

270 | Mai 1971

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

P. Schenzle, J. Broelmann, P. Blume

# Systematische Untersuchung von Slamming-Drücken mit Hilfe von Dreh-Fall-Versuchen in Wellen

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

**Systematische Untersuchung von Slamming-Drücken  
mit Hilfe von Dreh-Fall-Versuchen in Wellen**

**Peter Schenzle  
Jobst Broelmann  
Peter Blume**

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 270

Systematische Untersuchung von Slamming-Drücken  
mit Hilfe von Dreh-Fall-Versuchen in Wellen

Bericht zum Forschungsauftrag T 01 - 860 - I - 205

Bearbeiter:

Leiter:

(Prof. Dr.-Ing. O. Grim)

Hamburg, Mai 1971

Bericht zum Forschungsauftrag T 01 - 860 - I - 205

Systematische Untersuchung von Slamming-Drücken  
mit Hilfe von Dreh-Fall-Versuchen in Wellen

---

	Seite
Vorbemerkung	1
Zusammenfassung	2
1. Grundlage	3
2. Ziel der Untersuchungen	6
3. Modell und Meßeinrichtung	7
4. Fallversuch	8
4.1. Aufbau	
4.2. Durchführung und Ergebnisse	
5. Drehfallversuch in glattem Wasser	12
5.1. Aufbau	
5.2. Durchführung und Ergebnisse	
6. Drehfallversuch in regelmäßigen entgegen- laufenden Wellen	14
6.1. Aufbau	
6.2. Durchführung und Ergebnisse	
7. Gegenüberstellung der Ergebnisse	17
8. Feststellungen	19
Literatur	21
Anhang 1: Bilder	Nr. 1 - 39
Anhang 2: Fotos	Nr. I - IX

### Vorbemerkung

Fährt ein Schiff entgegen der mittleren Laufrichtung des Seegangs, so führt es im wesentlichen Tauch- und Stampfbewegungen aus (vertikale Translation und Drehung um eine horizontale Querachse).

In schwerem Seegang kann dabei in einem gewissen Bereich des Vorschiffes die vertikale Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche so groß werden, daß der Schiffsboden austaucht. Beim Wiedereintauchen kann das Schiff, besonders beim Aufschlagen flacher Bodenbereiche auf die Wasseroberfläche, starke hydrodynamische Stöße erfahren, die in Schiffbau und Schifffahrt als "Slamming" bekannt sind. Neben erheblichen lokalen Belastungen der Bodenbeplattung wird dadurch der ganze Schiffskörper zu Biegeschwingungen angeregt.

### Zusammenfassung

In einer Reihe von Fallversuchen in Glattwasser und von Dreh-Fallversuchen in Glattwasser und in Wellen mit demselben Schiffsmodell wurde versucht, durch Bodendruckmessungen an mehreren Stellen des Kiels einen Beitrag zu leisten zur Klärung der Abhängigkeit des größten auftretenden Slamming-Drucks von der Relativgeschwindigkeit zwischen Schiffsboden und Wellenoberfläche, von der Bodenform und von den Eintauchbedingungen.

Die Druckwerte des Fallversuchs stehen bei etwa quadratischer Geschwindigkeitsabhängigkeit in guter Übereinstimmung mit denen zweidimensionaler Fallversuche.

Die Steifigkeit ist im flachbodigen Bereich von wesentlichem Einfluß auf den Slamming-Druck.

Während die Druckbeiwerte aus dem Fallversuch im vorderen Modellbereich auch bei den Dreh-Fallversuchen in Glattwasser und in Wellen nicht überschritten wurden, traten im flachbodigen Bereich bei beiden Dreh-Fallversuchen in einem gewissen Bereich kleiner Eintauchwinkel zum Teil um ein Mehrfaches höhere Drücke auf als beim Eintauchwinkel null beim Fall- und Dreh-Fallversuch.

Die aufgetretenen Erscheinungen bedürfen zu ihrer Klärung gezielter Untersuchungen.

## 1. Grundlage

Die vorliegenden Untersuchungen<sup>\*)</sup> sollen die Frage von möglichen statistischen Eigenschaften der Abhängigkeit des größten auftretenden Slamming-Drucks von der Relativgeschwindigkeit zwischen der Wellenoberfläche und dem Schiffsboden klären helfen. Diese Frage ist bisher nicht befriedigend zu beantworten. Sie ist wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung und Abschätzung gefährlicher Bodenbeanspruchungen.

