklungsarbeiten die Abstände zwischen den Schweißnähten geändert wurden, wurden auch die Meßpositionen geringfügig geändert. Endgültige Meßpositionen von 17 während der Versuche eingesetzten DMS sind in der Tab. 1 angegeben (die Positionen von den ausgefallenen DMS Nr. 1A, 3 und 13 wurden weggelassen). Ebenfalls angegeben ist der entsprechende DMS-Typ und die Nummer der Brennelementplatte auf dem der gegebene DMS installiert ist. Die Nummerierung der instrumentierten Platten erfolgt im Uhrzeigersinn, von der unteren Seite des Brennelementes aus gesehen. Der Nullpunkt des Koordinatensystems für die Positionsbestimmung der DMS wurde unten auf der äußeren Seite der Brennelementplatte festgesetzt. Die DMS der Grundreihe sind in sechs, den einzelnen Schwingungszuständen zugeordneten Gruppen folgendermaßen gruppiert: DMS (1,2); (3(beschädigt),4); (5,6,7); (8); (9,10); (11,12,13(beschädigt)). Die DMS 2A, 9A, 10A, 11A, 12A und 13A haben die gleichen Koordinaten wie die DMS der Grundreihe, sind aber auf anderen, benachbarten Platten installiert. Ziel dieser Anordnung war es, folgende Arbeiten durchzuführen:

1. Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Plattenschwingung;
2. Überprüfung, ob es zu einem gekoppelten Schwingungszustand von zwei benachbarten Platten (in Phase oder Gegenphase) kommt.

In der letzten Zeile der Tab. 1 ist die x-Koordinate der Druckmeßposition angegeben. Der entsprechende Druckaufnehmer Typ CQL-080-200 der Fa. KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. (Membrandurchmesser 1,9 mm) wurde in

das äußere Brennelementrohr zwischen den Platten Nr. 6 und 7 eingeschraubt.

Das Brennelementmodell wurde im Wasserversuchskreislauf (Abb. 3) des Instituts für Reaktorentwicklung eingebaut [2]. Die Durchströmung des Brennelementes erfolgte von oben nach unten, der entsprechende Wasserdurchsatz wurde durch die Änderung der Pumpendrehzahl geregelt. Ein Teil der Teststrecke mit eingebautem Brennelementmodell und angeschlossenen Instrumentierungskabeln ist in Abb. 4 dargestellt.

Das Blockschema der bei den Schwingungsversuchen angeschlossenen Meß- und Registriergeräte zeigt Abb. 5. Die DMS 1 bis 13A und der Druckaufnehmer DA V wurden an die Trägerfrequenz-Meßapparatur Typ 15TF20 der Fa. IMP (Trägerfrequenz 20 kHz) angeschlossen. Die verstärkten Signale wurden mit einem Magnetbandgerät Typ CPR 4010 der Fa. BELL AND HOWELL im FM-Verfahren analog registriert. Parallel dazu wurden die Signale auf dem Schirm des Monitoroszillographes Typ 545A der Fa. TEKTRONIX beobachtet und der entsprechende Effektivwert der Spannung wurde mit einem RMS-Voltmeter Typ 3400A der Fa. HEWLETT-PACKARD gemessen.

Für die Berechnung der Kreuzspektraldichtefunktionen der gemessenen Signale wurden diese vom Analogband gelesen und auf einer rechnergesteuerten Meßwerterfassungs- und Aufarbeitungsanlage mit der Abfragefrequenz von 5000 Hz simultan abgefragt, digitalisiert und im IBM-kompatiblen Format auf ein Digital-Magnetband gespeichert. Die beschriebenen Bänder wurden dann auf den Rechenanlagen IBM 370/165 und 360/65 weiter verarbeitet. Diese Verarbeitung erfolgte mit dem Programmsystem SEDAP [3;4].

2.2 Resultate der Untersuchungen

Die Schwingungsuntersuchungen am HFR-Brennelementmodell im strömenden Wasser werden in vier Meßreihen mit unterschiedlichen Kombinationen der angeschlossenen Aufnehmer durchgeführt. Dabei erfolgten die Messungen der ersten zwei Meßreihen mit eingebauten Abstandshaltern an der Strömungs-Eintritts- und -Austrittsseite des Testsegments (Abb. 6 und 7). Bei den letzten zwei Meßreihen wurden die Abstandshalter ausgebaut (Abb. 8 und 9). Die Wassertemperatur bei allen Versuchen betrug ca. 40 °C. Dieser Wert liegt nahe der mittleren Betriebstemperatur des Kühlmittels im Brennelement. In jeder Meßreihe wurden ca. 17 Messungen bei unterschiedlichen Wassergeschwindigkeiten durchgeführt. Die dabei erreichten Werte der mittleren Wassergeschwindigkeit w liegen im Intervall 6,5 bis

15,3 m/sec. Der Nominalwert der mittleren Wassergeschwindigkeit $w = 15,5$ m/sec konnte zwar mit dem gegebenen Wasserkreislauf nicht erreicht werden, aber der für die Schwingungsanregungen ausschlaggebende Nominalwert des mittleren dynamischen Druckes $q = 11\ 900$ kp/m² wurde erreicht.

2.2.1 RMS-Werte

In den Abbildungen 10 bis 26 sind die normierten RMS (root mean square)-Werte den gemessenen Biegedehnungen $\sqrt{\epsilon_j^2}$ von allen DMS-Meßstellen gegen die Reynoldszahl $Re = \frac{wD_H}{\nu}$ aufgetragen. Als Normierungsgröße wurde der mittlere dynamische Druck des strömenden Wassers $q = \frac{1}{2} \rho w^2$ genommen. Die mittlere Wassergeschwindigkeit w bezieht sich auf den freien Strömungsquerschnitt im Testsegment, D_H ist der entsprechende hydraulische Durchmesser, ν die kinematische Viskosität und ρ die Dichte des Wassers. Erwartet wurde eine funktionelle Abhängigkeit der gemessenen Größen in der Form

$$\frac{\sqrt{\epsilon_j^2}}{q} = C_1 Re^{-C_2} + C_3 \quad (1)$$

wie im Fall der hydrodynamisch induzierten Brennstabschwingung [57] (Symbole C_1 , C_2 und C_3 bezeichnen positive Konstanten). Die Bestätigung der Gültigkeit einer solchen Abhängigkeit würde bedeuten, daß die Plattenschwingung nur von den in der Grenzschicht des strömenden Wassers erzeugten Druckpulsationen angeregt wird. Wie in den Diagrammen in Abb. 10 bis 26 zu erkennen ist, ist diese Tendenz in vielen Fällen vorhanden. Diese Tatsache ist nicht überraschend, da die turbulenten Druckpulsationen in jedem Fall in der Grenzschicht des strömenden Wassers erzeugt werden. Auffallend ist die ziemlich starke Streuung der Meßpunkte und hauptsächlich das Auftreten von Peaks, die insbesondere in den Abb. 13, 16, 21 und 26 gut zu erkennen sind. Diese Tendenzen deuten auf die Entstehung von Resonanzen oder Rückkopplungen hin, die allerdings mit ausgeprägten periodischen Anteilen in der sonst randomen Schwingung begleitet werden müssen. Solche periodischen Anteile konnten auch in den gemessenen Signalen beobachtet werden. Bei manchen DMS wurden sie in allen Messungen erkennbar (z.B. Signale von DMS 13A in Abb. 27), bei anderen traten sie nur bei bestimmten Wassergeschwindigkeiten auf (z.B. Signale von DMS 10A in Abb. 28).

In Abb. 29 sind die normierten RMS-Werte der mit dem Druckaufnehmer DA V gemessenen Druckpulsationen $\sqrt{p_v^2}$ gegen die Reynoldszahl Re aufgetragen. Die Messungen der Druckpulsationen wurden bei allen vier Meßreihen vorgenommen. Die Meßdaten der ersten zwei Meßreihen (Symbole \circ und \square) genügen gut der modifizierten Gl. (1)

$$\frac{\sqrt{p_v^2}}{q} = C_1' Re^{-C_2'} + C_3' \quad (2)$$

wie es auch erwartet wurde. Bei hohen Reynoldszahlen ist der erste Term auf der rechten Seite der Gl. (2) vernachlässigbar klein, so daß sich ergibt

$$\frac{\sqrt{p_v^2}}{q} \doteq C_3' = 0,022 \quad (3)$$

Das bedeutet, daß bei den hohen Reynoldszahlen der RMS-Wert der Druckpulsationen nur etwa 2,2 % des dynamischen Druckes des strömenden Wassers beträgt. Dieses Resultat ist in guter Übereinstimmung mit den in Kreisläufen mit niedrigem Turbulenzniveau gemessenen Daten [6] und deutet darauf hin, daß die schwingungserzeugenden Druckpulsationen überwiegend in der turbulenten Grenzschicht des strömenden Wassers entstehen und daß der Anteil der von anderen Teilen des Kreislaufes in das Brennelement angekommenen Druckpulsationen klein ist. Aus diesem Grund können die von außen ankommenden Druckpulsationen kaum eine Resonanzschwingung der Platten anregen, so daß das Vorhandensein von Peaks in den Diagrammen 13, 16, 21 und 26 auf die Entstehung von hydrodynamischen Instabilitäten im Brennelement hindeutet. Die bei den letzten zwei Meßreihen gewonnenen Daten in Abb. 29 (Symbole \diamond und $+$) unterscheiden sich von den vorherigen in folgenden zwei Punkten:

- 1) die Daten sind wesentlich kleiner als entsprechende Daten der ersten zwei Meßreihen;
- 2) die Abhängigkeit (2) gilt (mit anderen Werten der Konstanten C_1' , C_2' und C_3') nur bei kleinen Reynoldszahlen. Bei $Re = 7,2 \cdot 10^4$ nehmen die Daten sprunghaft etwa um 50 % zu. Aufgrund des ersten Phänomens kann man schließen, daß im Brennelement eine Geometrieänderung zustande kommt, die eine Herabsetzung des hydraulischen Widerstandes des Brennelements und dadurch eine Herabsetzung des Niveaus der Druckpulsationen

zur Folge hat. Das Auftreten des Sprungs im Diagramm 29 läßt sich durch sprunghafte Änderung der Geometrie erklären. Eine bleibende Durchbiegung der Platten wurde nach dem Abschluß der letzten Meßreihe festgestellt als das Brennelement aus dem Wasserversuchskreislauf ausgebaut wurde. Das wahrscheinlich durch hydrodynamische Instabilität verursachte Zusammenklappen der Platten wurde fotografiert und in Abb. 30 und 31 abgebildet. Nach den Versuchen der ersten zwei Meßreihen (mit Abstandshaltern) wurden keine solche Defekte entdeckt (Abb. 8 und 9). Es ist deshalb sehr wahrscheinlich, daß der Stabilitätsverlust der Brennelementplatten erst durch den Ausbau der Abstandshalter zustande kam.

Wie es aus dem Vergleich der Meßresultate der duplizierten Meßstellen (z.B. DMS 10 und 10 A in Abb. 24 und 25) folgt, ist die Entstehung der Instabilitäten und das Schwingungsniveau der verschiedenen Brennelementplatten nicht reproduzierbar. Es kann vermutet werden, daß die bei dem Einbau der Platten im Brennelement entstehenden Vorspannungen dabei eine wichtige Rolle spielen.

Das wichtigste Ergebnis der Messungen der RMS-Werte ist das sehr niedrige Niveau der Druckpulsationen ($\sqrt{p_v^2} = 0,022 \text{ q}$) und der entsprechenden relativen Biegedehnungen der schwingenden Platten ($\sqrt{\epsilon^2} = (3-24) \cdot 10^{-10} \text{ q}$) bei hohen Reynoldszahlen. Für die Betriebsparameter des Kühlmittelstromes ($w = 15,5 \text{ m/sec}$, $\nu = 30 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$) ergibt sich dann entsprechend auch ein niedriges Niveau der durch die Schwingung hervorgerufenen Biegedehnungen der Brennelementplatten $\sqrt{\epsilon^2} = 28 \cdot 10^{-6}$.

2.2.2 Kreuzspektraldichtefunktionen

Ziel der stochastischen Analyse der gemessenen Signale war die Untersuchung folgender Phänomene:

1. spektrale Zusammensetzung der gemessenen Signale;
2. Zusammenwirken zwischen den Druckpulsationen und der Schwingung einer Platte;
3. Feinstruktur der Signale von unterschiedlichen Aufnehmern auf einer Platte;
4. Rückkopplungen zwischen den Schwingungszuständen zwei benachbarter Platten.

Für diesen Zweck wurden von den ausgewählten Signal-Paarungen folgende Funktionen berechnet:

1. Spektraldichtefunktionen $S_{p_V}(\nu)$ bzw. $S_{\epsilon_j}(\nu)$ der gemessenen Druck- bzw. Dehnungssignale $p_V(t)$ und $\epsilon_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, 13$ A, wobei ν die Frequenz und t die Zeit bezeichnen;
2. Betrag $|S_{p_V \epsilon_j}(\nu)|$ bzw. $|S_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)|$ und Phase $\varphi_{p_V \epsilon_j}(\nu)$ bzw. $\varphi_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)$ der Kreuzspektraldichtefunktion $S_{p_V \epsilon_j}(\nu)$ bzw. $S_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)$ nach der Gleichung

$$S_{p_V \epsilon_j}(\nu) = |S_{p_V \epsilon_j}(\nu)| \exp \left\{ -i \varphi_{p_V \epsilon_j}(\nu) \right\}, \quad (4)$$

bzw.

$$S_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu) = |S_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)| \exp \left\{ -i \varphi_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu) \right\}, \quad (5)$$

wobei $i = \sqrt{-1}$;

3. Kohärenzfunktion $K_{p_V \epsilon_j}(\nu)$ bzw. $K_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)$ nach der Gleichung

$$K_{p_V \epsilon_j}(\nu) = \frac{|S_{p_V \epsilon_j}(\nu)|^2}{S_{p_V}(\nu) S_{\epsilon_j}(\nu)}, \quad (6)$$

bzw.

$$K_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu) = \frac{|S_{\epsilon_j \epsilon_k}(\nu)|^2}{S_{\epsilon_j}(\nu) S_{\epsilon_k}(\nu)}. \quad (7)$$

Da das Niveau der gemessenen Signale sehr niedrig ist, wurde die Durchführung der stochastischen Analyse nur auf die Untersuchung von einigen typischen Fällen beschränkt.

Die spektrale Zusammensetzung der gemessenen Druck- und Dehnungssignale ist in den oberen zwei Diagrammen in Abb. 32 graphisch dargestellt. Die für die Analyse ausgewählten Signale $p_V(t)$ und $\epsilon_{11}(t)$ wurden im Rahmen der ersten Meßreihe (Brennelementmodell mit eingebauten Abstandshaltern) bei einer Wassergeschwindigkeit von $w = 14,5$ m/sec aufgenommen und zur Analyse simultan auf das Magnetband gespeichert. Im ersten Diagramm der Abb. 32 ist die Spektraldichtefunktion $S_{p_V}(\nu)$

des gemessenen Drucksignals $p_v(t)$ aufgezeichnet. Die entsprechende Analyse wurde im Frequenzbereich von 0 bis 2500 Hz durchgeführt, die benutzte digitale Filterbandbreite beträgt 2 Hz. Auf dem Diagramm ist zu ersehen, daß der Großteil der Energie der Druckpulsationen im niedrigen Frequenzbereich (unter 350 Hz) konzentriert ist. Schon aus dieser Tatsache läßt sich ableiten, daß die zu erwartende dynamische Reaktion der Brennelementplatten insbesondere bei den höheren Schwingungsformen sehr klein sein wird. Das Diagramm der Spektraldichtefunktion hat eine steil abfallende Exponentialform mit einigen scharfen Peaks bei niedrigen Frequenzen, deren Entstehung mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Wirkung der Umlaufpumpe und der Armaturen zurückzuführen ist. Der Energiegehalt dieser Peaks ist allerdings sehr niedrig, z.B. die RMS-Amplitude die dem Peak mit der mittleren Frequenz von 66 Hz (der größte Peak im diskutierten Diagramm) zugeordnet ist beträgt nur ca. 0,007 kp/cm². Im zweiten Diagramm der Abb. 32 ist die Spektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{11}}(\nu)$ des gemessenen Dehnungssignals $\epsilon_{11}(t)$ aufgezeichnet. Dieses Signal wurde mit dem DMS 11 aufgenommen, der auf der Platte Nr. 7 installiert ist. Da diese Platte unmittelbar neben dem Druckaufnehmer DA \bar{V} im Brennelementmodell montiert ist, gibt die ausgewählte Kombination der Aufnehmer DA \bar{V} - DMS 11 eine gute Übersicht über die dynamischen Auswirkungen der Druckpulsationen im Brennelement. Das Diagramm $S_{\epsilon_{11}}(\nu)$ hat im niederfrequenten Bereich vier markante Peaks bei den Frequenzen 66, 109, 244 und 324 Hz und einen Peak bei 744 Hz. Die dem Peak mit der Mittelfrequenz $\nu = 66$ Hz (der größte Peak) zugeordnete RMS-Amplitude beträgt nur ca. 3 μ D (1 μ D = 1 Mikrodehnung = 10⁻⁶). Alle vier niederfrequenten Peaks sind bei den entsprechenden Frequenzen im Diagramm $S_{p_v}(\nu)$ ebenfalls vorhanden, was auf eine erzwungene Schwingung (trotz niedrigem Energiegehalt) hindeutet. Bei 744 Hz ist im Diagramm der Spektraldichtefunktion der Druckpulsationen kein Peak zu finden, so daß auf Resonanzschwingung im Eigenschwingungsmodell geschlossen werden kann. Im dritten Diagramm der Abb. 32 ist der Betrag der Kreuzspektraldichtefunktion $|S_{p_v \epsilon_{11}}(\nu)|$ der beiden analysierten Signale aufgezeichnet. Bei den Frequenzen 66, 109 und 244 Hz sowie auch bei 744 Hz treten Peaks auf, die auf die Erzeugung der Plattenschwingung durch die Druckpulsationen deuten. Dagegen bei 324 Hz ist hier kein Peak zu finden. Daraus kann man schließen, daß die Plattenschwingung bei dieser Frequenz von außen (wahrscheinlich über die Rohrleitung) induziert wurde. Auch im Diagramm der

Kohärenzfunktion $K_{\epsilon_{11} P \nu}(\nu)$ (unterstes Diagramm in Abb. 32) ist bei 324 Hz kein bedeutsamer Peak zu sehen, was die Existenz eines Zusammenhanges zwischen den Druckpulsationen und der Plattenschwingung bei dieser Frequenz ausschließt. In diesem Diagramm findet man Peaks bei allen drei niedrigsten, schon diskutierten Frequenzen, dann bei 744 Hz und schließlich auch einige breitere Peaks bei den Mittelfrequenzen von 203, 520, 920, 1280 und 1485 Hz, was auf das Zusammenwirken zwischen den Druckpulsationen und der Plattenschwingung bei diesen Frequenzen deutet. Allerdings ist die Energie der Druckpulsationen bei diesen Frequenzen sehr niedrig, so daß keine nennenswerte Schwingung mit größerer Amplitude erzeugt werden kann.

Die Feinstruktur der Signale von DMS 11 A und 13 A, die ebenfalls im Rahmen der ersten Meßreihe bei der Wassergeschwindigkeit $w = 14,5$ m/sec aufgenommen wurden, ist in den vier Diagrammen in Abb. 33 illustriert. Die beiden DMS wurden auf der gleichen Platte installiert, so daß aus den entsprechenden Signalen auf den Schwingungszustand dieser Platte geschlossen werden kann. Im ersten Diagramm der Abb. 33 ist die Spektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{11A}}(\nu)$ aufgezeichnet. Bei den schon diskutierten Frequenzen 66, 109, 244 und 324 Hz sind auch in diesem Diagramm Peaks zu sehen. Darüber hinaus findet man hier noch einige andere kleine Peaks und insbesondere einen großen Peak bei der Frequenz von 163 Hz. Der Energiegehalt dieses Peaks ist aber auch noch niedrig und die entsprechende RMS-Amplitude beträgt nur ca. $4 \mu D$. Im Diagramm der Spektraldichtefunktion des von DMS 13 A aufgenommenen Signals (zweites Diagramm in Abb. 33) ist bei $\nu = 163$ Hz kein markanter Peak feststellbar. Daraus kann man schließen, daß die der Platte zugeführte Energie nicht ausreicht um einen konsistenten Schwingungszustand der Platte hervorrufen zu können. Daß der konsistente Schwingungszustand in Eigenschwingungsformen nicht erreicht wurde, wird anhand des Diagramms der Kohärenzfunktion $K_{\epsilon_{11A} \epsilon_{13A}}(\nu)$ (das dritte Diagramm in Abb. 33) plausibel gemacht. In diesem Diagramm erreicht nur der Peak bei $\nu = 66$ Hz einen Wert über 50 %, was auf eine schwache Korrelation zwischen den Signalen von den Aufnehmern DMS 11 A und 13 A deutet. Im Bereich der Eigenfrequenzen der Platte ($\nu > 200$ Hz) sind keine größere Peaks zu sehen. Falls ein Schwingungszustand in Eigenschwingungsformen zustande gekommen wäre, hätte man bei den entsprechenden Frequenzen markante Peaks finden müssen. Der Vollständigkeit halber ist unten in Abb. 33 das Diagramm der Phase $\varphi_{\epsilon_{11A} \epsilon_{13A}}(\nu)$ aufgezeichnet. Auf diesem Diagramm ist zu sehen, daß bei $\nu = 66$ Hz zwischen den Dehnungssignalen $\epsilon_{11A}(t)$ und $\epsilon_{13A}(t)$ eine Phasenverschiebung von

ca. $-2,2$ rad stattfindet. Aufgrund dieser Tatsache und der schon früher gewonnenen Kenntnissen kann man schließen, daß die Schwingung der Platte bei 66 Hz durch fortschreitende Druckwellen verursacht wird. Die übrigen Daten im Diagramm der Phase sind wegen des kleinen energetischen Gehalts und des kleinen Wertes der Kohärenzfunktion der untersuchten Schwingung unbedeutend und werden deshalb nicht diskutiert.

Die Kopplung der Schwingung der benachbarten Platten Nr. 7 und 8 wird anhand der in Abb. 34 aufgezeichneten Diagramme der Komponenten der Kreuzspektraldichtefunktion der Signale von den DMS 11 und 11 A untersucht. Die beiden Signale wurden ebenfalls im Rahmen der ersten Meßreihe bei einer Wassergeschwindigkeit von $w = 14,5$ m/sec aufgenommen. Die ersten zwei Diagramme stellen die Spektraldichtefunktion der beiden Signale dar, die schon in Zusammenhang mit den Abb. 32 und 33 diskutiert wurden. Die Kohärenzfunktion $K_{\epsilon_{11} \epsilon_{11A}}(\nu)$ der beiden Signale ist im dritten Diagramm der Abb. 34 aufgezeichnet. Auf diesem Diagramm ist zu sehen, daß die Signale bei 66 und 324 Hz ziemlich gut korreliert sind (die entsprechenden Werte sind größer als 60 %), wobei auch bei den Frequenzen $\nu = 109, 163$ und 244 Hz markante Peaks zu erkennen sind. Auf dem Diagramm der Phase (das vierte Diagramm in Abb. 34) ist zu sehen, daß die Schwingung der beiden Platten bei den Frequenzen $\nu = 66, 109, 163$ und 244 Hz praktisch in der Phase liegt, da der Phasenwinkel nur wenig von Null abweicht. Diese Tatsache deutet auf eine Rückkopplung zwischen der Schwingung dieser benachbarten Platten hin. Da aber der energetische Gehalt dieser beiden Schwingungen niedrig ist, hat dieses Phänomen keine größere Bedeutung.

3. Schwingungsuntersuchungen im Labor

Ziel der Untersuchungen war die Feststellung des Einflusses der Abstandshalter auf die Eigenschwingungszustände der Brennelementplatte. Da während der in Kap. 2 beschriebenen Untersuchungen festgestellt wurde, daß die Energie der Druckpulsationen nicht ausreicht, um einen konsistenten Schwingungszustand in Eigenschwingungsformen hervorzurufen, wurde die ursprünglich vorgesehene und in der Arbeit [1] schon einmal realisierte Versuchsreihe nicht im vollen Umfang durchgeführt, die Experimente wurden dann vielmehr auf die Untersuchung von zwei ausgewählten Eigenschwingungszuständen begrenzt.

3.1 Versuchsaufbau

Der für die Untersuchungen benutzte Versuchszustand mit elektromagnetischer Erregung der Plattenschwingung in Eigenschwingungsformen ist im Bericht [1] detailliert beschrieben. Die Schwingungsvorrichtung dieses Versuchszustandes wurde am unteren und oberen Ende der untersuchten Brennelementplatte mit je einer Einspannvorrichtung ergänzt (Abb. 35), mit der die durch die Anschweißung der Abstandshalter im Brennelement entstehende Einspannung der Brennelementplatte simuliert wurde. Die Simulierung der Einspannung erfolgte mit Hilfe von zwei an die Platte angepressten Einspannstücken. Detailaufnahmen der unteren Einspannvorrichtung mit und ohne Einspannung sind in Abb. 36 abgebildet.

3.2 Resultate der Untersuchungen

Es wurden eine symmetrische und eine unsymmetrische Eigenschwingungsform mit und ohne Einspannung untersucht, die entsprechenden Windungszahlen der dabei eingesetzten Elektromagnete sind in der Tabelle 2 angegeben. Für jeden untersuchten Fall wurde eine Resonanzkurve und ein Längsprofil der entsprechenden Eigenschwingungsform gemessen.

Die bei der Untersuchung der symmetrischen Eigenschwingungsform gewonnenen Resonanzkurven sind in Abb. 37 dargestellt, die entsprechenden Resonanzfrequenzen betragen 242 und 253,5 Hz. Daraus folgt, daß das Weglassen der Abstandshalter nur eine geringfügige Herabsetzung der ersten Eigenfrequenz der Brennelementplatte um ca. 5 % zur Folge hat. Im Fall eines nicht korrelierten Druckpulsationsfeldes ist nach der in [7] ausgearbeiteten Abschätzungsmethode die mittlere Amplitude der im strömenden Kühlmittel induzierten Schwingung direkt proportional dem Ausdruck $v_1^{-\frac{3}{2}}$. Daraus folgt, daß durch das Weglassen der Abstandshalter in erster Näherung ein Anstieg der mittleren Schwingungsamplitude von ca. 7 % zu erwarten ist. Wegen des in Kap. 2 beschriebenen Stabilitätsverlusts der Brennelementplatten war es leider nicht möglich, dieses Resultat nachzuprüfen.

Die gemessenen Längsprofile der symmetrischen Eigenschwingungsform sind in Abb. 38 dargestellt. Auf dieser Abbildung ist zu sehen, daß das Weglassen der Abstandshalter nur eine geringfügige Änderung der Eigenschwingungsform zur Folge hat.

Die bei der Untersuchung der unsymmetrischen Eigenschwingungsform gewonnenen Resonanzkurven sind in Abb. 39 dargestellt, die entsprechenden Resonanzfrequenzen betragen 639 und 659 Hz. Die dazugehörigen Längsprofile der Eigenschwingungsformen sind in Abb. 40 dargestellt. Ähnlich wie im Fall der symmetrischen Eigenschwingungsform sind auch hier nur geringfügige Änderungen feststellbar.

Aus den Resultaten der durchgeführten Untersuchungen folgt, daß das Weglassen der Abstandshalter nur eine unbedeutende Änderung der Eigenfrequenzen und der entsprechenden Eigenschwingungsformen verursacht und dadurch nur einen kleinen Einfluß auf den während des Betriebs induzierten Schwingungszustand zur Folge haben kann. Das ist dadurch zu erklären, daß die Abstandshalter in unmittelbarer Nähe der natürlichen Knotenpunkte der Eigenschwingungsformen der Brennelementplatte positioniert sind und aus diesem Grunde keine größere zusätzliche Versteifung der Platte repräsentieren. Vom Gesichtspunkt der hydrodynamisch induzierten Schwingung wäre das Weglassen der Abstandshalter vertretbar. Der während der Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser aufgetretene und in Kap. 2 dokumentierte Stabilitätsverlust der Brennelementplatten ohne Abstandshalter stellt allerdings die Realisierung dieser technologisch einfacheren Variante des Brennelementes in Frage.

4. Schlußfolgerungen

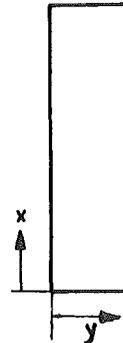
Die Messungen im strömenden Kühlmittel ergaben ein niedriges Niveau der schwingungserzeugenden Druckpulsationen im Brennelement mit einem RMS-Wert von ca. 2,2 % des mittleren dynamischen Druckes des strömenden Kühlmittels. Dieses positive Resultat ist auf die kleine Rauigkeit der Oberfläche der Brennelementplatten und den kleinen hydraulischen Durchmesser des Brennelementes zurückzuführen. Bei den geplanten Betriebsparametern des Kühlmittelstromes ergibt sich dann für den Pegel der schwingungserzeugenden Druckpulsationen ein sehr niedriger RMS-Wert von ca. 0,026 kp/cm². Da darüber hinaus die Energie der Druckpulsationen fast vollkommen im Frequenzbereich unter 350 Hz konzentriert ist, sind die Bedingungen für die Entstehung der Plattenschwingung in ihren Eigenschwingungsformen nur schwach erfüllt, so daß überwiegend nur eine erzwungene Schwingung mit niedrigem Energiegehalt induziert werden kann. Der RMS-Wert der gemessenen relativen Biegedehnung der schwingenden Brennelementplatten bewegt sich je nach Meßstelle in den Grenzen (3,5 bis 28) 10⁻⁶, der entsprechende RMS-Wert der Biegespannung beträgt 2,5 bis 20 kp/cm². Dieser Wert ist niedrig, so daß das Auftreten von Ermüdungsrissen kaum zu erwarten ist. Um aber ganz sicher zu sein, müßten entsprechende Dauerschwingversuche durchgeführt werden, da die Ermüdungseigenschaften des gegebenen Hüllwerkstoffes nicht bekannt sind [8].

Die Laborversuche ergaben einen geringen Einfluß der Abstandshalter auf die Eigenfrequenzen und die entsprechenden Eigenschwingungsformen. Die zu erwartende Zunahme der Schwingungsamplitude beim Weglassen der Abstandshalter beträgt ca. 7 %. Da bei den Schwingungsuntersuchungen im strömenden Wasser ohne Abstandshalter die Brennelementplatten zusammen kollabierten, konnte dieses Resultat nicht nachgewiesen werden. Aber schon allein wegen diesem Phänomen ist das Weglassen der Abstandshalter nicht zu empfehlen.

Literatur

- [1] J. Kadlec, W. Krüger:
Untersuchungen der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingungs-
formen der Brennelementplatte des Hochflußreaktors Grenoble.
KFK-Bericht 1693, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Oktober 1972
- [2] P. Ihle, S. Malang, H.M. Politzky, K. Rust:
Sicherheitstechnische Untersuchungen an Brennelementplatten
des Hochflußreaktors Grenoble.
In Vorbereitung
- [3] G. Rittirsch:
Rechnergesteuerte Meßdaten-Erfassungs- und Aufbereitungsanlage.
2. Vierteljahresbericht 1972, Projekt Schneller Brüter,
KFK-Bericht 1272/2, EUR 4847d, Kernforschungszentrum Karls-
ruhe, Oktober 1972
- [4] M. Audoux, F.W. Katz, W. Olbrich, E.G. Schlechtendahl:
SEDAP - An Integrated System for Experimental Data Processing.
KFK-Bericht 1594, EUR 4730e, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Januar 1973
- [5] J. Kadlec, K.D. Appelt:
Flow Induced Rod Vibrations of Fast Reactor Subassemblies.
Nuclear Engineering and Design 14, 136-150, 1970
- [6] J. Kadlec, E. Ohlmer:
On the Reproducibility of the Parallel-Flow Induced Vibration
of Fuel Pins.
Nuclear Engineering and Design 17, 355 - 360, 1971
- [7] J. Kadlec, V. Pfrommer:
Abschätzung der optimalen Anzahl der Gitterabstandshalter
für Na 2-Subassembly.
Externer Bericht 8/67-2, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
Januar 1967
- [8] D. Munz:
Institut für Werkstoff-Forschung, DFVLR, Privatmitteilung,
April 1971

| Aufnehmer | Koordinaten | | DMS | Platte Nr. |
|-----------|-------------|--------|-----|---------------|
| | x [mm] | y [mm] | Typ | |
| DMS 1 | 500 | 38 | B | 5 |
| DMS 2 | 255 | 33 | B | 5 |
| DMS 2A | 255 | 33 | B | 6 |
| DMS 4 | 175 | 33 | A | 1 |
| DMS 5 | 290 | 58 | B | 2 |
| DMS 6 | 440 | 63 | B | 2 |
| DMS 7 | 465 | 58 | A | 9 |
| DMS 8 | 325 | 53 | A | 10 |
| DMS 9 | 148 | 58 | A | 3 |
| DMS 9A | 148 | 58 | A | 4 |
| DMS 10 | 719 | 53 | B | 3 |
| DMS 10A | 719 | 53 | B | 4 |
| DMS 11 | 140 | 43 | B | 7 |
| DMS 11A | 140 | 43 | B | 8 |
| DMS 12 | 468 | 38 | B | 7 |
| DMS 12A | 468 | 38 | B | 8 |
| DMS 13A | 761 | 33 | B | 8 |
| DA V | 468 | 0 | - | - |



Tab. 1 Koordinaten und Typ der Aufnehmer

| Magnet Nr. | x Koordinate [mm] | Windungszahl bei Magnetanordnung | |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|------|
| | | A | B |
| 1 | 855 | 175 | -175 |
| 2 | 795 | 182 | -215 |
| 3 | 735 | 186 | -235 |
| 4 | 675 | 195 | -283 |
| 5 | 615 | 206 | -206 |
| 6 | 555 | 215 | -195 |
| 7 | 495 | 235 | -190 |
| 8 | 435 | 283 | 160 |
| 9 | 375 | 250 | 186 |
| 10 | 315 | 220 | 195 |
| 11 | 255 | 206 | 206 |
| 12 | 195 | 195 | 220 |
| 13 | 135 | 190 | 250 |
| 14 | 75 | 180 | 182 |
| 15 | 15 | 160 | 180 |

Tab. 2 Windungszahlen und x Koordinate der Elektromagnete bei verschiedenen Anordnungen