Eine Untersuchung von Meyerhoff [1] im Rahmen des Forschungsauftrages T 01-326-I-205 hat folgenden Stand erbracht: Druckmessungen bei Fallversuchen mit flachbodigen Modellen von sehr unterschiedlicher Größe zeigen jeweils recht gut eine Abhängigkeit des größten auftretenden Drucks proportional dem Quadrat der Auftreffgeschwindigkeit des Modells. Diese Tendenz hat man bisher bei allen Fallversuchen feststellen können. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Auftreffgeschwindigkeiten in den in [1] ausgewerteten Fallversuchen nur in einem relativ kleinen Bereich variiert wurden, nämlich höchstens im Verhältnis von etwa 1:2. Die zitierte Untersuchung zeigt außerdem im Diagr.5 (Bild 40), daß sich die Ergebnisse der Fallversuche mit den verschiedenen flachbodigen Modellen alle etwa in die gleiche Tendenz einordnen lassen. Dies legt den Schluß nahe, daß beim hydrodynamischen Stoß flachbodiger Modelle im wesentlichen nur Newtonsche (dynamische) Ähnlichkeit zu erfüllen ist.

In [1] wurden außerdem die "Dreh-Fall-Versuche" von Bledsoe und Schwartz [2] ausgewertet. Erste Versuche dieser Art mit einem Schiffsmodell wurden 1954 von Todd [3] veröffentlicht. Damals erfolgten allerdings noch keine Bodendruckmessungen. Bei den Dreh-Fall-Versuchen kann sich das Modell um eine festgehaltene Querachse im Hinterschiff drehen und dabei eine spezielle Stampfbewegung ausführen. Das Vorschiff des Schiffsmodells wird auf eine vorbestimmte Höhe angehoben und von dort auf die ruhende Wasseroberfläche fallengelassen. Bei diesen

---

<sup>\*)</sup> Die Untersuchung wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. ermöglicht, der die Autoren hiermit ihren Dank aussprechen.

Versuchen haben Bledsoe und Schwartz die Vertikalbeschleunigung in der Nähe des Vorstevens und den Bodendruck an mehreren Stellen des Vorschiffs gemessen. Bei der Auswertung dieser Messungen durch Meyerhoff [1] wurde der größte bei diesen Versuchen überhaupt gemessene Druck betrachtet. Die Auftreffgeschwindigkeiten sind in [2] nicht angegeben und mußten daher abgeschätzt werden. Die dabei möglichen Fehler können das grundsätzliche Bild nicht beeinflussen: Die Druckmessung bei diesem Dreh-Fall-Versuch ordnet sich gut in die Tendenz ein, die aus den Fallversuchen ermittelt wurde.

Dieses Ergebnis der Auswertung bestärkt die häufig geäußerte Vermutung, daß der ungünstigste Stoß auf den Boden eines Schiffes im Seegang dem Stoß eines Kastenmodells im Fallversuch nahekommt.

Auf der anderen Seite hat Ochi [4] aus Versuchen mit einem Modell eines "Mariner"-Schiffes in unregelmäßigem Modell-See-gang den Zusammenhang zwischen dem Druck, der am Kiel des Modells auf 0,1 L vom Vorsteven gemessen wurde, und der Relativgeschwindigkeit zwischen dem Modell und der Wellenoberfläche im betrachteten Spantquerschnitt im Augenblick des Stoßes bestimmt. Dabei wurde vorausgesetzt, daß die etwa 3,0 m vor dem 3,87mlangen Modell gemessenen Wellen sich bis zu dem betrachteten Querschnitt nicht deformieren. Das im übrigen auch im Bericht [5] nicht genau beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit könnte wohl nur zu einem kleinen Teil für die große Abweichung dieser Auswertung von den Ergebnissen der Fall- und der Dreh-Fall-Versuche verantwortlich gemacht werden. Bei Dreh-Fall-Versuchen in Wellen kann man diese Schwierigkeit ganz vermeiden.

Die Auswertung von Ochi [4] zeigt überraschend deutlich eine Abhängigkeit des größten bemessenen Drucks proportional dem Quadrat der Auftreffgeschwindigkeit. Die Meßwerte liegen aber fast um eine Zehnerpotenz unter den Ergebnissen der Fall- und Dreh-Fall-Versuche.

Die Auswertung für den Spantquerschnitt 0,1 L vom Vorsteven ist offenbar nicht zweckmäßig, wenn man Aussagen über die ungünstigsten Beanspruchungen durch Stöße gewinnen will. Die höchsten Druckwerte hat Ochi (vgl. auch [5] ) am Spant 0,2 L vom Vorsteven gemessen. Diese Drücke waren bis etwa doppelt so groß wie am Spant 0,1 L vom Vorsteven. Da man erwarten kann, daß die Relativgeschwindigkeit an dem hinteren der beiden Querschnitte kleiner ist, zeigt sich die Wichtigkeit, bei der Auswertung die relativ am höchsten belasteten Querschnitte zu erfassen.