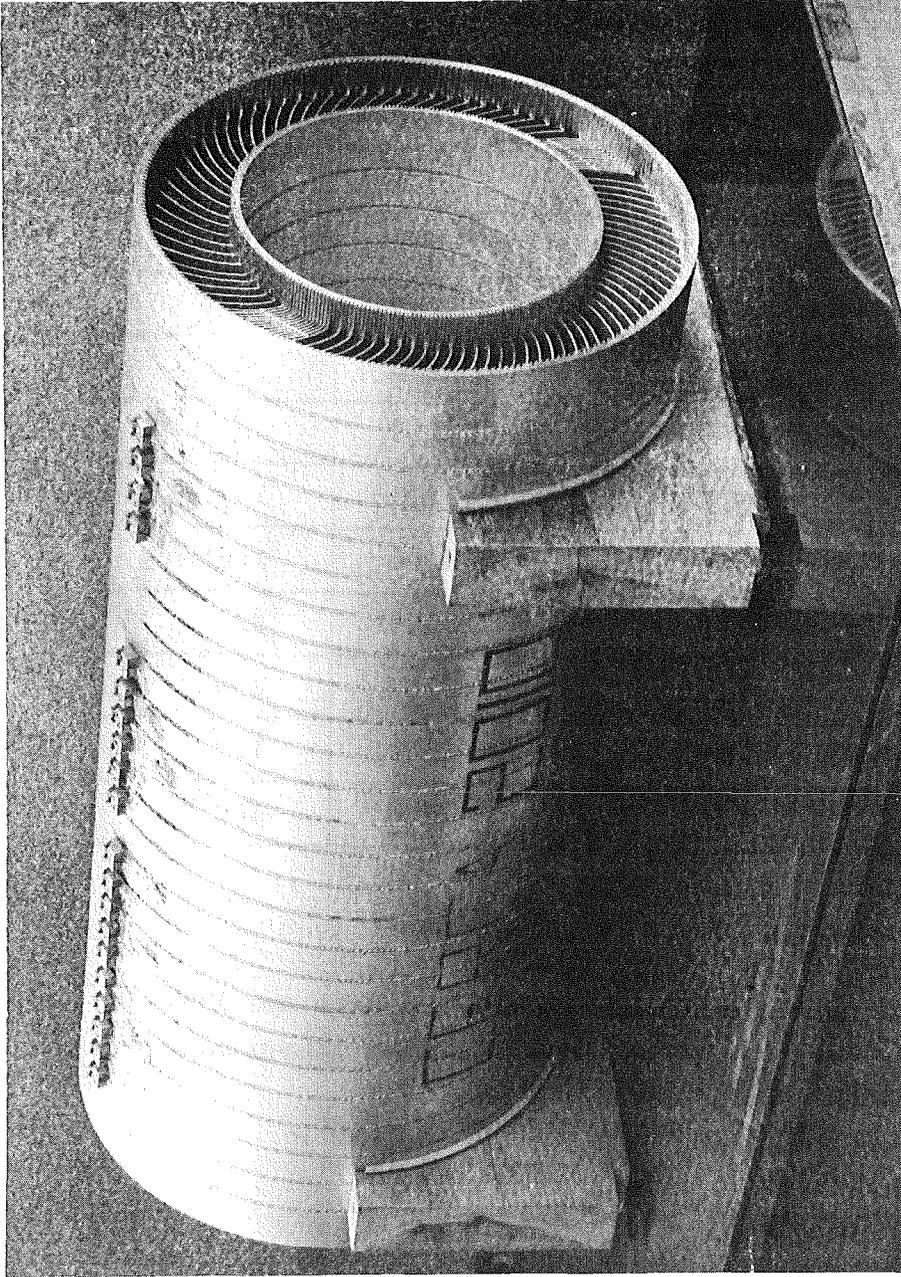


Abb. 1 HFR - Brennelementmodell

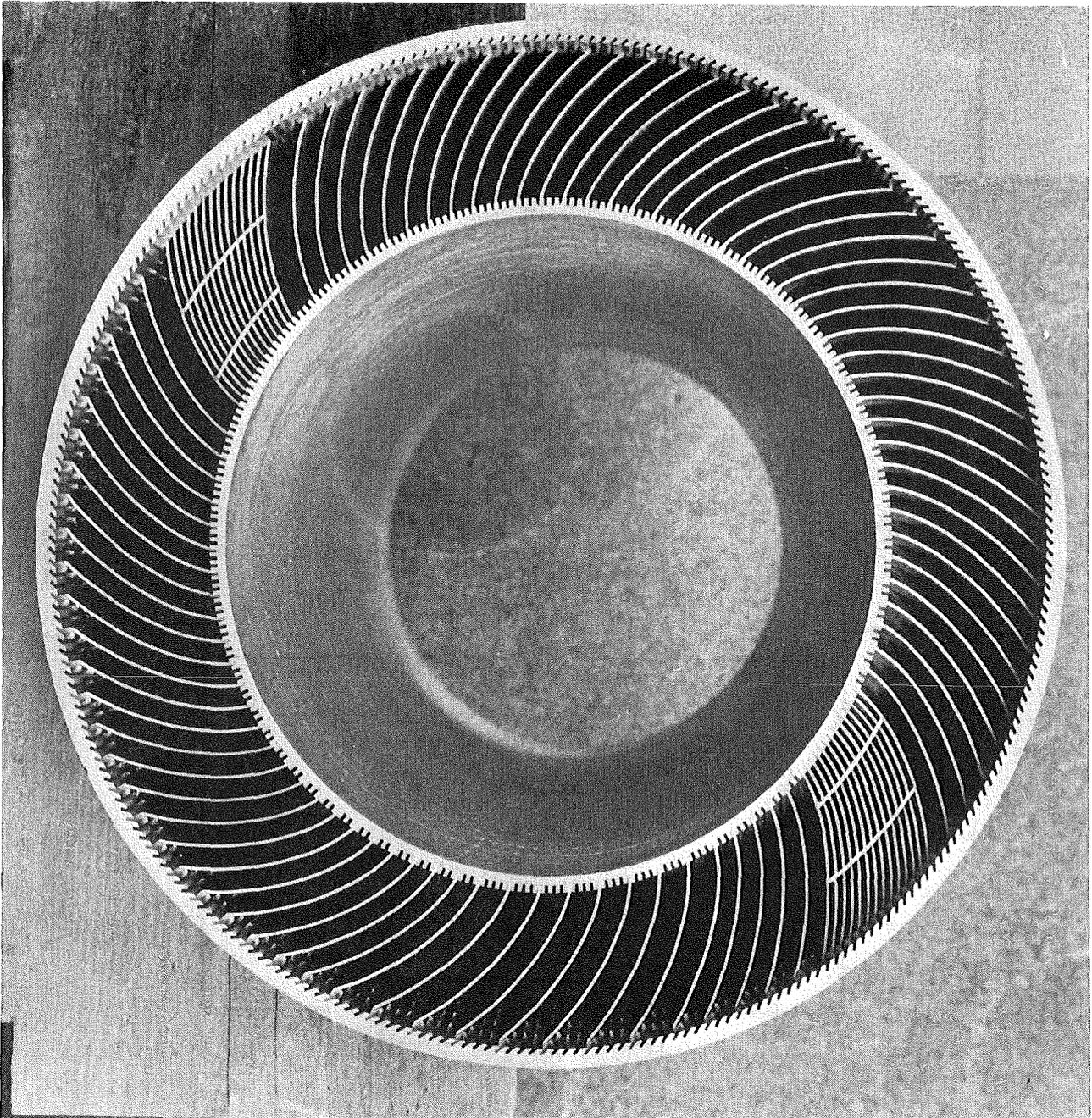


Abb. 2 Verteilung der Platten im Brennelementmodell

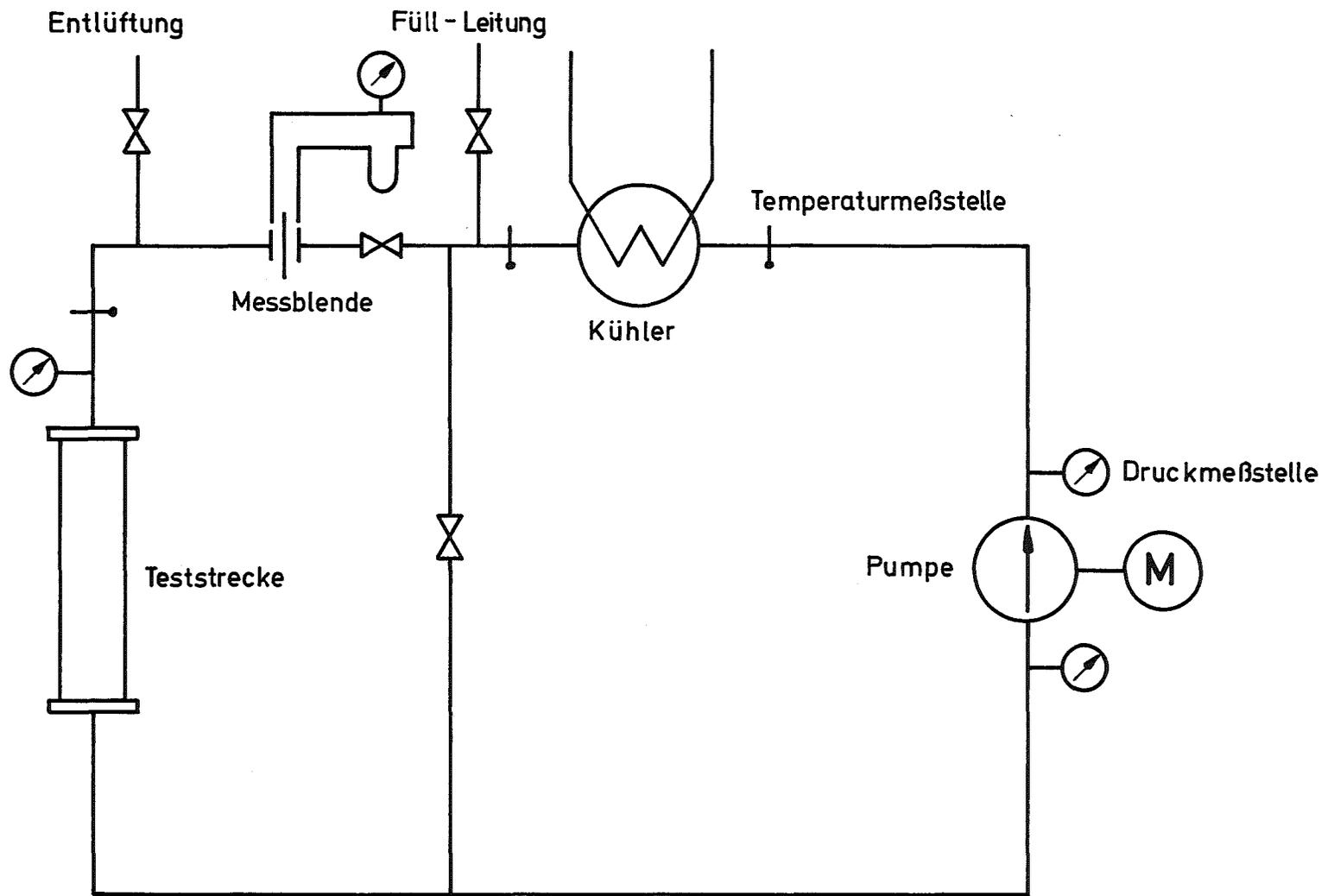


Abb. 3 Schema des Wasserkreislaufs

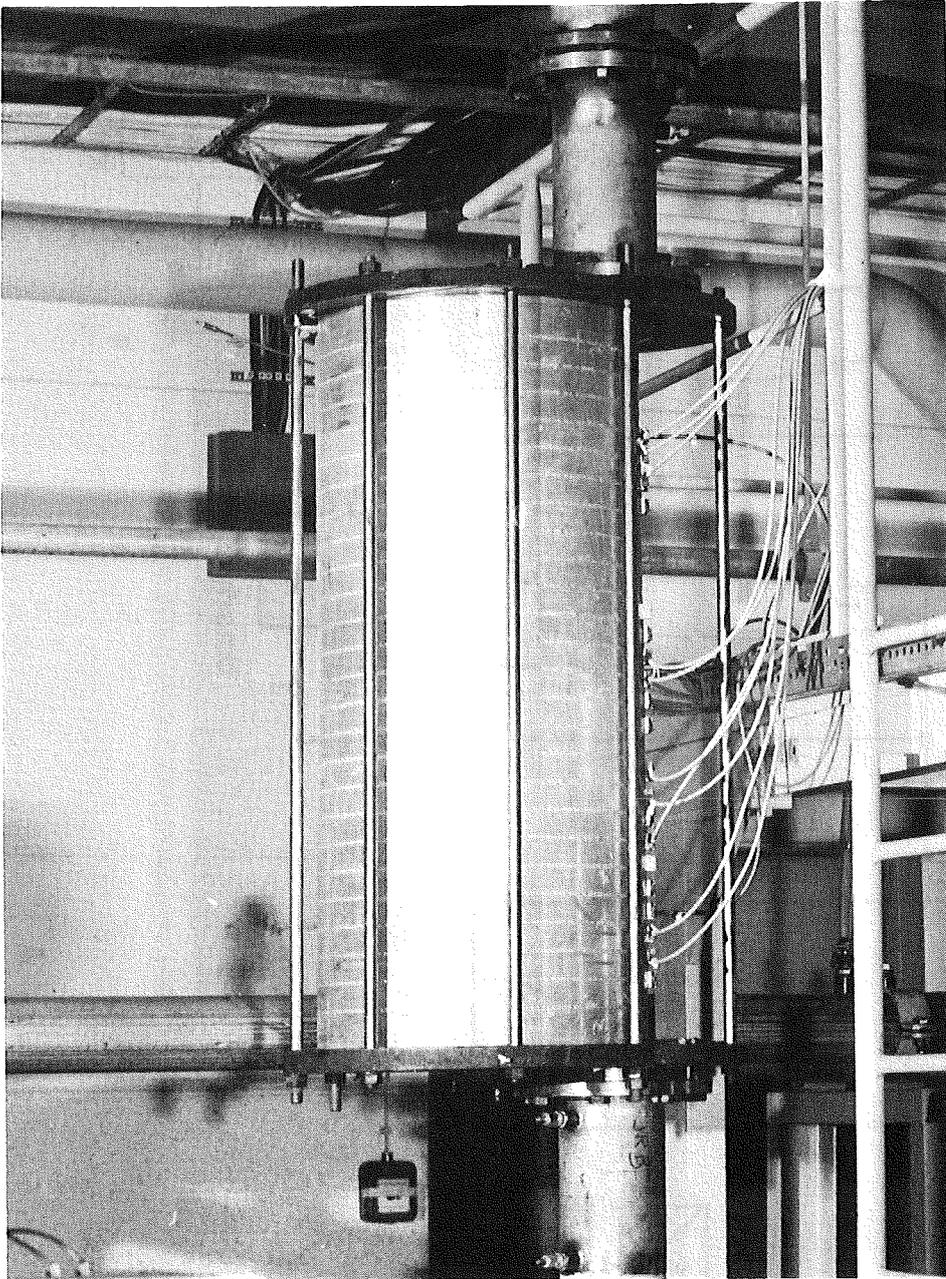


Abb.4 Blick auf das eingebaute Versuchsmodell

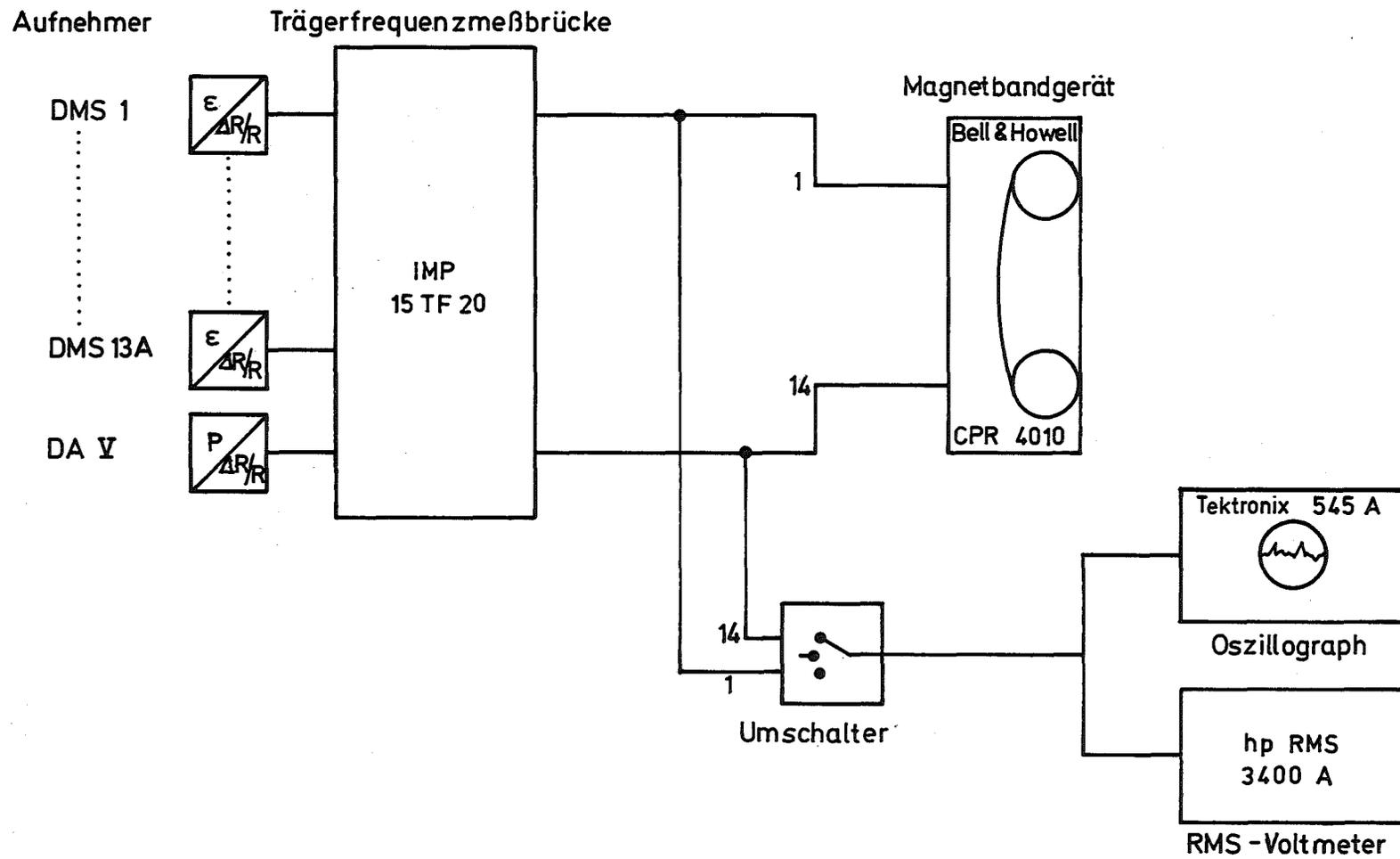


Abb.5 Blockschemata der Meß- und Registriergeräte

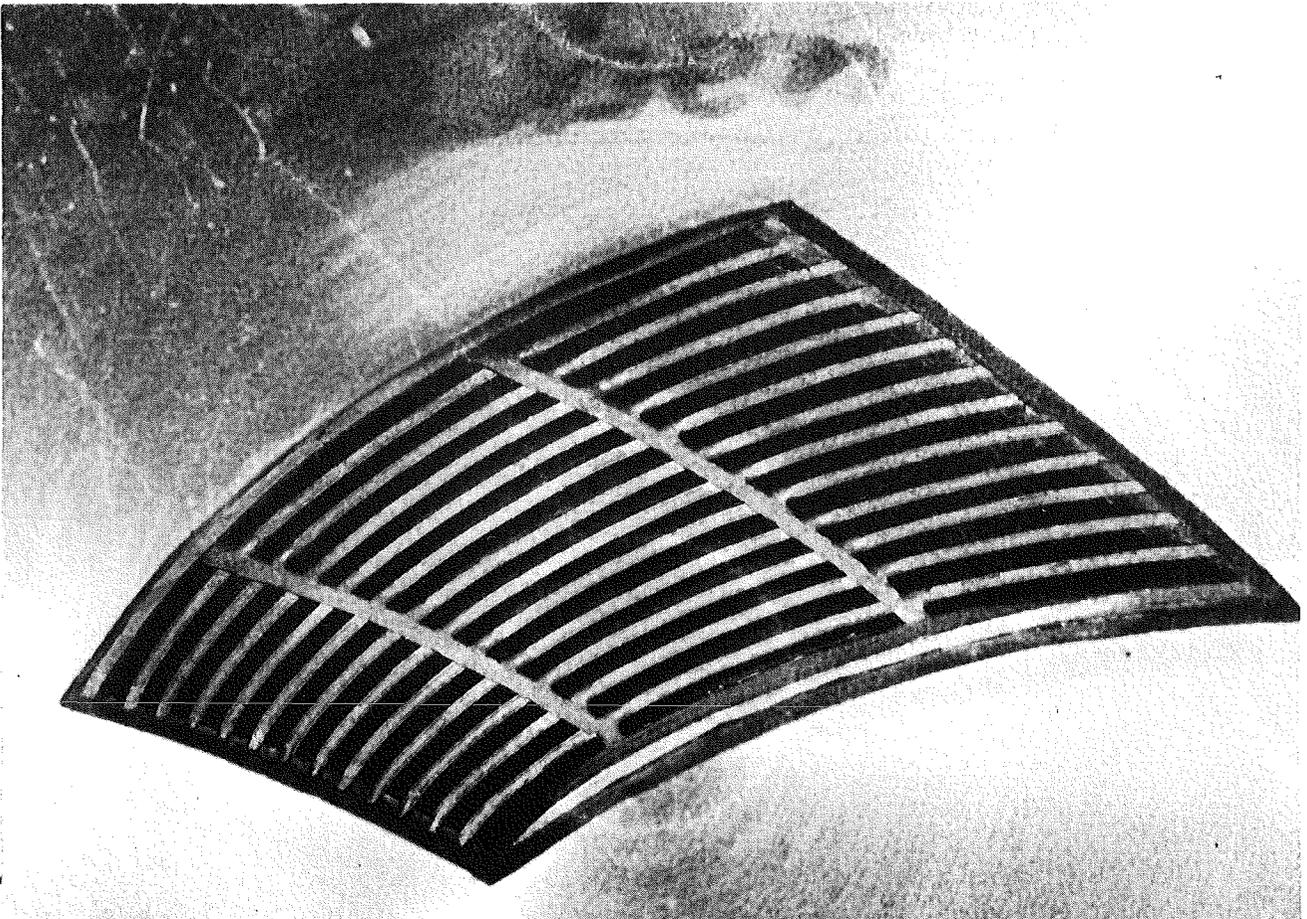
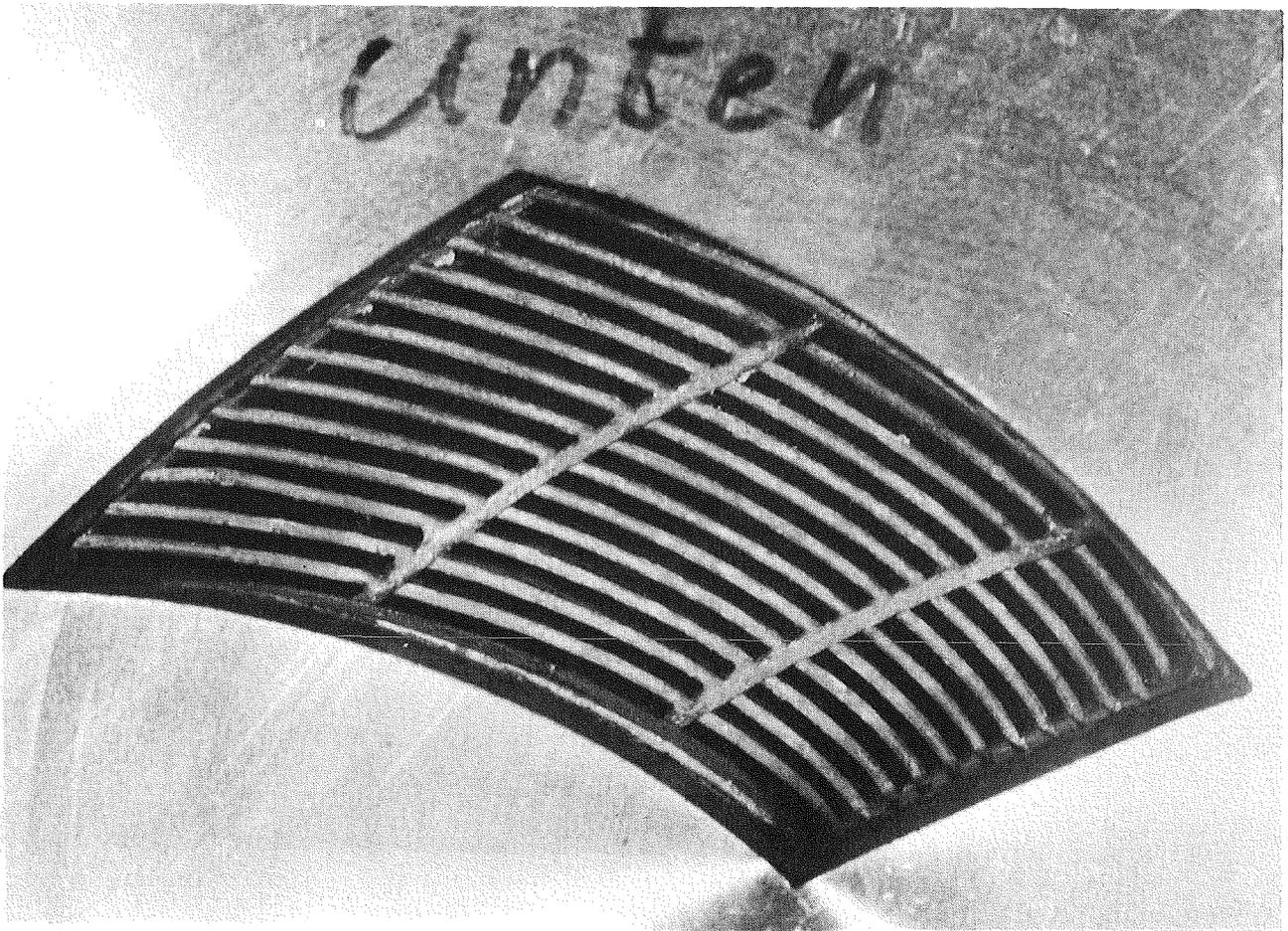
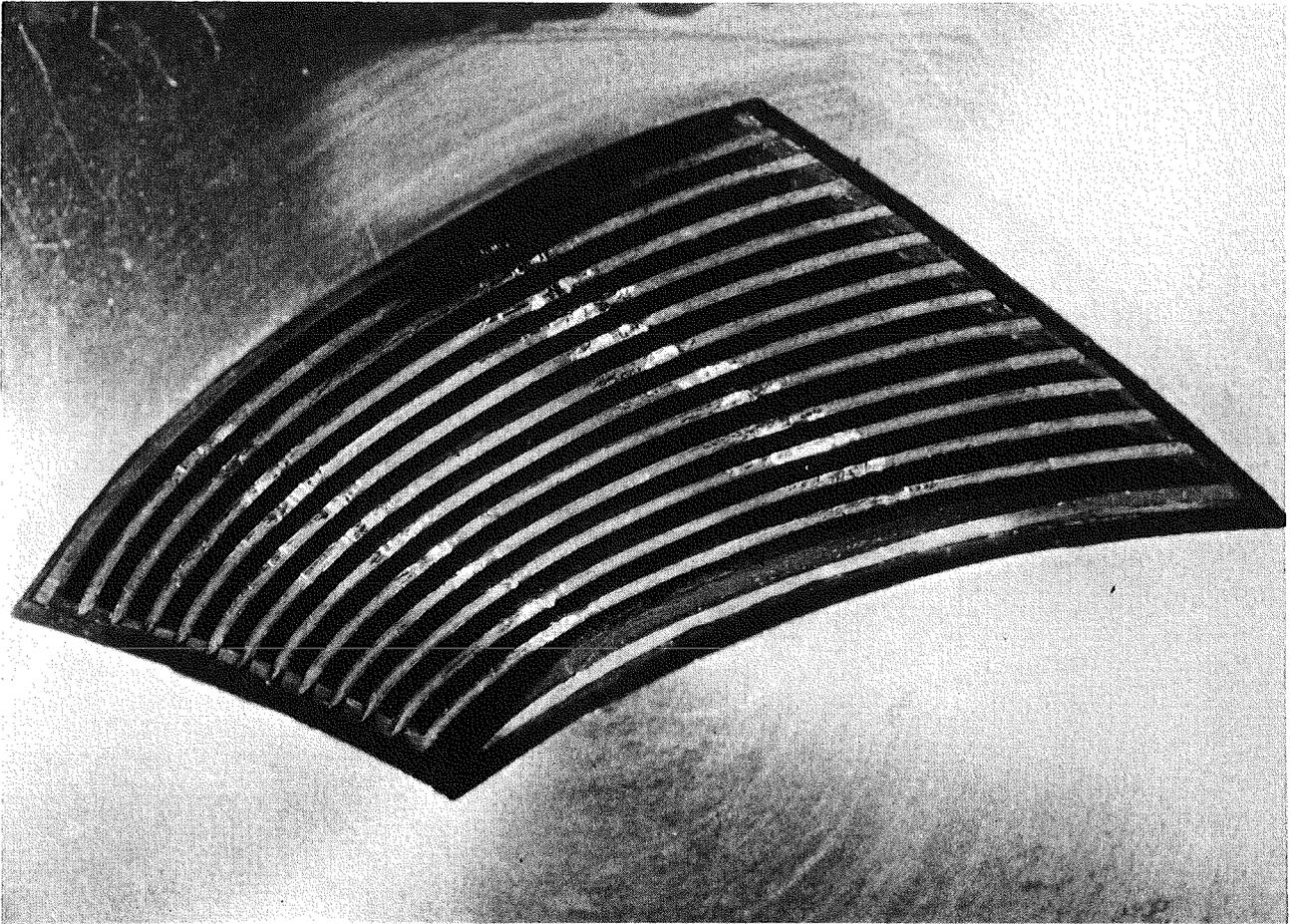


Abb.6 Brennelementausschnitt mit eingebauten Abstandshaltern.
Zustand vor dem Versuch. Eintrittsseite



**Abb.7 Brennelementausschnitt mit eingebauten Abstandshaltern.
Zustand vor dem Versuch . Austrittsseite**



**Abb.8 Brennelementausschnitt mit ausgebauten Abstandshaltern.
Zustand vor dem Versuch. Eintrittsseite**

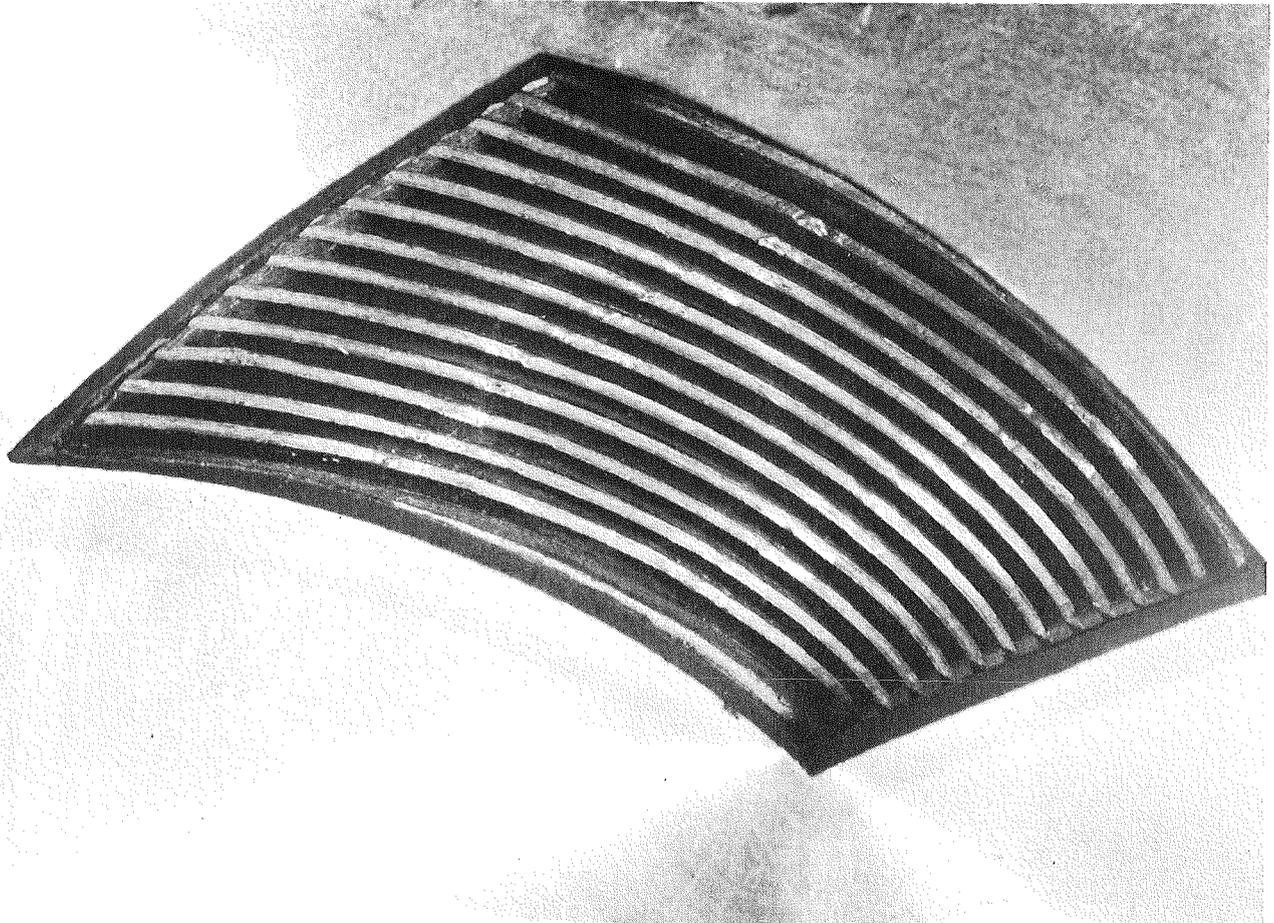
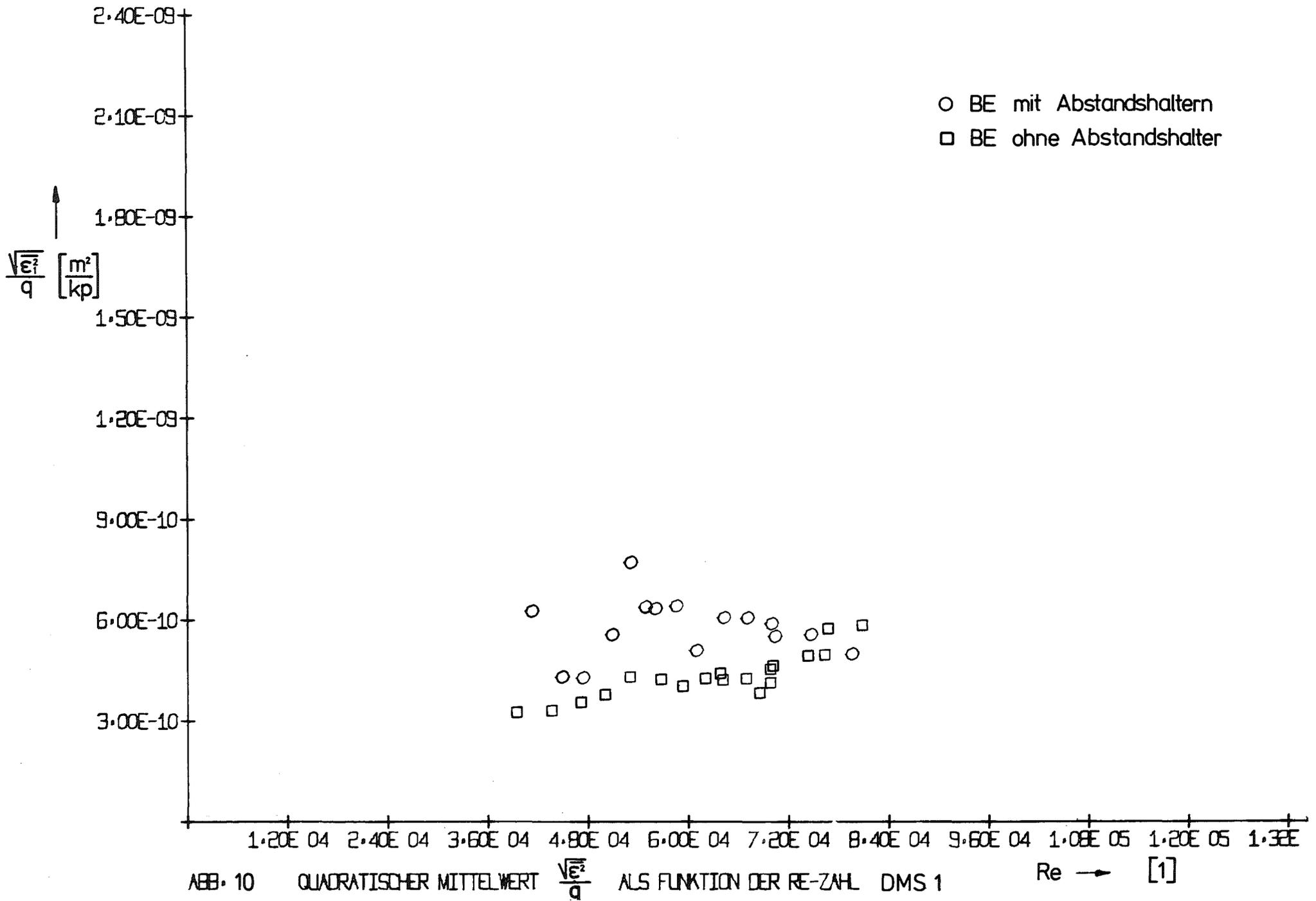
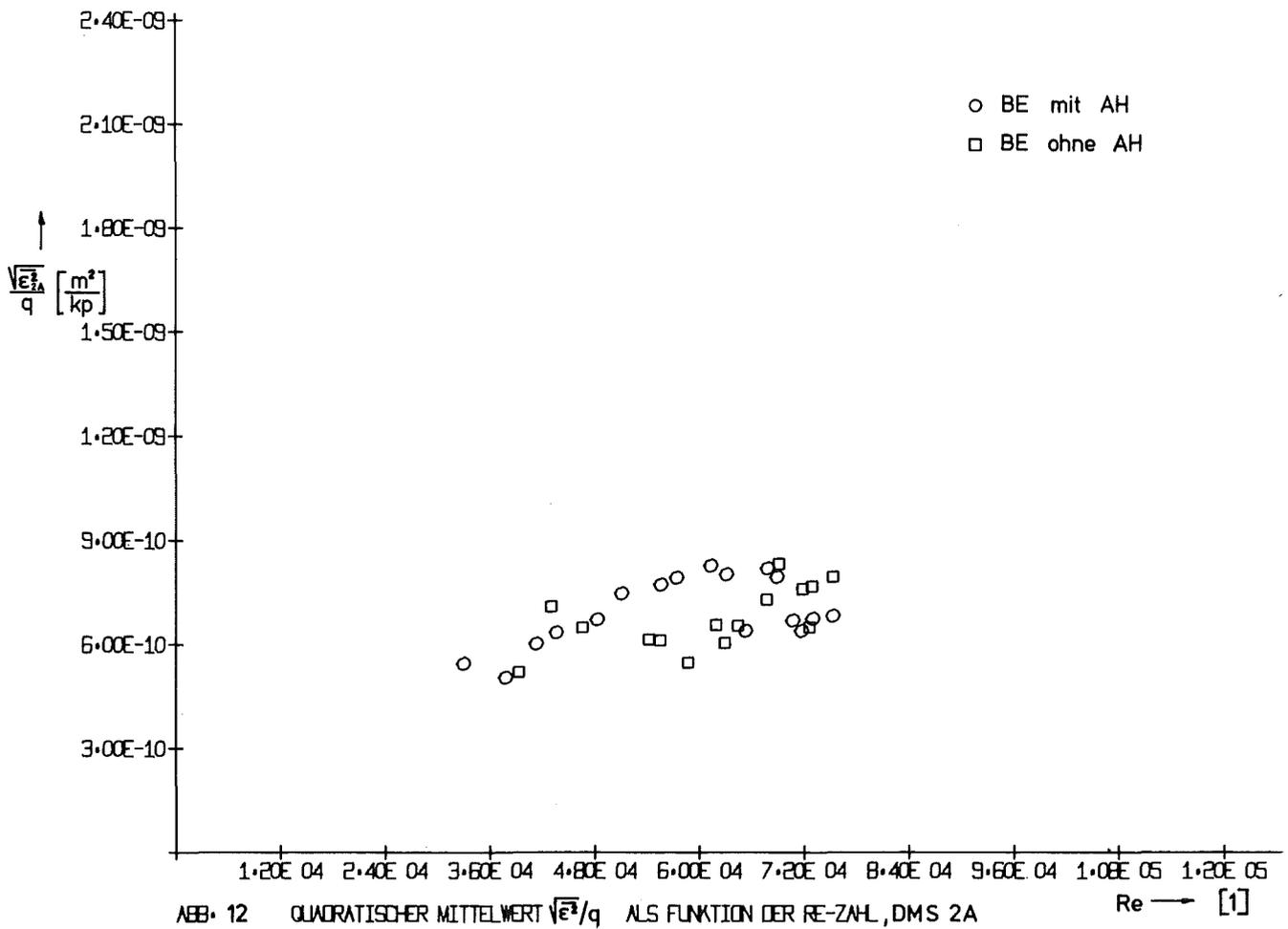
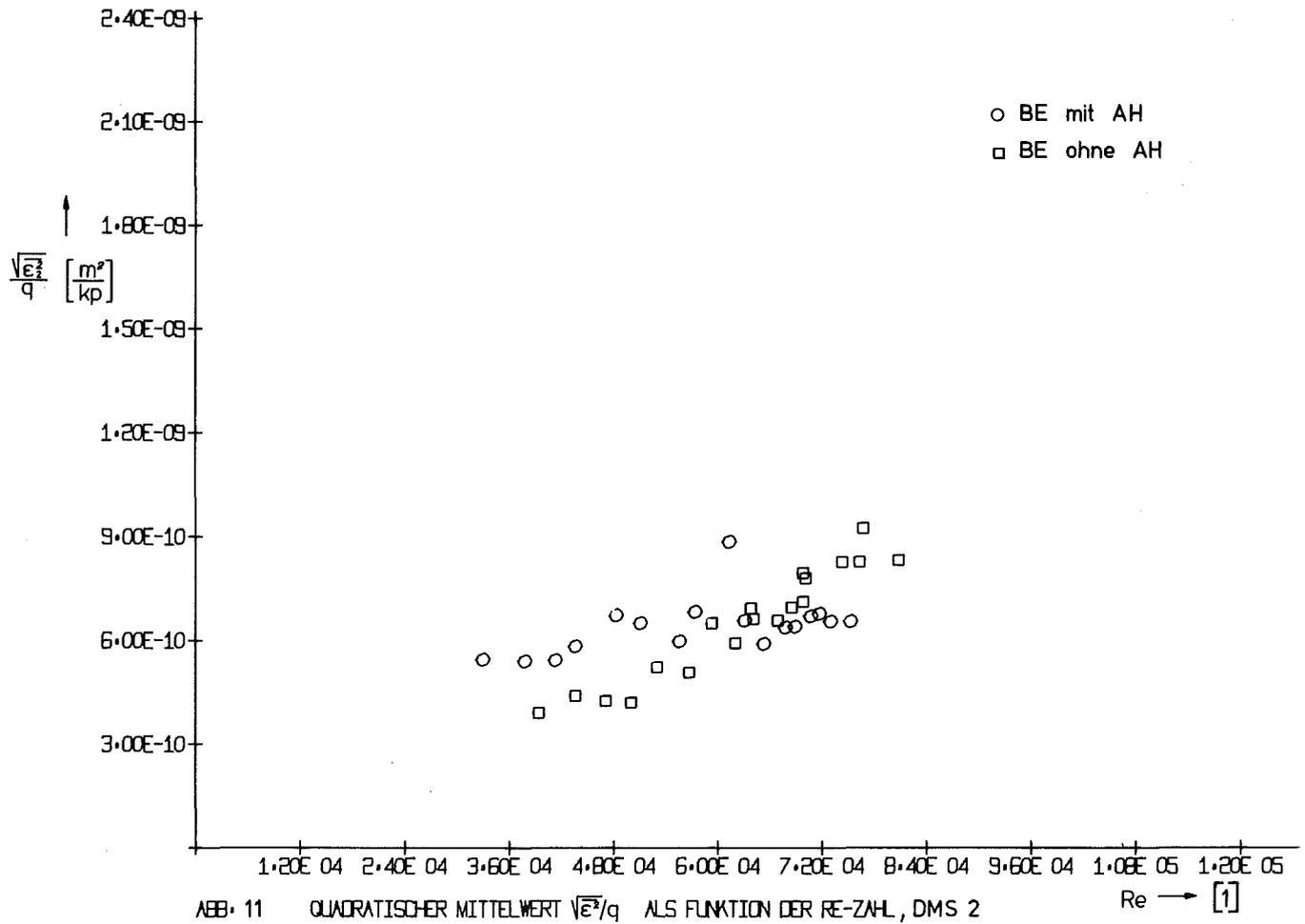


Abb.9 Brennelementausschnitt mit ausgebauten Abstandshaltern.

Zustand vor dem Versuch. Austrittsseite





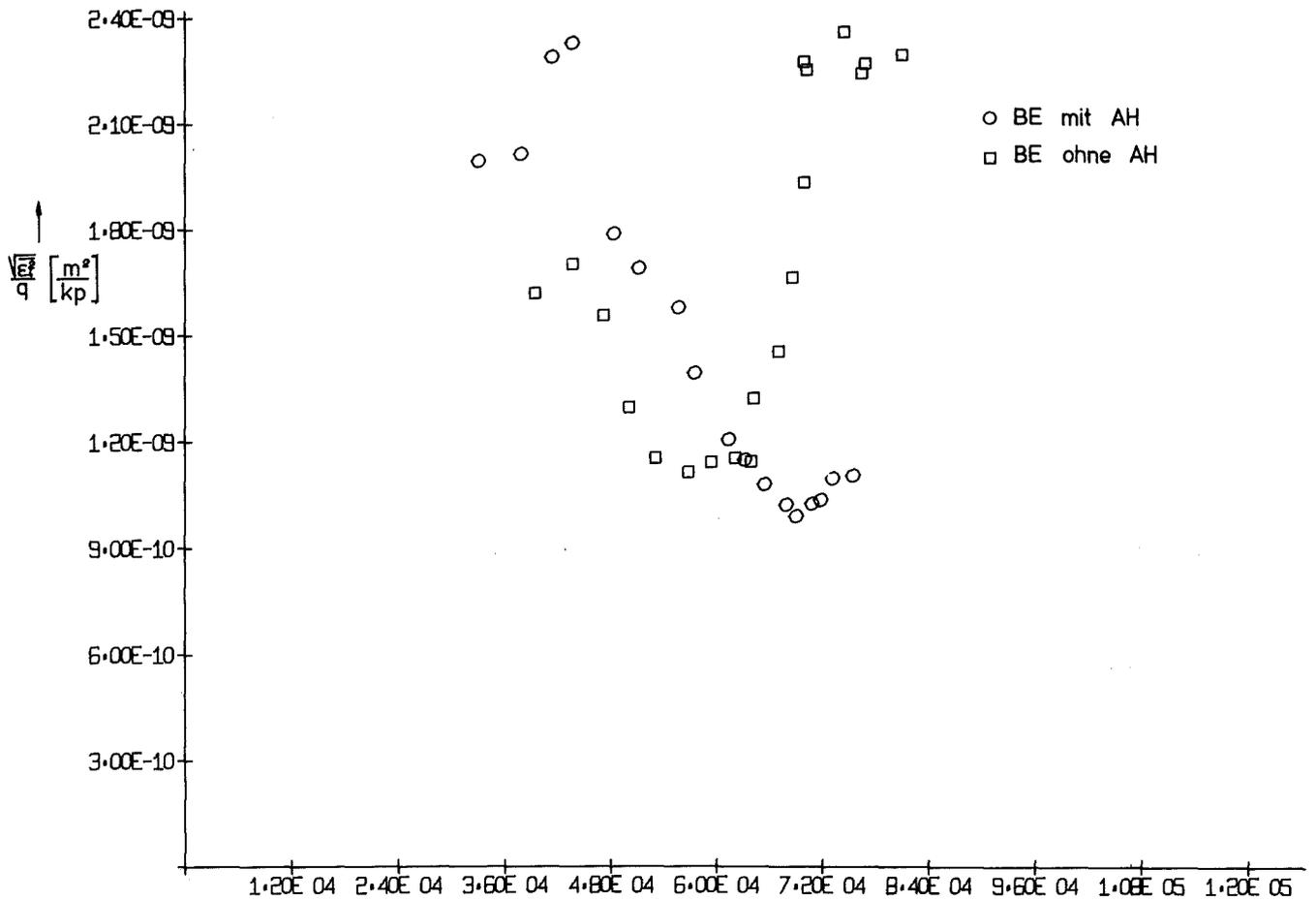


ABB. 13 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{\overline{v^2}}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 4

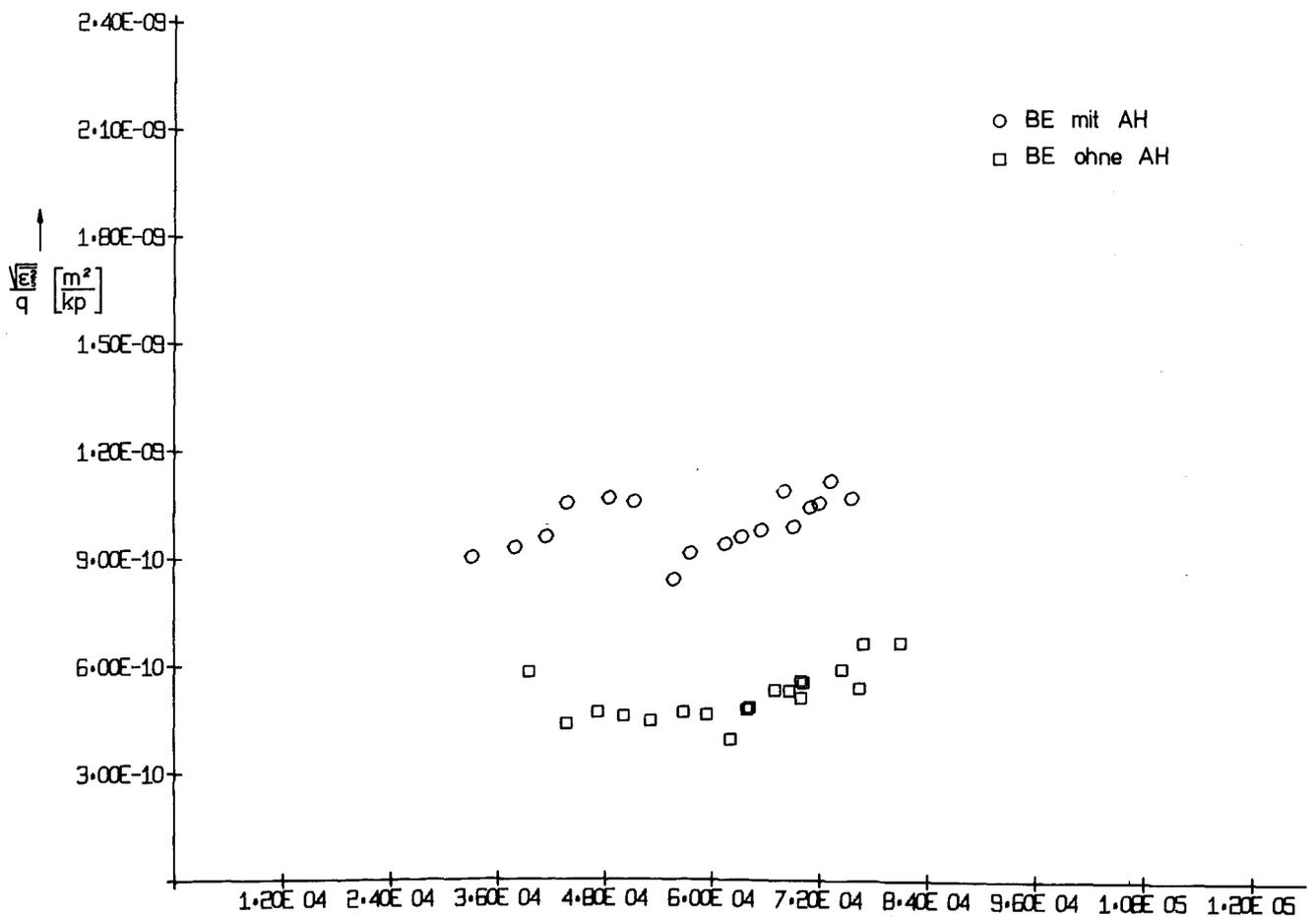
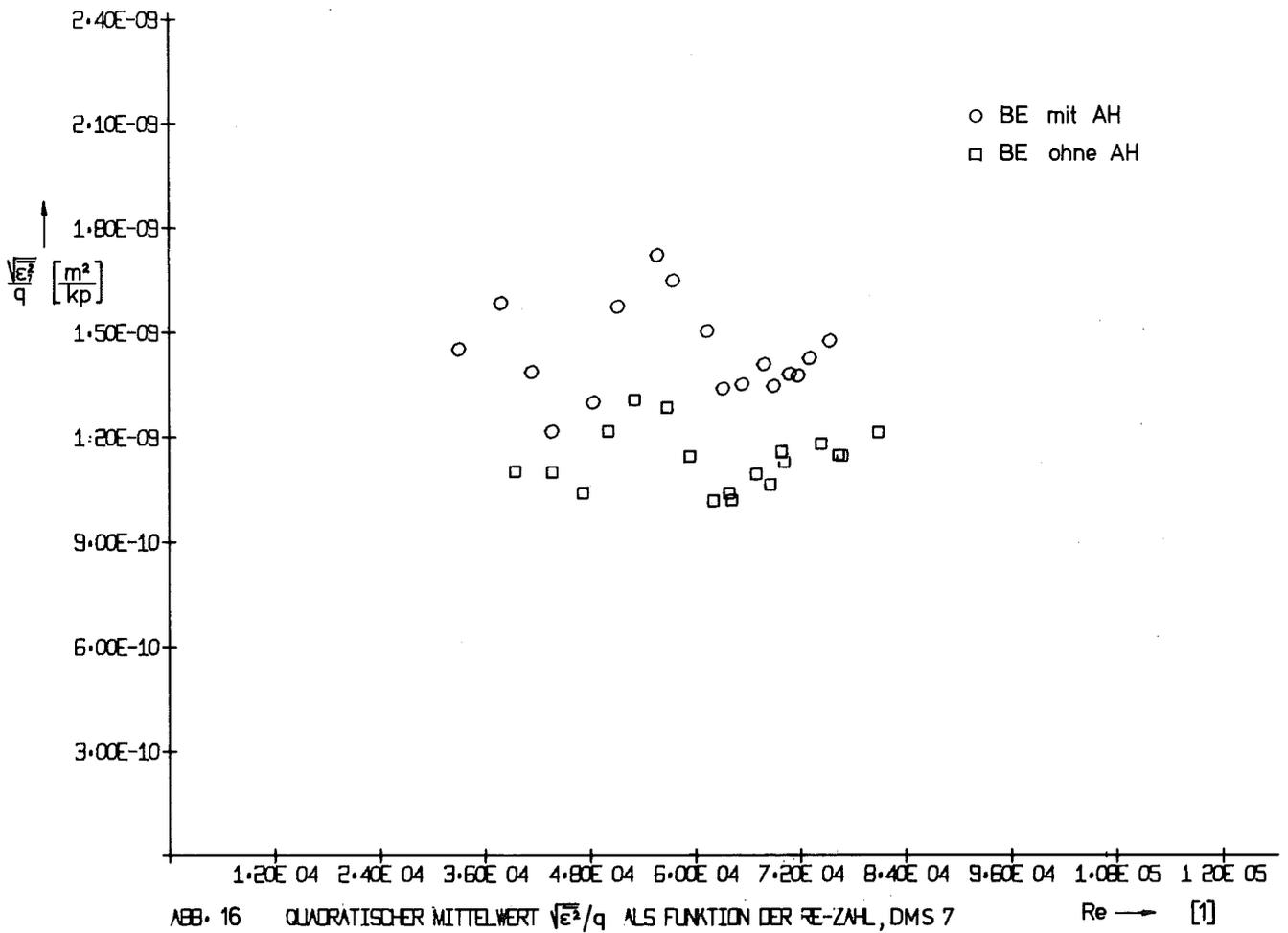
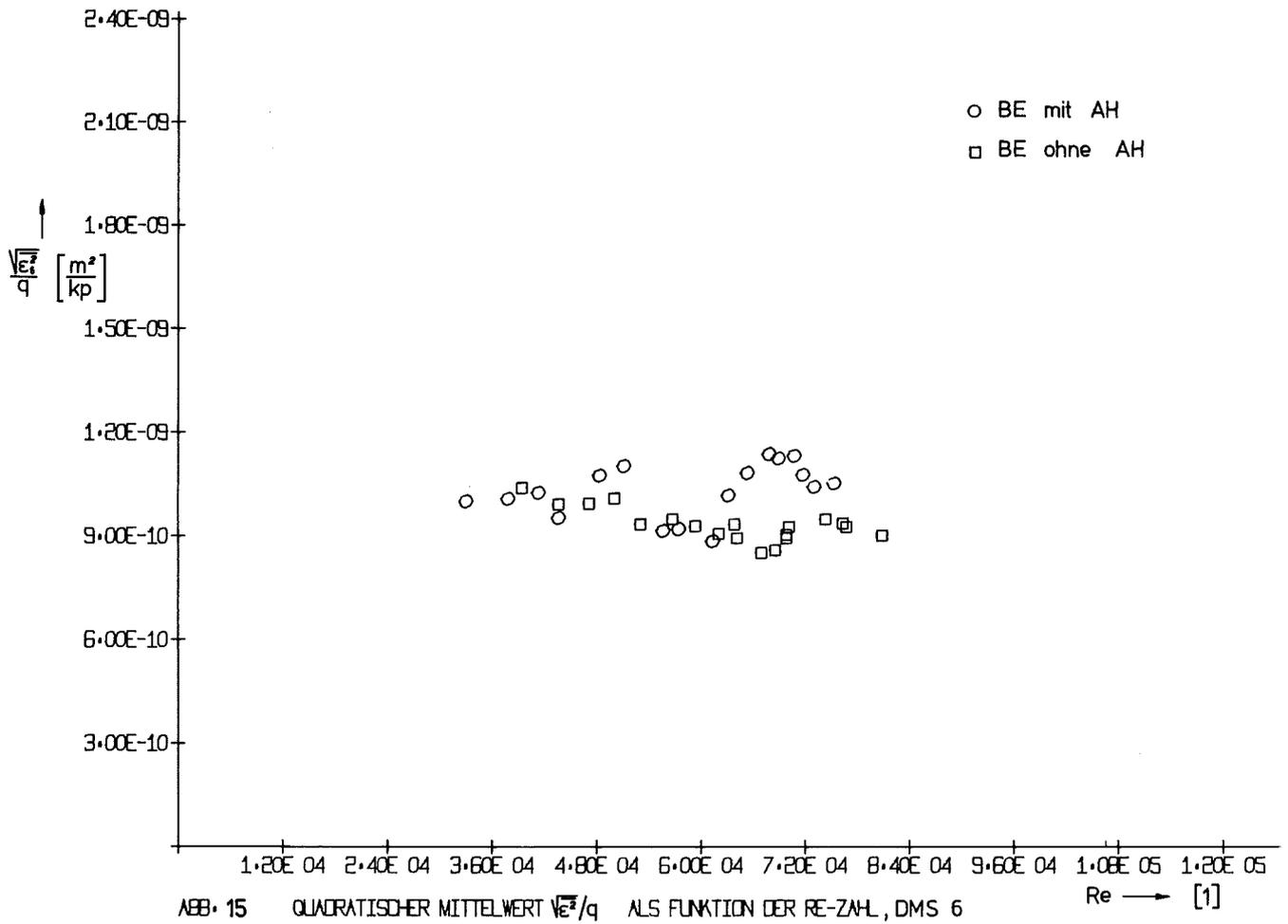