In der Diskussion zum Vortrag von Meyerhoff [1] hat Weinblum ebenfalls auf die Möglichkeit und den Nutzen von Dreh-Fall-Versuchen in Wellen hingewiesen (vgl. [6] ).

## 2. Ziel der Untersuchungen

Der Vergleich der Ergebnisse der Fallversuche und der Modellversuche im Modellseegang legt die Vermutung nahe, daß es sich bei den festgestellten Unterschieden nicht oder nur in unbedeutendem Maße um einen Maßstabeinfluß handelt. Man kann vielmehr vermuten, daß der ungünstigste Stoß auf den Boden eines Schiffsmodells im Seegang dem Stoß eines flachbodigen Modells im Fallversuch nahekommt, daß aber bei den bekannten Versuchen im Modellseegang die ungünstigsten Fälle nicht erfaßt worden sind.

Es ist zu erwarten, daß die geometrischen Voraussetzungen für diesen ungünstigsten Stoß, je nach Art des Seegangs, der Schiffsform, der Beladung, der Geschwindigkeit, der Kursrichtung usw., nur bei einzelnen Stößen oder auch gar nicht erfüllt sind. Außerdem werden die ungünstigsten Bedingungen nicht immer an den gleichen Querschnitten erfüllt sein.

Die Untersuchungen sollen den Zusammenhang zwischen dem höchsten möglichen Druck während des Stoßes und der vertikalen Relativgeschwindigkeit liefern. Außerdem sollen sie Aufschluß darüber liefern, welche geometrischen Verhältnisse zwischen Wellenoberfläche und Schiffsboden im Augenblick des Stoßes die höchsten Drücke verursachen. Beide Angaben können dann in statistischen Betrachtungen zur Vorhersage gefährlicher Beanspruchungen und ihrer Häufigkeit verwendet werden.

In den üblichen Seegangversuchen mit einem freien Modell in den Wellen besteht nicht genügend Freiheit, die geometrischen und dynamischen Verhältnisse im Augenblick des Stoßes zu beeinflussen, um systematische Untersuchungen anzustellen.

Dreh-Fall-Versuche in regelmäßigen Wellen bieten dagegen eher die Möglichkeit, die Bedingungen zu steuern und gleichzeitig einigermaßen reproduzierbar zu machen. Sie erlauben außerdem, die vertikale Relativgeschwindigkeit zu bestimmen.

Fallversuche und Dreh-Fall-Versuche in glattem Wasser mit demselben Modell und derselben Meßeinrichtung sollen die direkte Gegenüberstellung der Druckmeßwerte aus allen drei Versuchsarten ermöglichen.

### 3. Modell und Meßeinrichtung

Für das Modell wurde der Typ des "Mariner"-Schiffes gewählt, weil für ihn bereits andere systematische Versuchsreihen vorliegen und weil seine Form auch heute noch typisch für schnellere Handelsschiffe ist. ( Bild 1 u.I ).

Außerdem diente er als Modell bei den Slamming-Messungen von Ochi [4] in unregelmäßigem Modellseegang, und ein Spantquerschnitt dieses Typs wurde in den zweidimensionalen Fallversuchen von Ochi und Schwartz [7] untersucht.

Das ca. 2 m lange Modell ist im Maßstab 1:80 aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt und durch ein Sperrholzdeck verschlossen. Im Vorschiffsbereich sind längs der Mittellinie im Boden sechs Buchsen zur Aufnahme von piezo-elektrischen Quarz-Druckmeßdosen des Typs "Kistler" 701 A bzw. 7031 eingelassen (Bild 2, 3 u.I ). Die Druckaufnehmer haben eine Meßfläche von 9,5 mm Durchmesser, die bündig an die umgebende Außenhaut anschließt. Zum Versetzen oder Auswechseln sind die Druckaufnehmer durch zwei wasserdicht verschließbare Handlöcher im Deck zugänglich. Die in einer Ladungsverschiebung bestehenden Signale der Druckaufnehmer werden durch einen speziellen "Piezo-Verstärker" in Spannungssignale umgewandelt und auf einem Kathodenstrahl-Oszillographen sichtbar gemacht, dessen einmaliger Strahldurchlauf durch das fallende Modell selbst kurz vor dem Stoß über einen Mikroschalter gestartet wird. Vom Zweistrahl-Oszillographen können durch Zerhackung der beiden Strahlen neben einer Wegmarke die Signale von maximal drei Druckdosen aufgezeichnet werden. Die nicht benötigten Meßstellen werden solange durch Attrappen verschlossen.