ABB. 14 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{\overline{v^2}}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 5



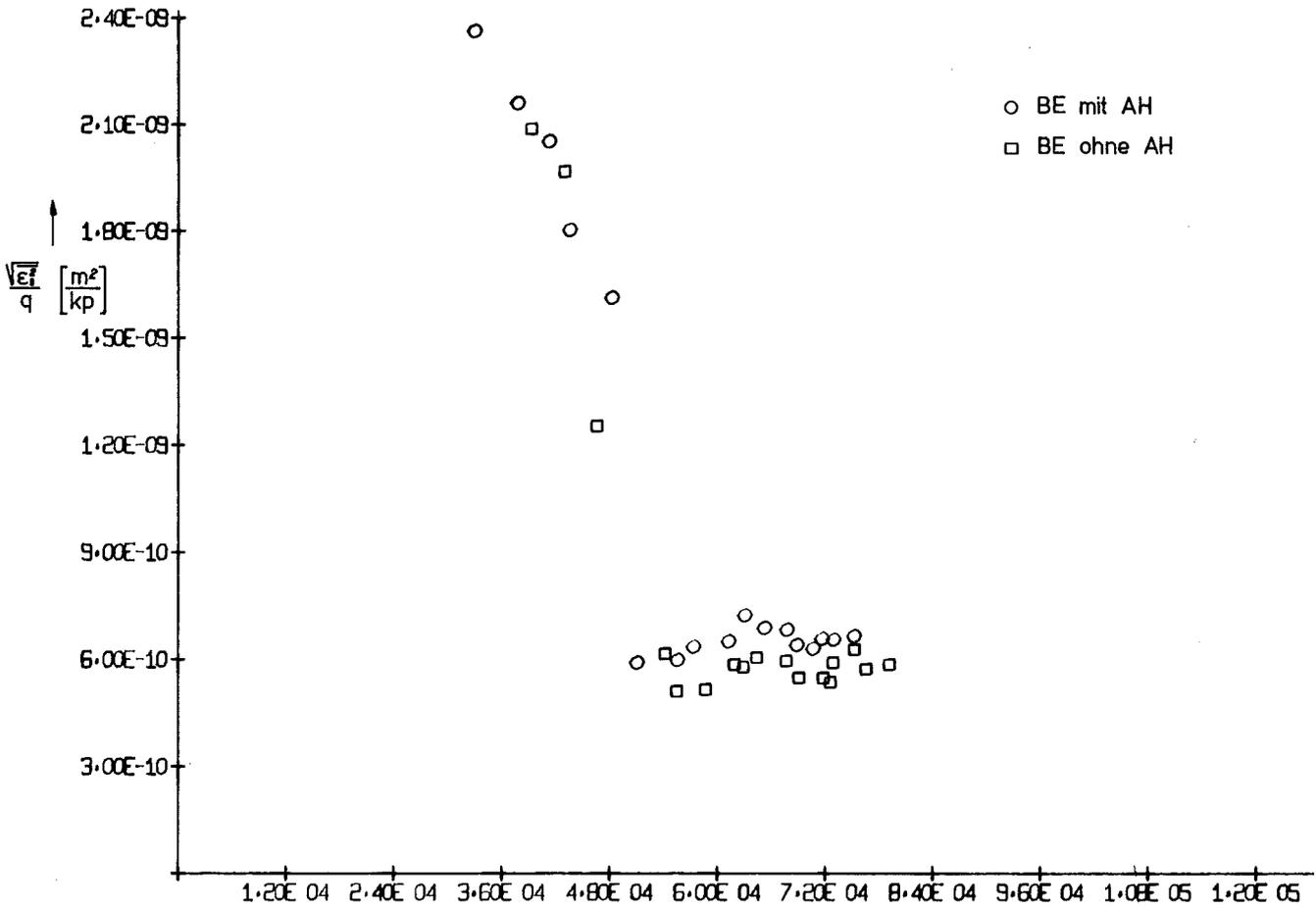


ABB. 17 QUADRATISCHER MITTELWERT $\frac{\sqrt{\overline{e^2}}}{q}$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 8 $Re \rightarrow [1]$

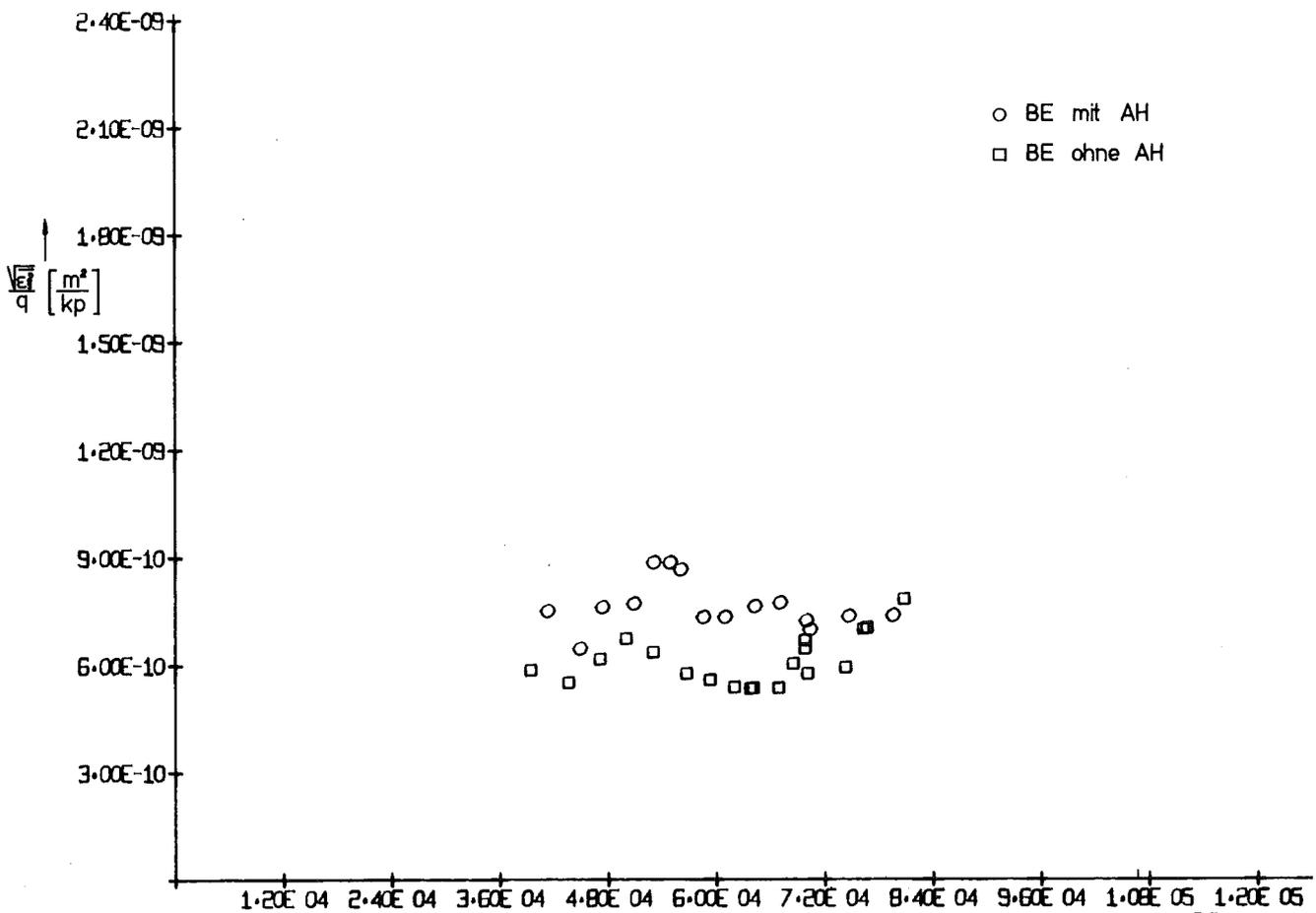


ABB. 18 QUADRATISCHER MITTELWERT $\frac{\sqrt{\overline{e^2}}}{q}$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 9 $Re \rightarrow [1]$

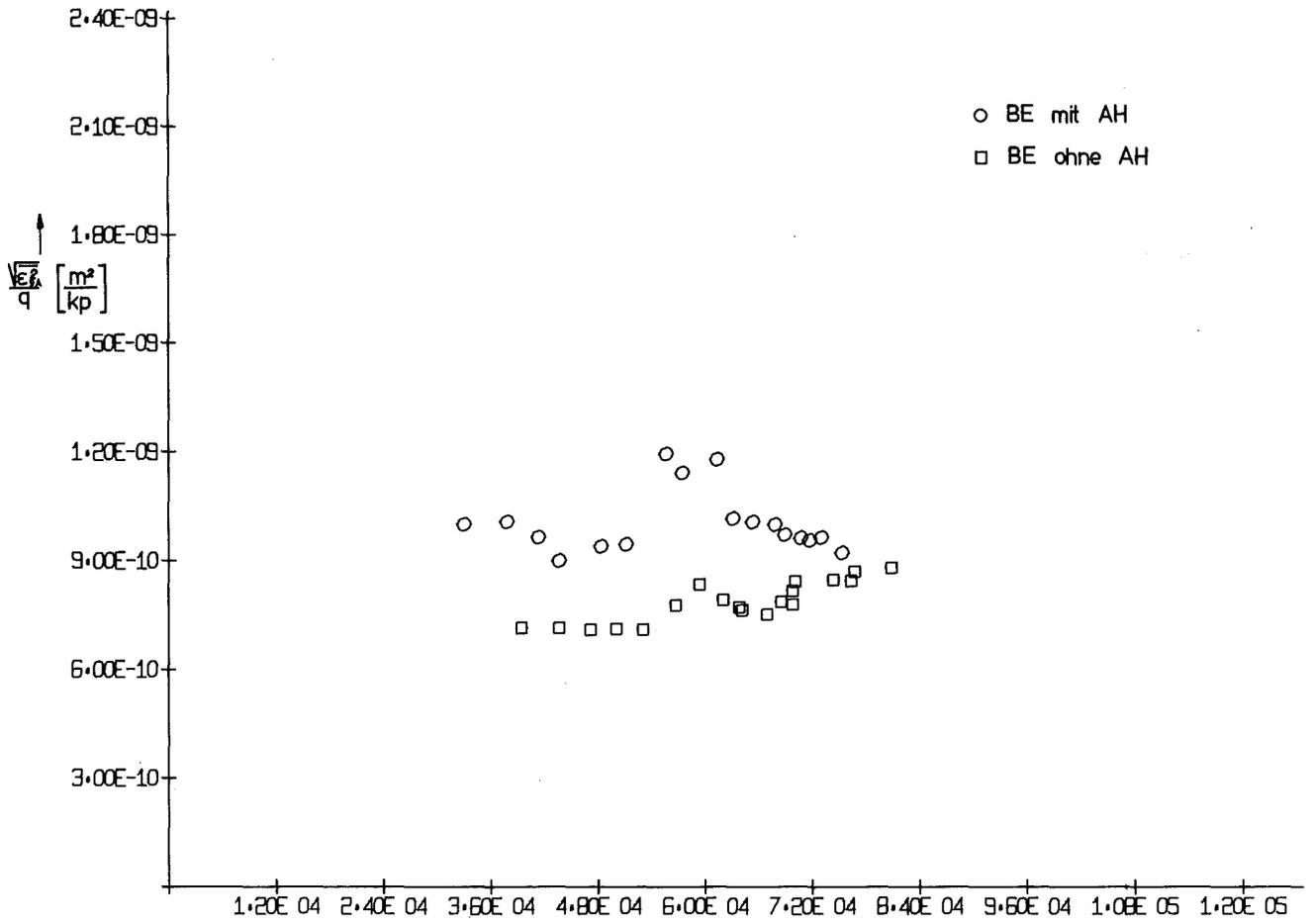


ABB. 19 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{v_{rms}^2}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 9A

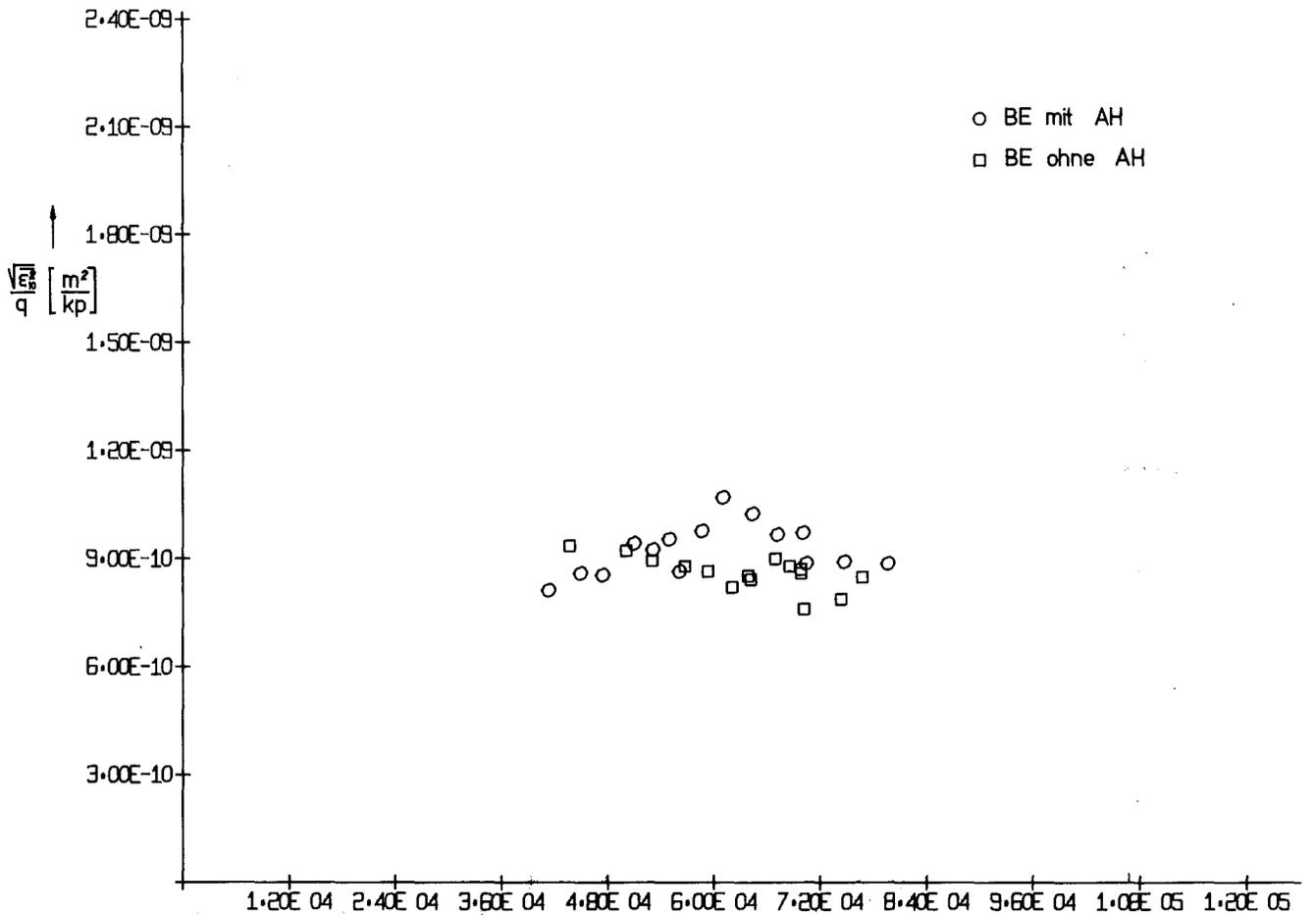
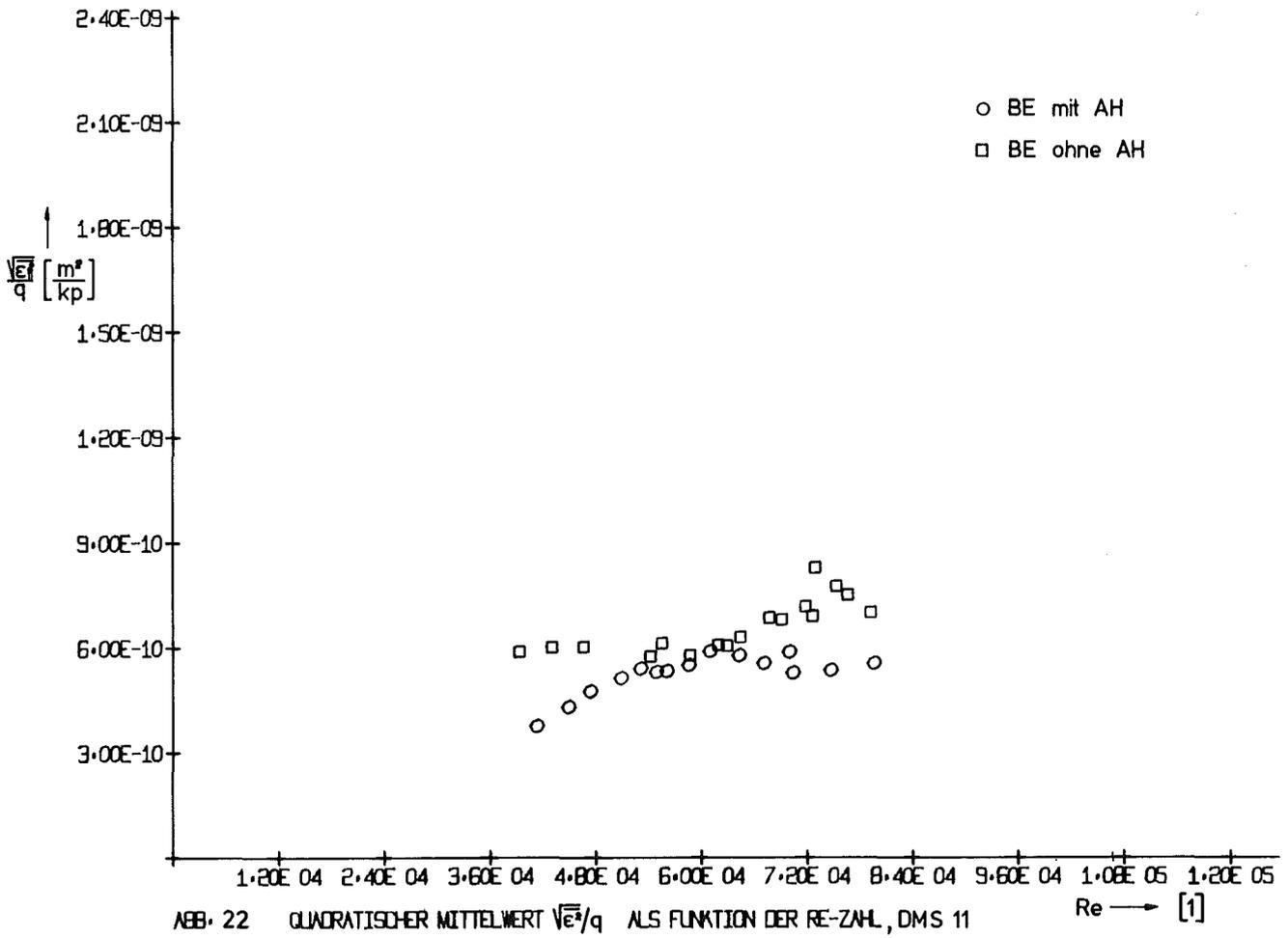
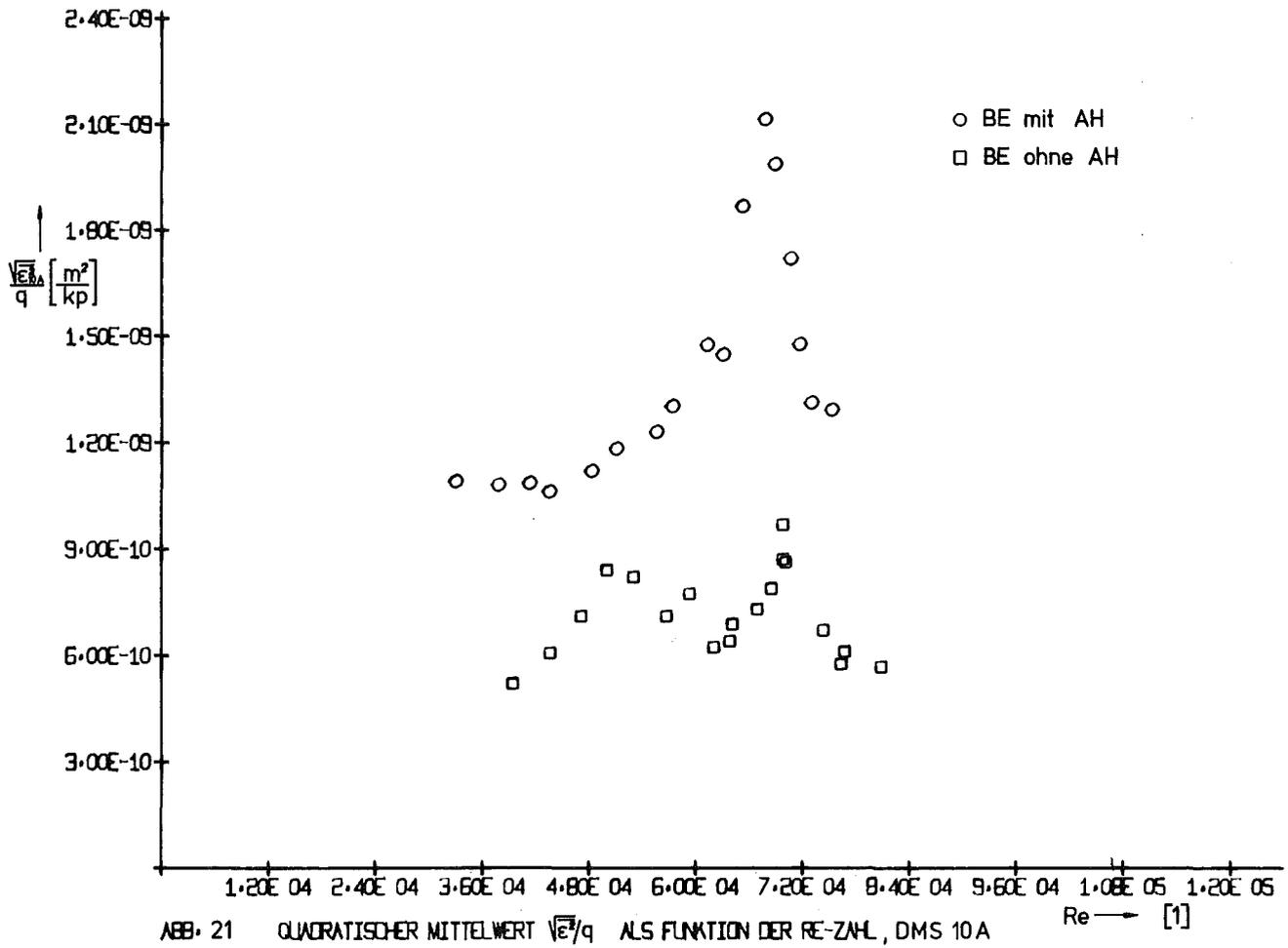


ABB. 20 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{v_{rms}^2}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 10



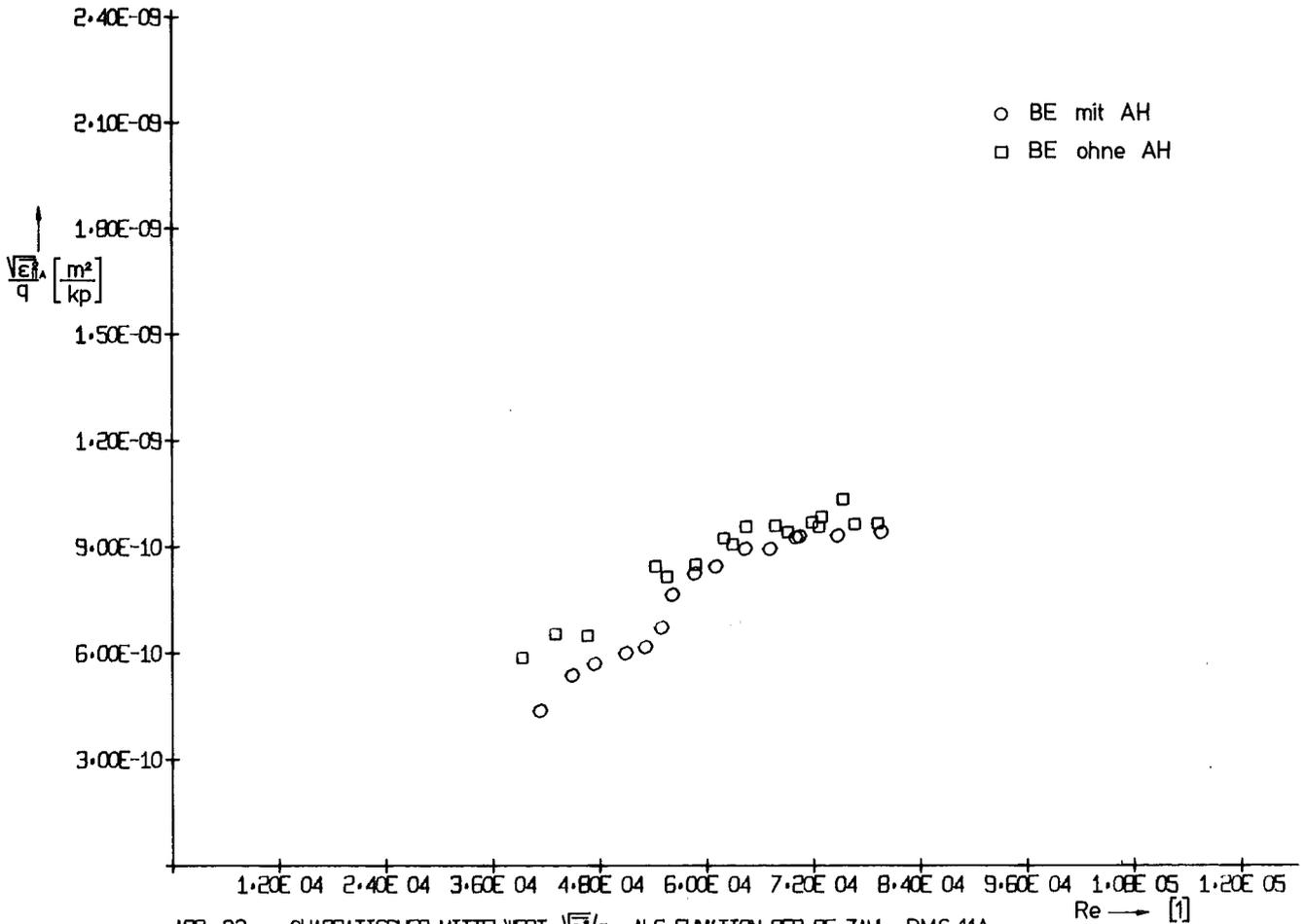


ABB. 23 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{E_r^2}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 11A

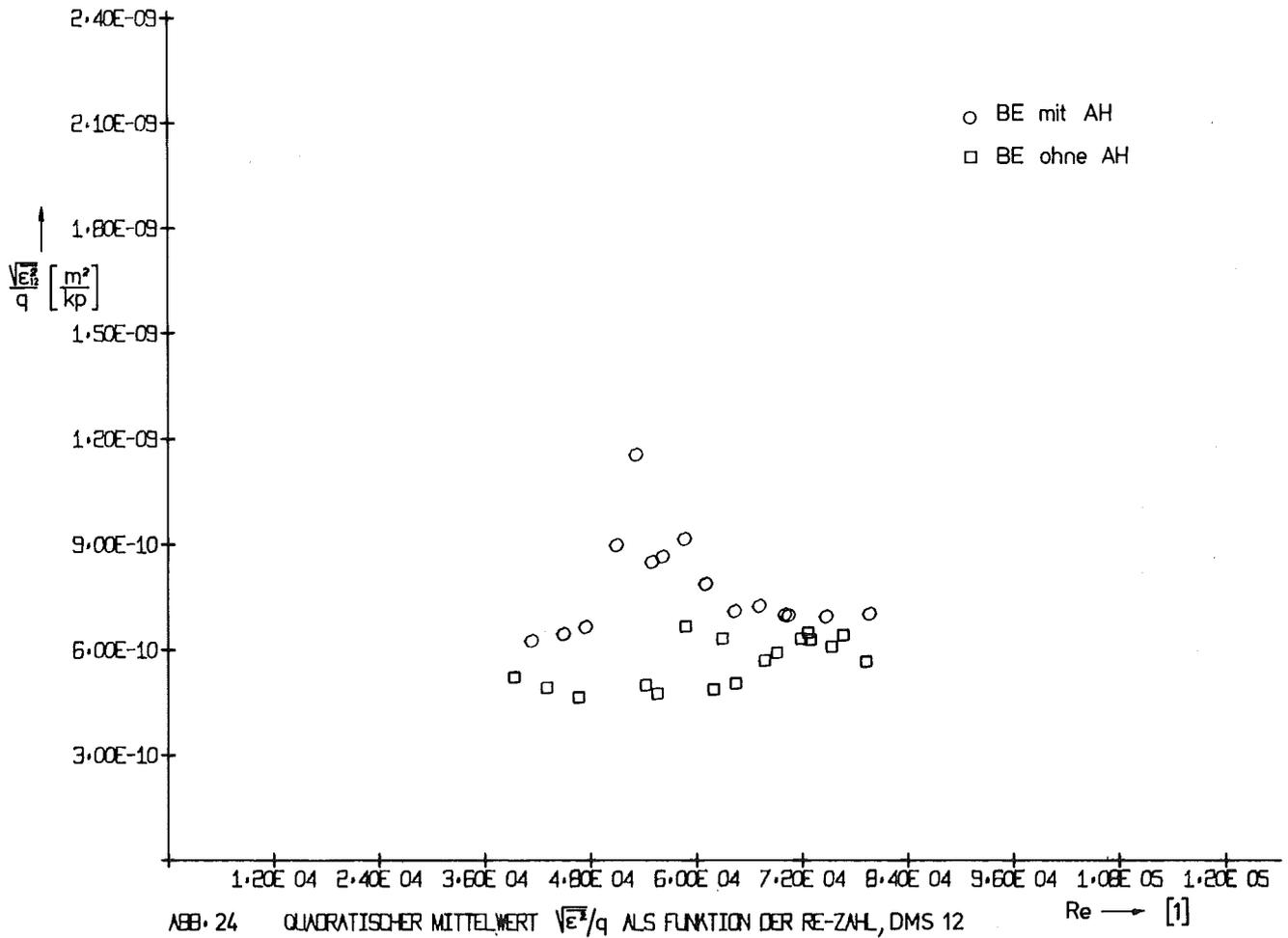
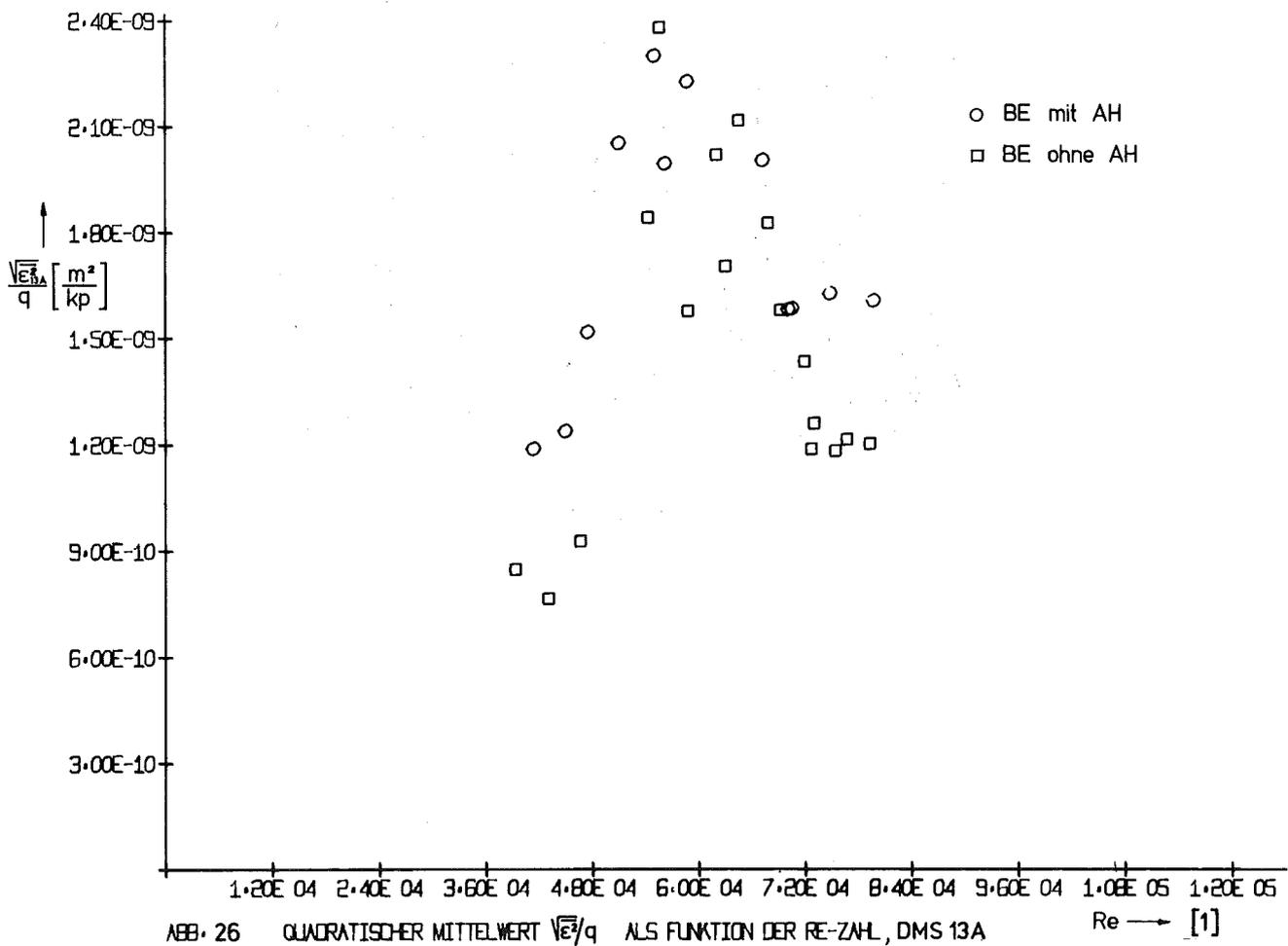
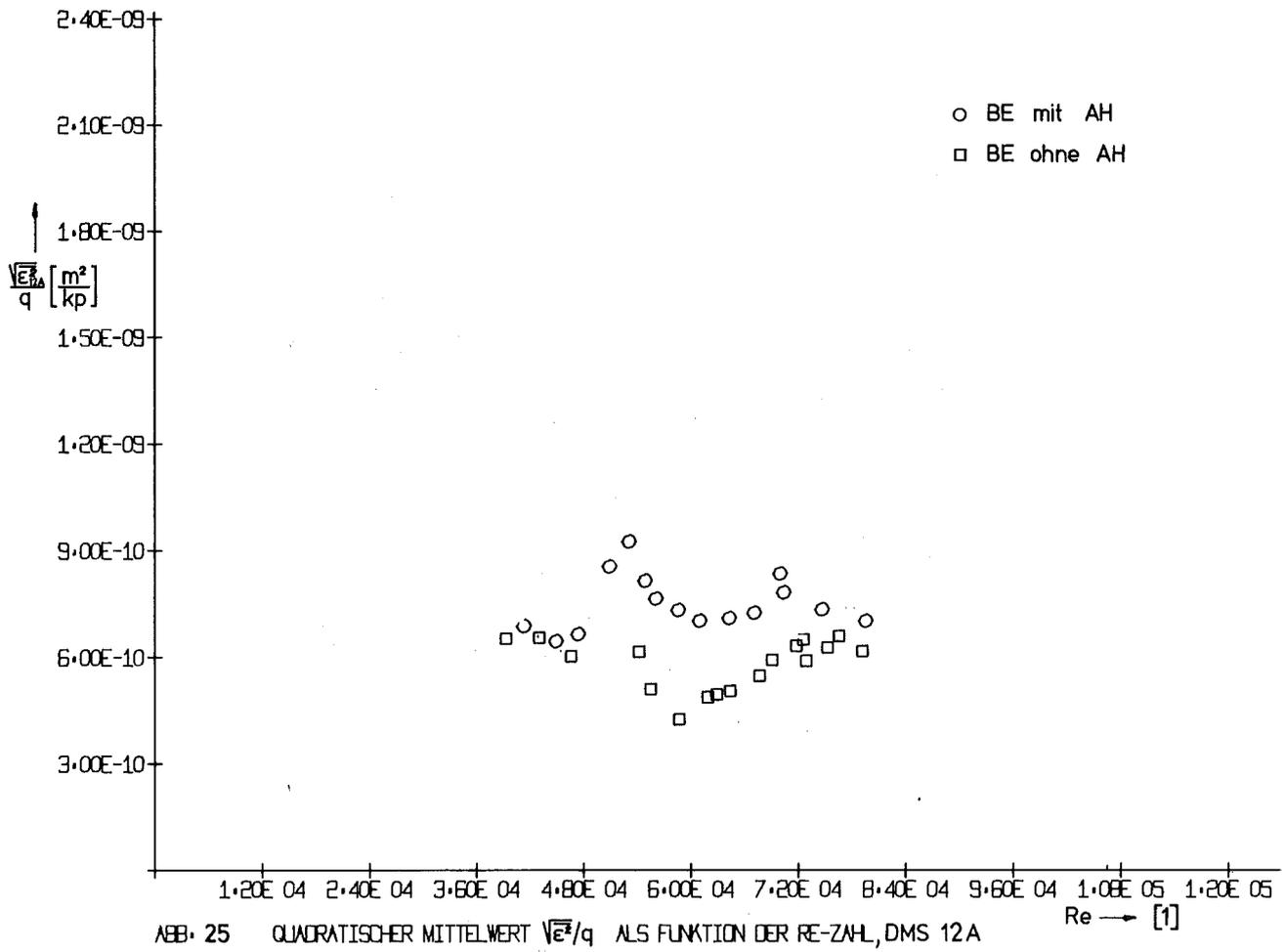
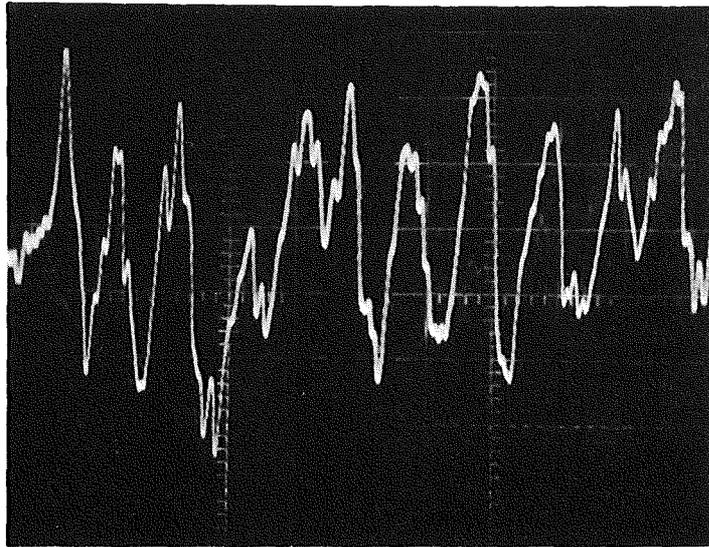
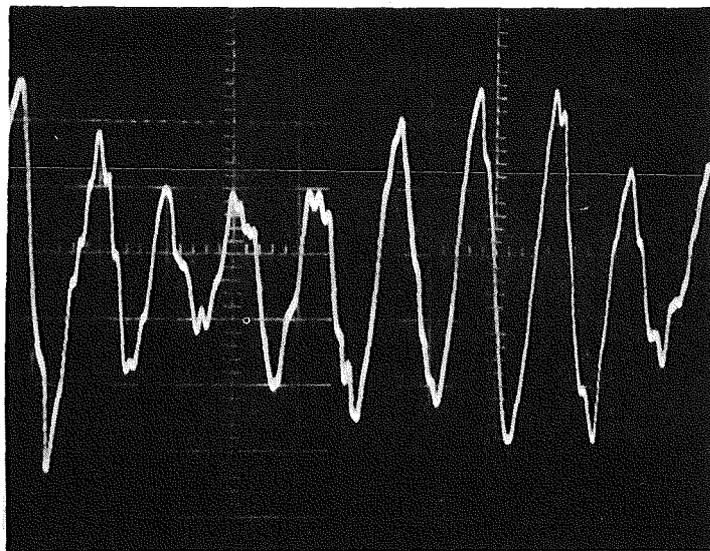


ABB. 24 QUADRATISCHER MITTELWERT $\sqrt{E_r^2}/q$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DMS 12



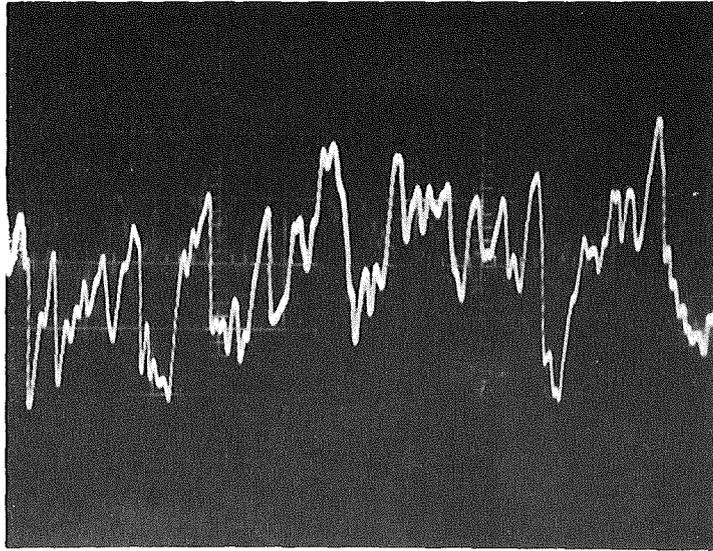


$$Re = 7,9610^4$$

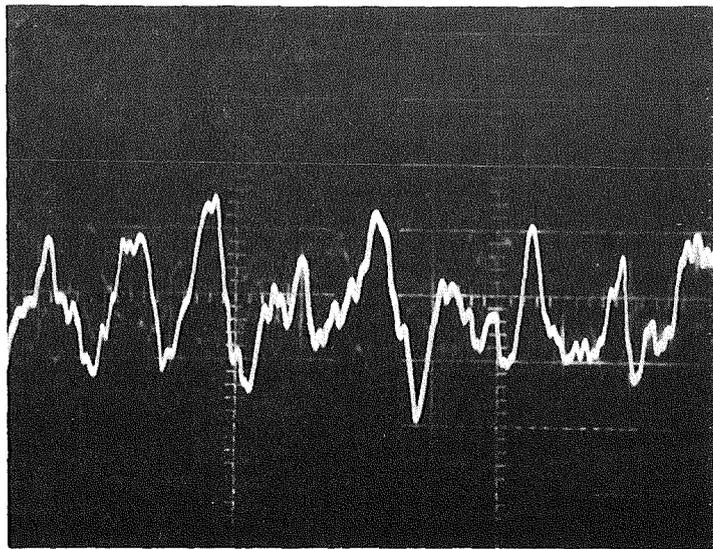


$$Re = 6,0910^4$$

Abb. 27 Typische Oszillogramme, DMS 13A



$$Re = 7,5210^4$$



$$Re = 6,1210^4$$

Abb. 28 Typische Oszillogramme, DMS 10A

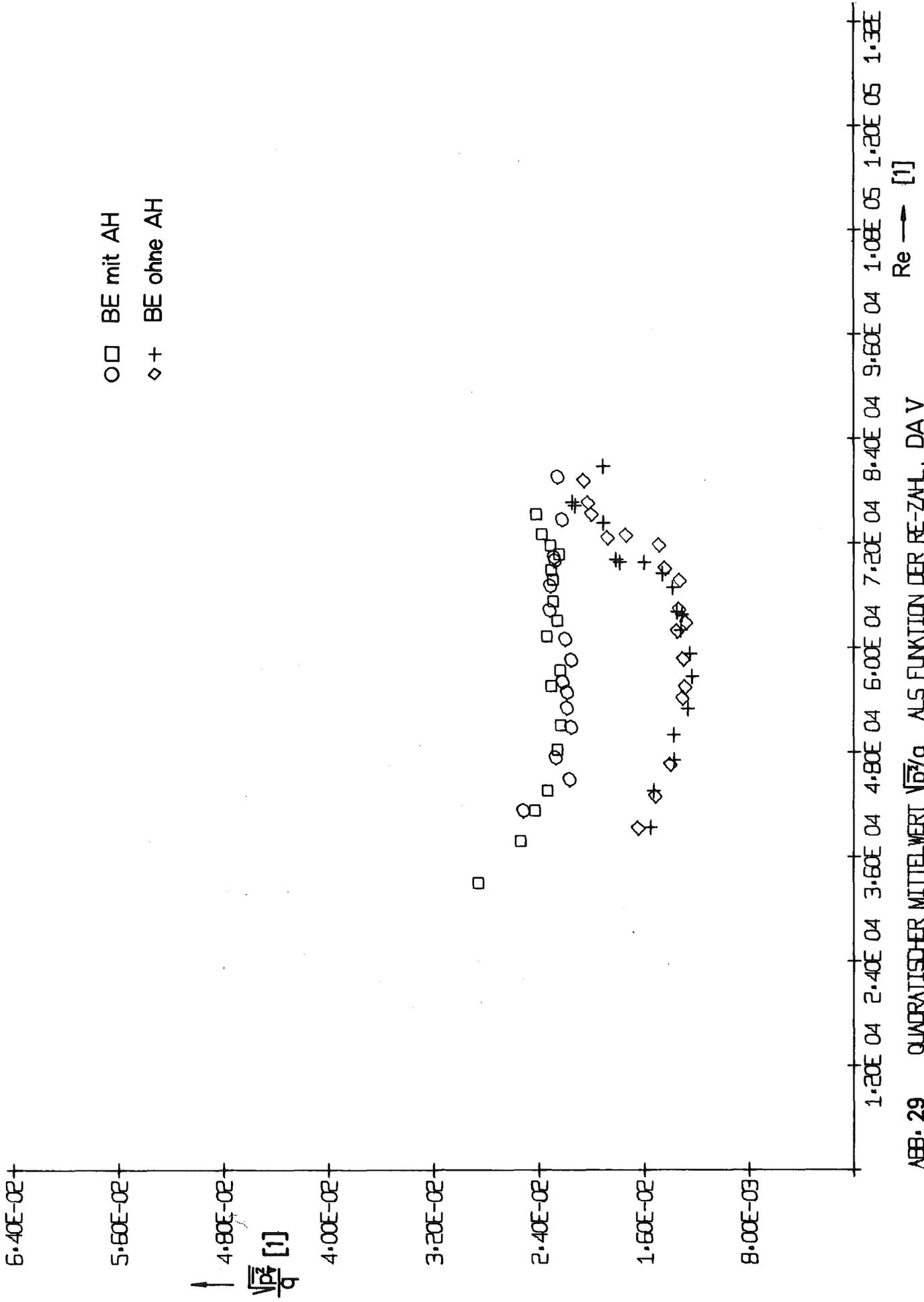


ABB. 29 QUADRATISCHER MITTELWERT $\frac{\sqrt{p_c}}{q}$ ALS FUNKTION DER RE-ZAHL, DA V

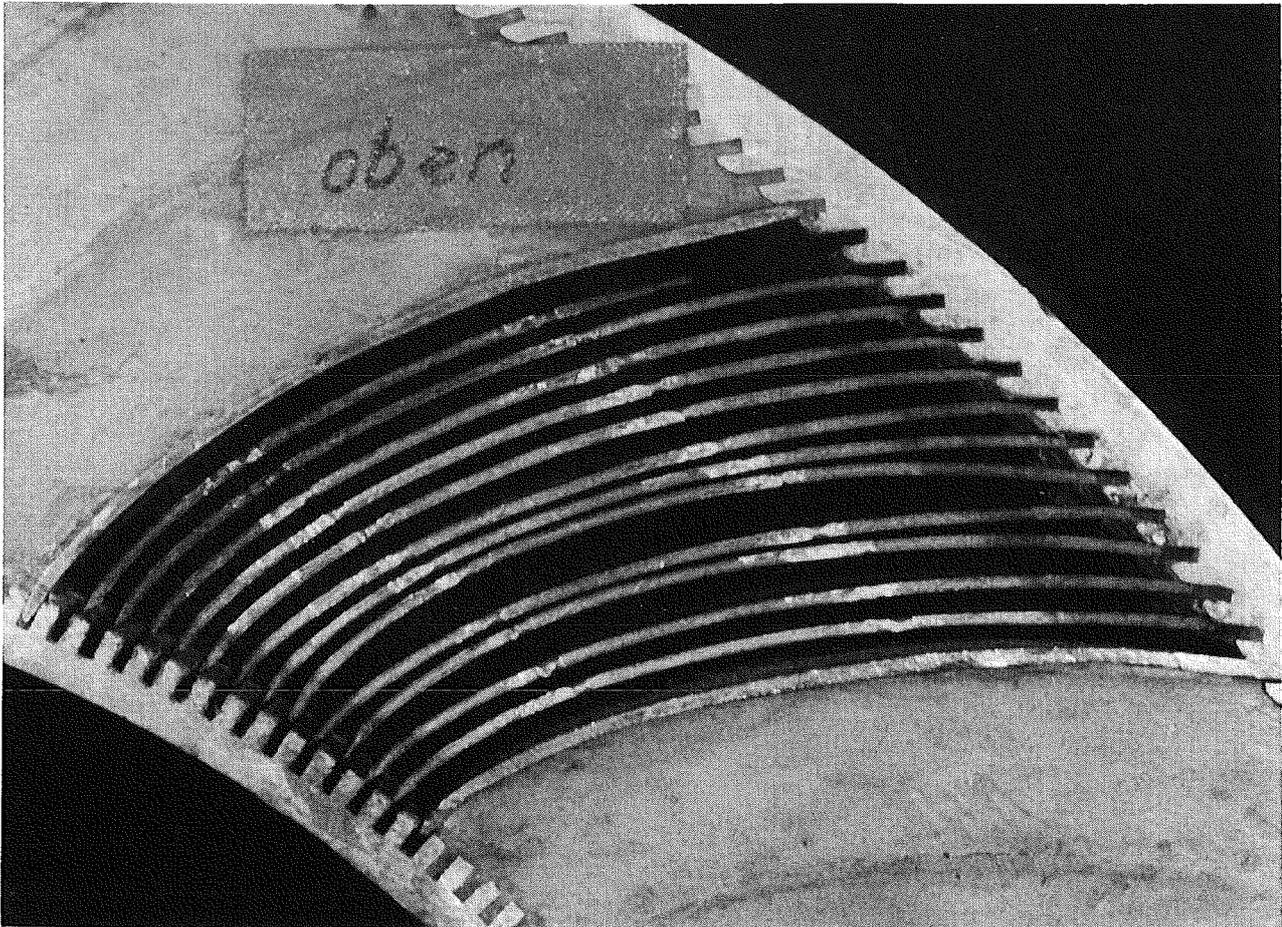


Abb.30 Brennelementausschnitt mit ausgebauten Abstandshaltern.

Zustand nach dem Versuch. Eintrittsseite

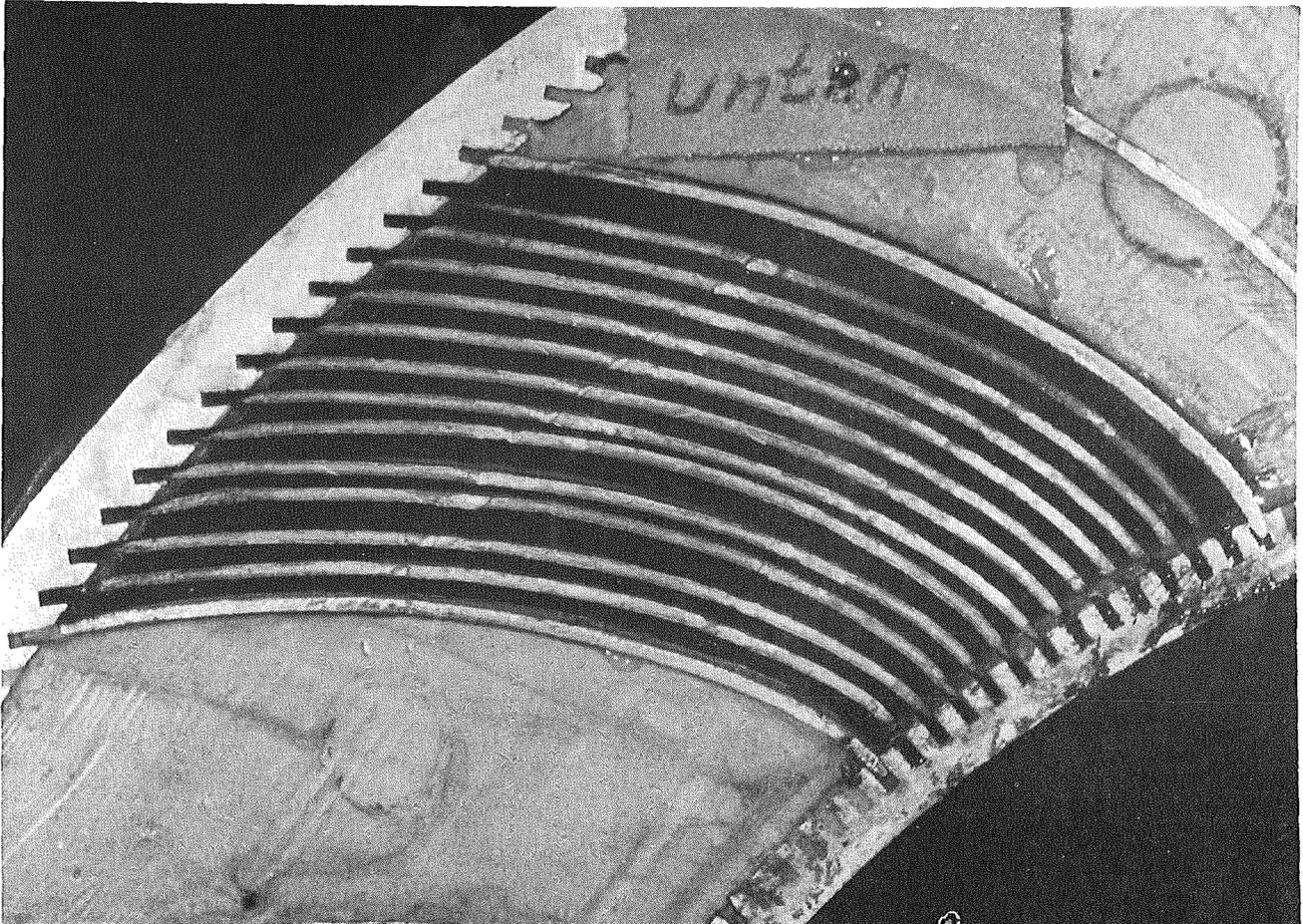


Abb.31 Brennelementausschnitt mit ausgebauten Abstandshaltern.
Zustand nach dem Versuch. Austrittsseite

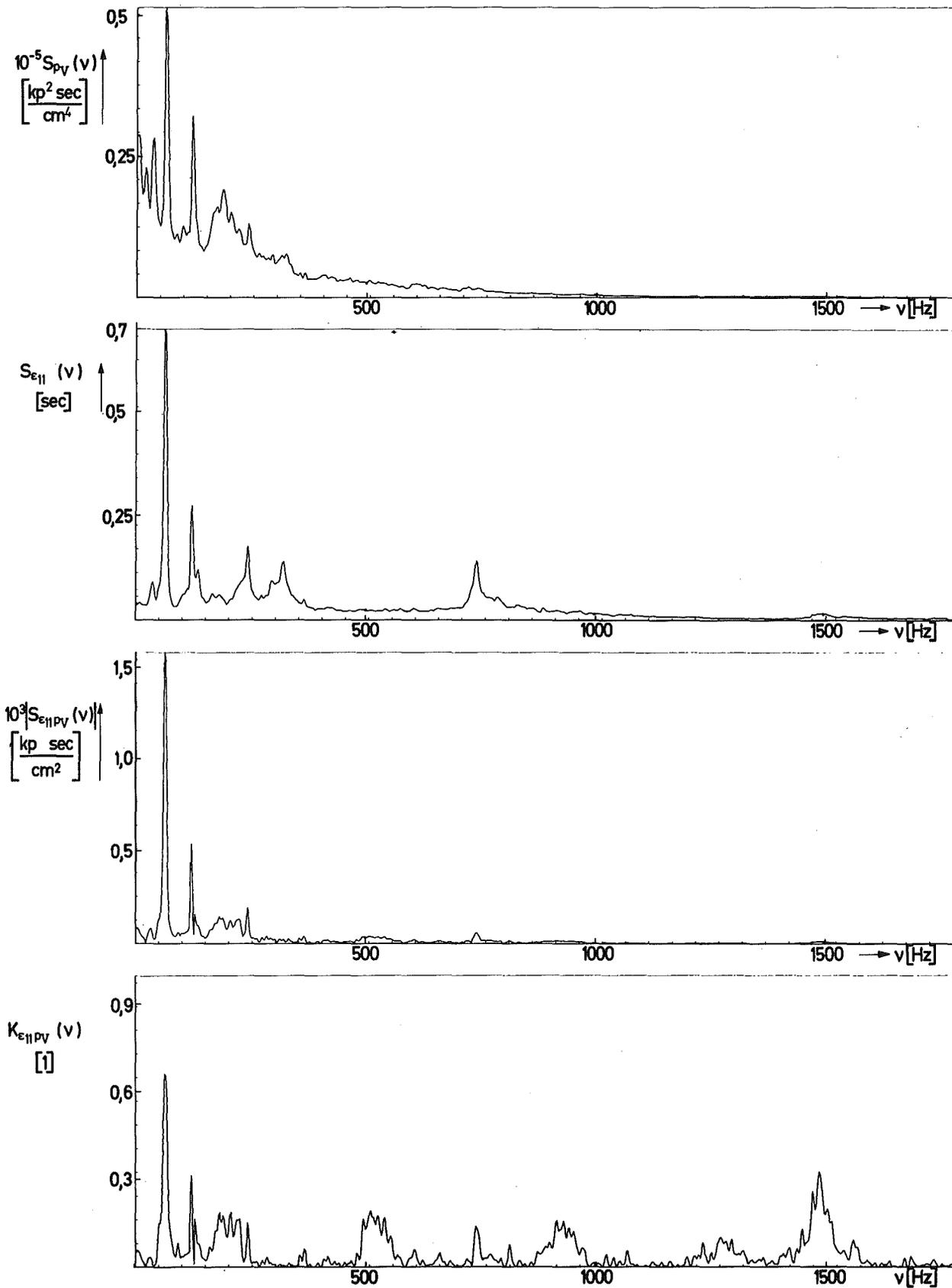


Abb. 32 Komponenten der Kreuzspektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{11}PV}(\nu)$

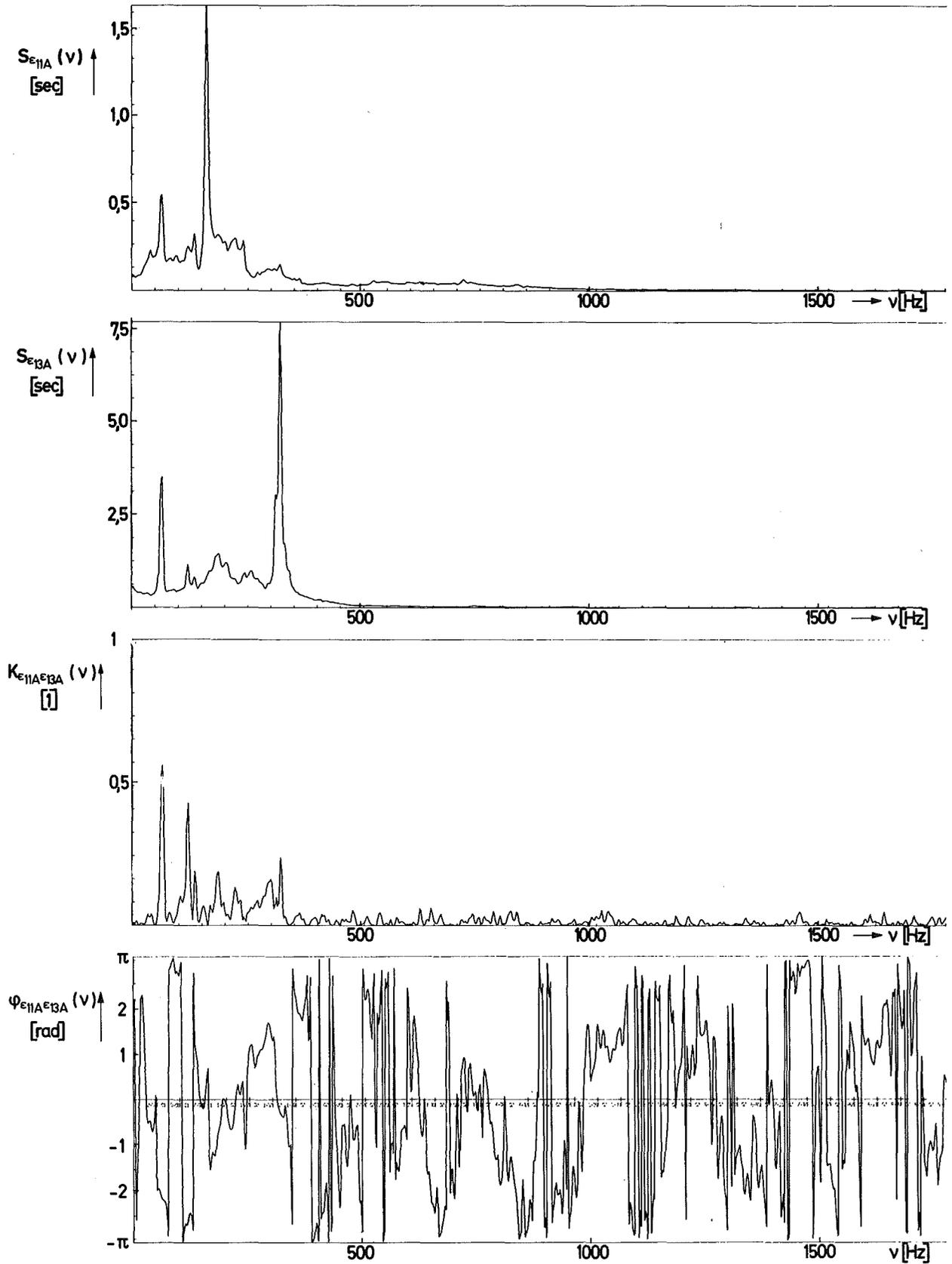


Abb. 33 Komponenten der Kreuzspektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{11A}\epsilon_{13A}}(\nu)$

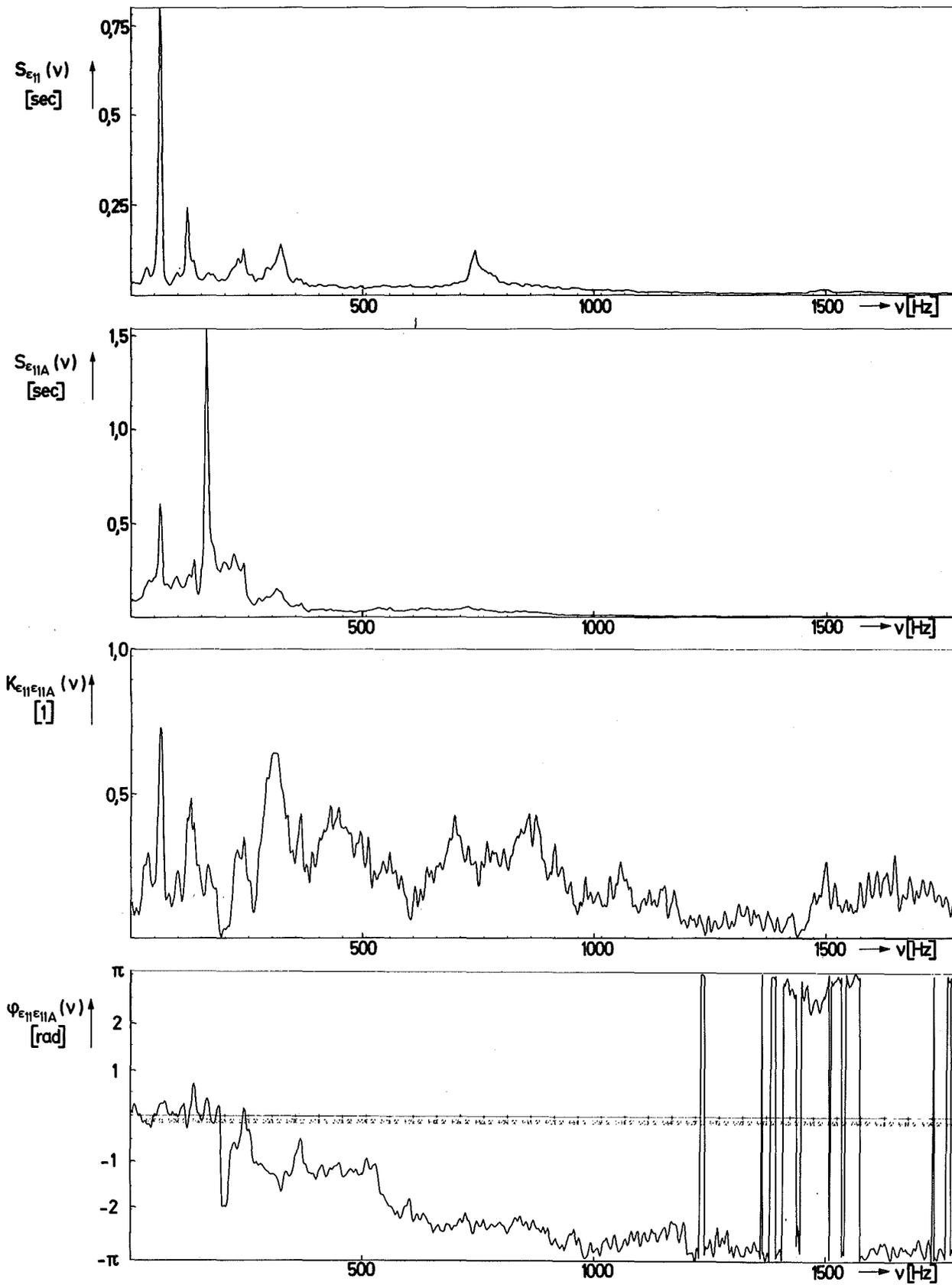


Abb. 34 Komponenten der Kreuzspektraldichtefunktion $S_{\epsilon_{11}\epsilon_{11A}}(\nu)$

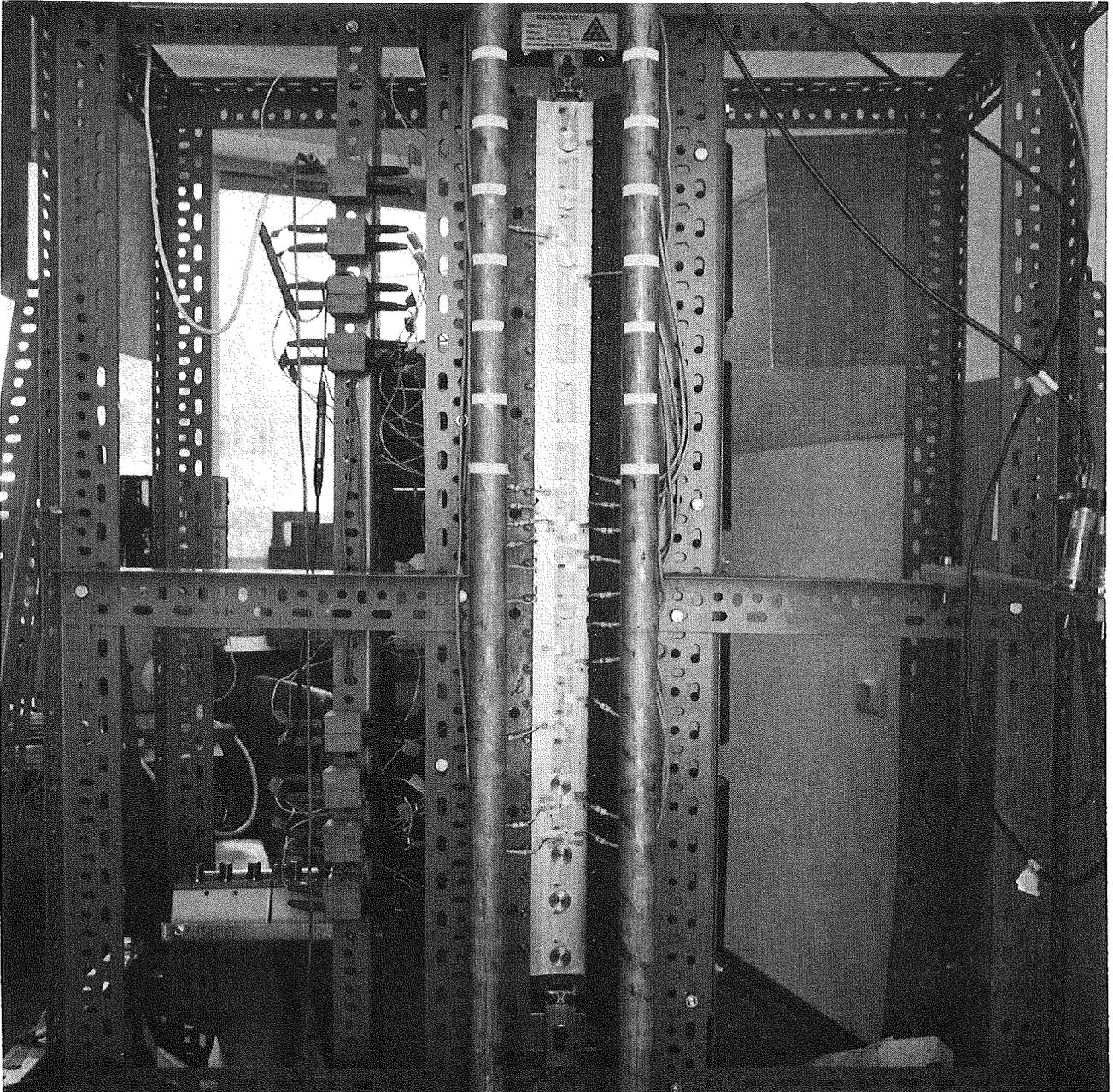
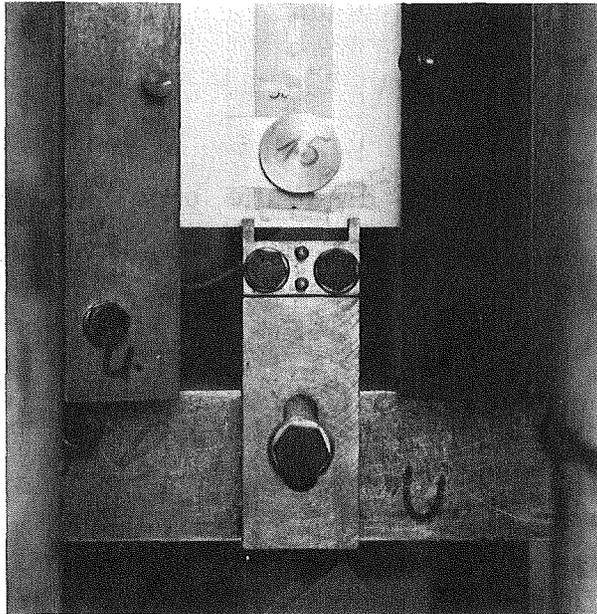
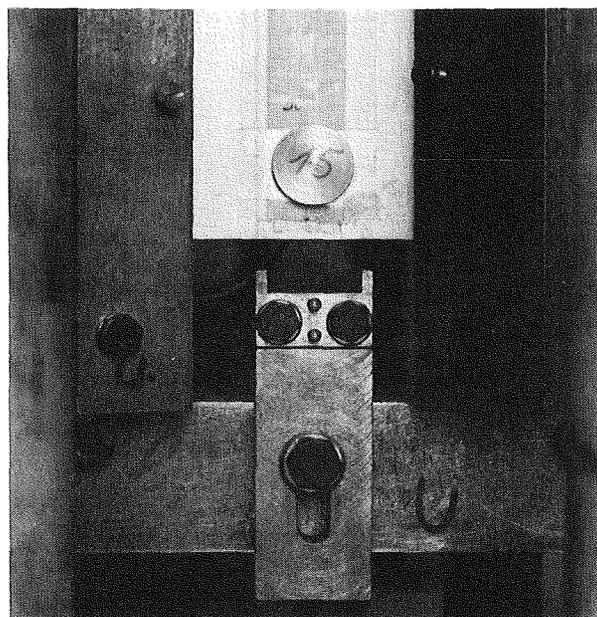


Abb. 35 Versuchsstand mit eingebauter Modellplatte



a) mit Einspannung



b) ohne Einspannung

Abb.36 Detailaufnahme der Einspannvorrichtung

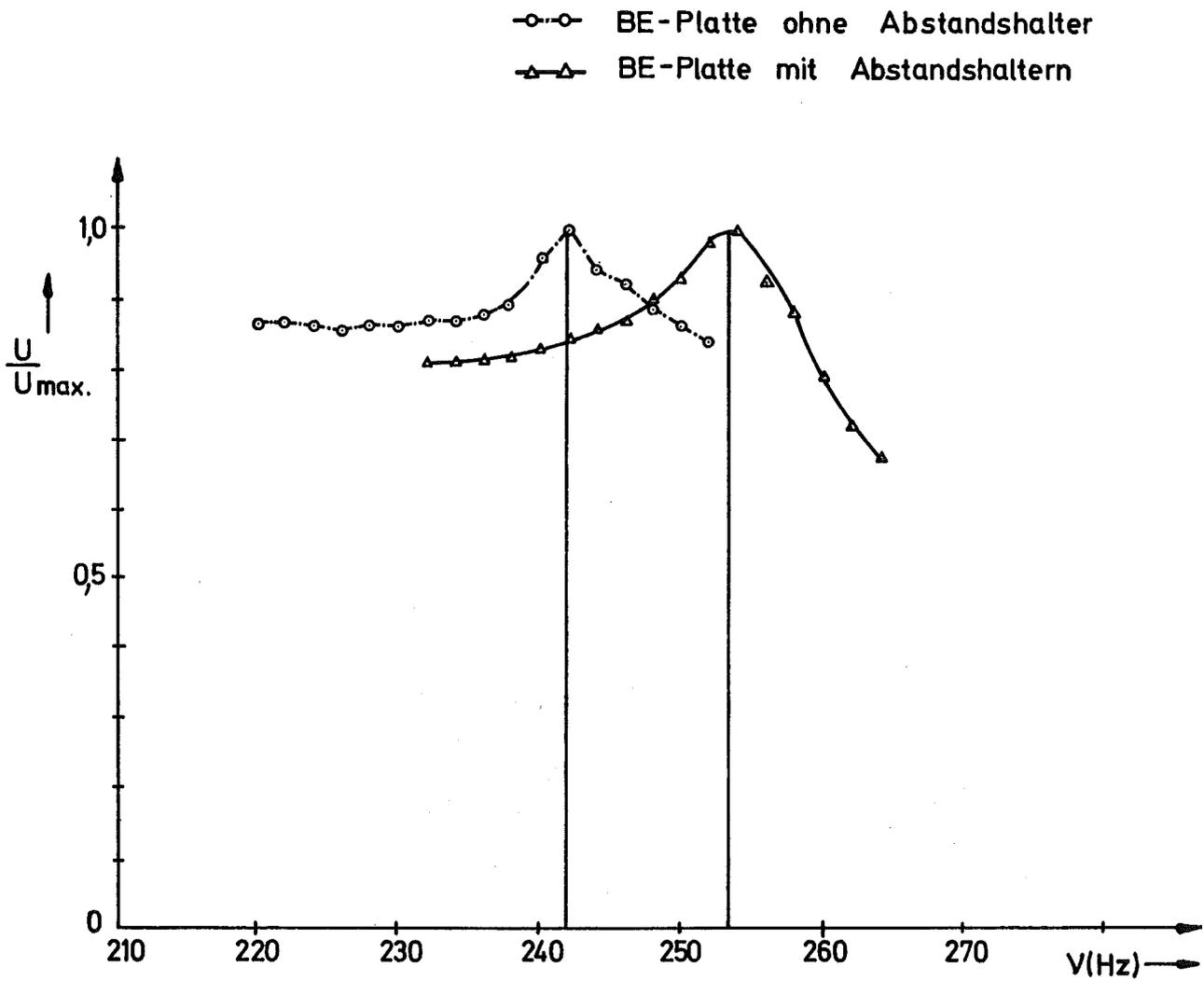


Abb.37 Resonanzkurven DMS 1 ; $x = 495\text{mm}$; $y = -10\text{mm}$
Magnetanordnung A

- BE-Platte ohne Abstandshalter
- △ BE-Platte mit Abstandshaltern

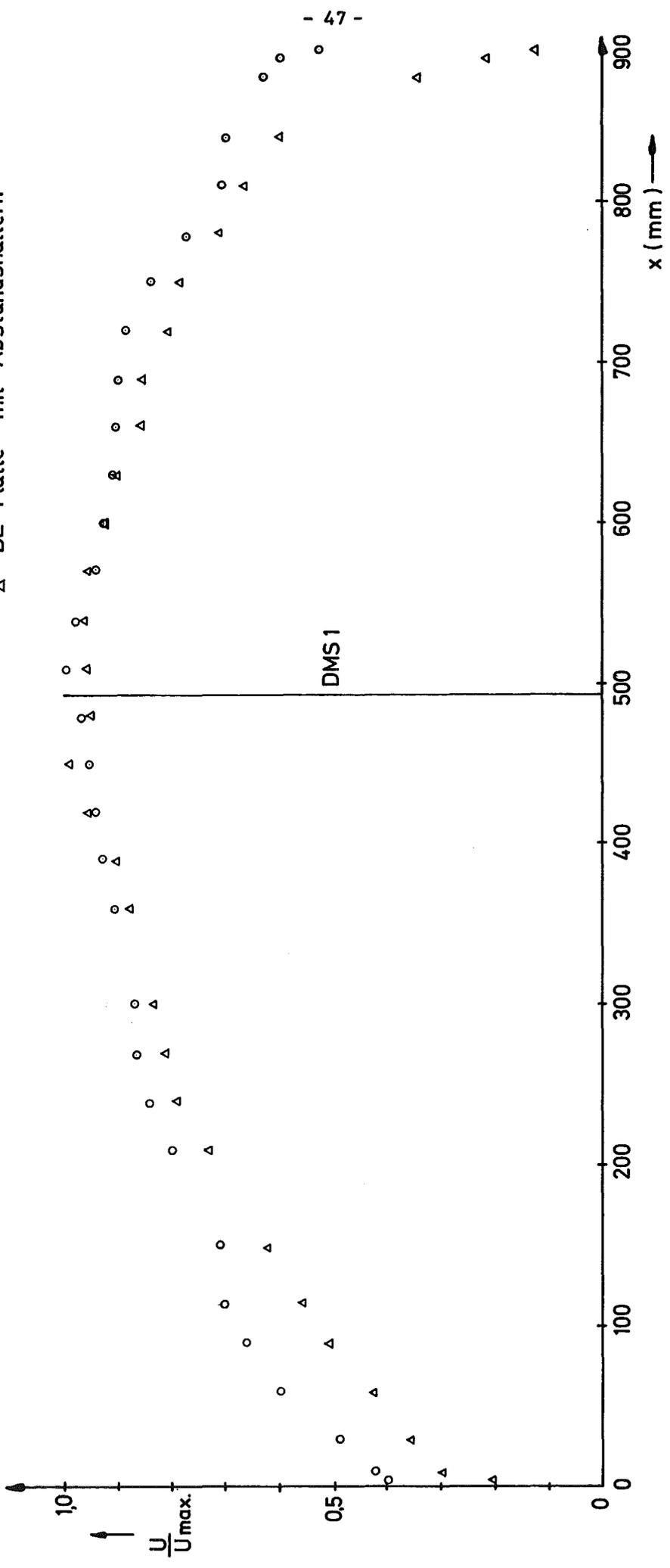


Abb.38 Längsprofil der Schwingungsformen für $\nu = 242$ Hz und $\nu = 253,5$ Hz

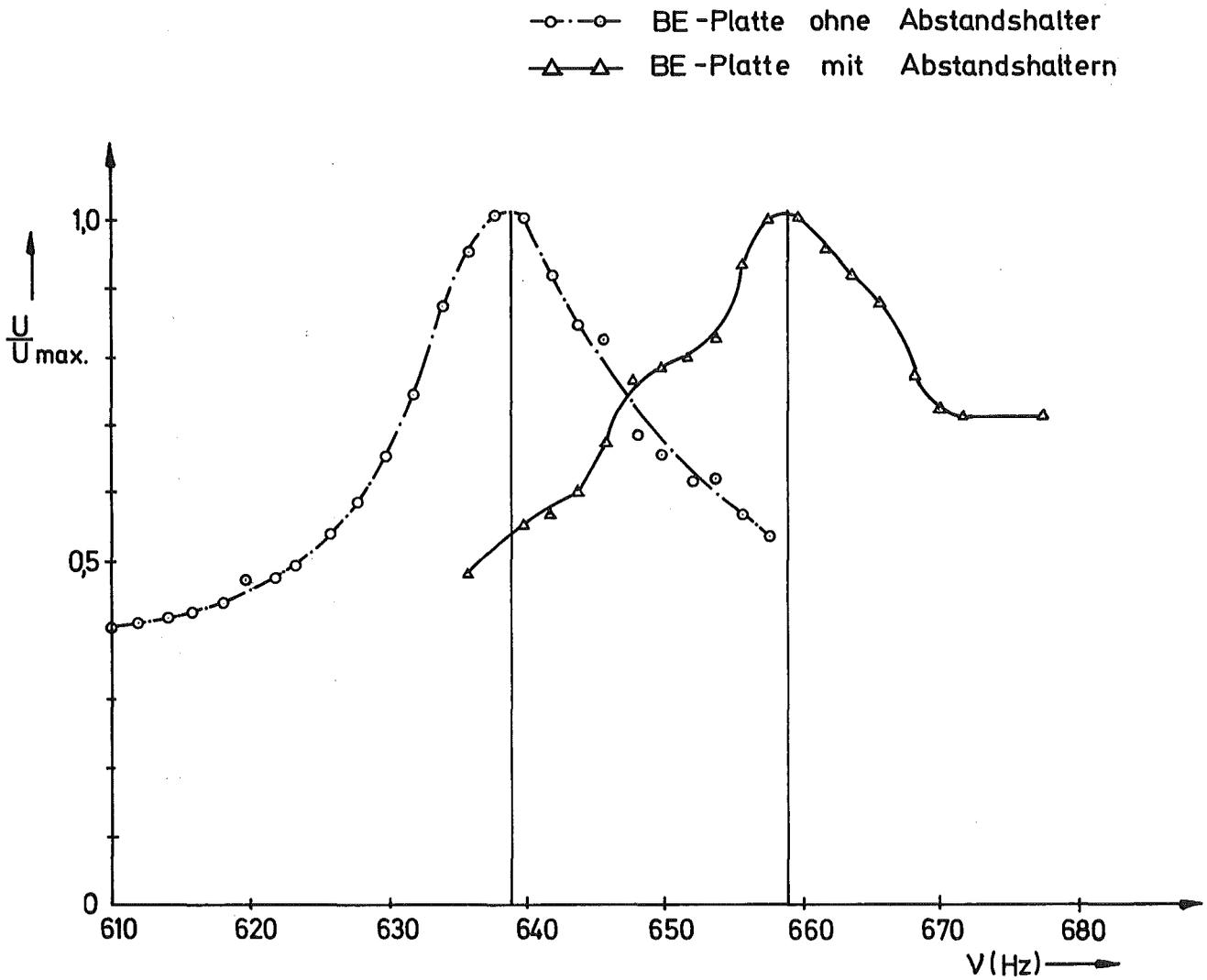


Abb.39 Resonanzkurven DMS 4; $x = 180 \text{ mm}$; $y = -10 \text{ mm}$
Magnetanordnung B

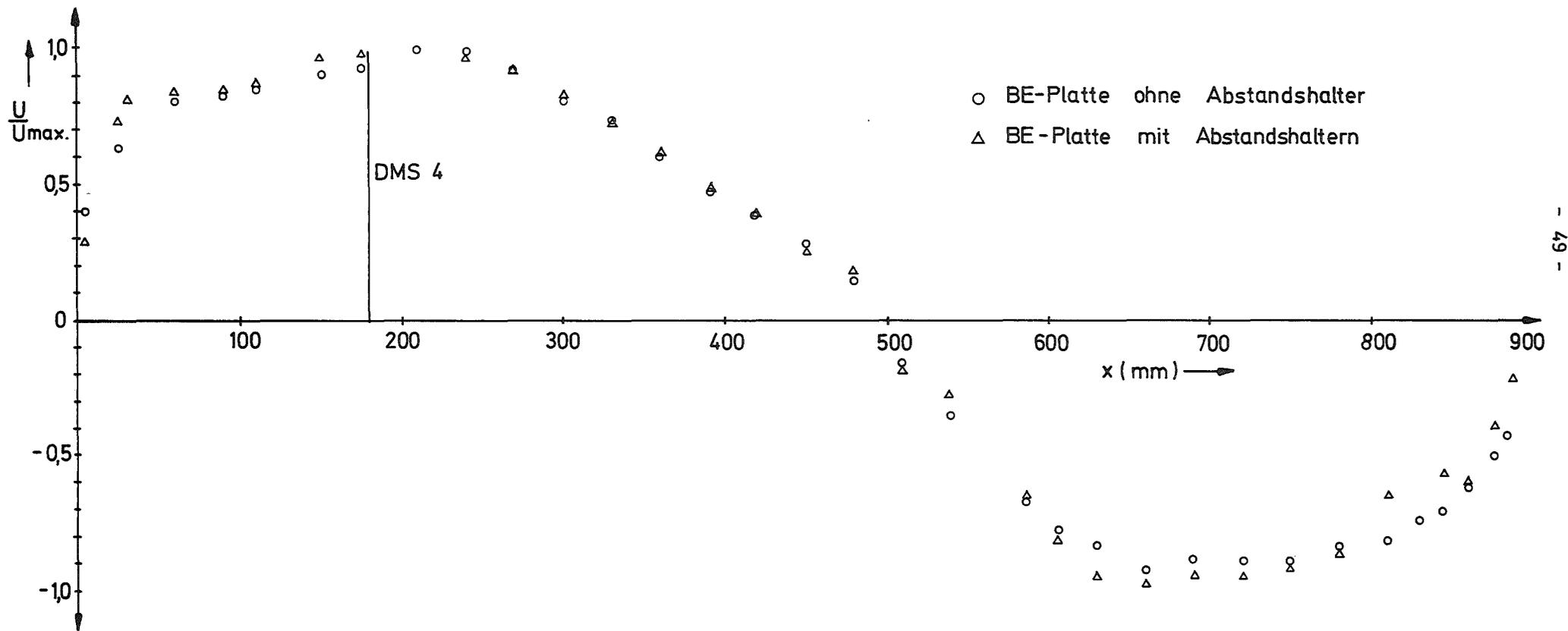


Abb.40 Längsprofil der Schwingungsformen für $\nu = 639 \text{ Hz}$ und $\nu = 659 \text{ Hz}$.