Die Wegmarken, die das Modell während des Falls passiert, sind die Zähne einer Zahnstange vom Modul 1, (d.h. einer Teilung von  $\pi$  mm), die mit einem induktiven Geber aufgenommen werden.

Das Schirmbild des Oszillographen wird von einer Kleinbildkamera aufgenommen, deren Verschluß jeweils kurz vor und nach dem Versuch manuell betätigt wird.

#### 4. Fallversuch

##### 4.1. Aufbau

Beim reinen Fallversuch ist das Modell horizontal ausgerichtet und wird an zwei senkrechten Gleitschienen geführt. Dabei läuft die mitfallende Aufhängungsvorrichtung mit Kugelbuchsen auf den runden Gleitschienen aus hartverchromtem Stahl.

In den verschiedenen Fallhöhen wird das Modell durch einen Elektromagneten gehalten, der direkt an einer Blechplatte an Deck des Modells angreift. Der Fallversuch wird durch Abschalten des Magneten begonnen. Kurz vor dem Auftreffen auf die Wasseroberfläche betätigt das fallende Modell den Mikroschalter, über den der Startimpuls an den Oszillographen gegeben wird (Bild VII und 4).

Das Modell fällt in ein Wasserbecken von 5 m Durchmesser und 1 m Wassertiefe, an dessen Rand ein einfacher, 5 cm breiter horizontaler Blechstreifen in Höhe des Wasserspiegels als "Strand" zur Dämpfung der beim Fall erzeugten Wellen angebracht ist. Bei einer Länge von nur einem Viertel des Beckenumfangs konnte so die erforderliche Wartezeit zwischen zwei Versuchen zur Beruhigung der Wasseroberfläche von ca. 20 auf 10 Minuten verringert werden.

##### 4.2. Durchführung und Ergebnisse

Der reine Fallversuch wurde mit drei verschiedenen Fallhöhen von ca. 230, 150 und 80 mm durchgeführt. Für die zugehörigen Auftreffgeschwindigkeiten sind die registrierten Wegmarkierungen maßgebend, da die Endgeschwindigkeiten wegen der Lagerreibung kleiner als beim entsprechenden freien Fall sind. Eine typische Aufzeichnung von 3 Mepkanälen und einer Wegmarke gibt Bild IV wieder. Es zeigt unter einer sinusförmigen Wegmarke die Druckverläufe an 3 Meßstellen. Beim Aufzeichnen von vier Meßgrößen verfolgt jeder Strahl des zweistrahligem Oszillographen wechselweise zwei zerhackte Ordinatenverläufe dieser vier Größen. Die Zerhackerfrequenz von ca. 110 kHz

äußert sich bei großen Neigungen der aufgezeichneten Funktion in deren Aufsplitterung in einzelne Punkte. Das bringt bei der Registrierung eines sehr steilen Druckanstiegs die Gefahr, daß die Druckspitze nicht mehr eindeutig abzulesen ist. Deshalb wurden nur zwei Meßkanäle benutzt, wenn sehr steile Druckspitzen zu erwarten waren. Bei zunehmender Breite des flachen Bodens, also im Bereich 0,7 L wurden zunächst unerwartet kleine Druckausschläge bei Auftreffen gemessen, wohl aber eine Reihe größerer Druckamplituden im darauffolgenden Zeitraum festgestellt (Bild V)

Die erste, nicht aber die zweite Erscheinung wäre als Effekt eines Luftpolsters unter dem flachen Boden zu erklären gewesen. Da die Vermutung nahelag, daß neben dem Druck auch Anteile aus der Beschleunigung im Signal des Druckaufnehmers eine Rolle spielten, wurden dieselben Messungen wiederholt mit unten verschlossenen Druckdosen (Bild VI)

Der Vergleich der Bilder V und VI bestätigt den wesentlichen Einfluß der Beschleunigungsempfindlichkeit der zuerst verwendeten Druckdosen 701 A. Ein exakter Vergleich ist allerdings deshalb nicht möglich, weil die Verschluskonstruktion eine wesentliche Massenerhöhung gegenüber der unverschlossenen Meßbuchse mit sich brachte.

Neben dem direkten Einfluß der Beschleunigung des vibrierenden Bodens über die Beschleunigungsempfindlichkeit der Druckaufnehmer auf das Meßsignal war noch ein indirekter Einfluß der elastischen Bodenverformung über dadurch erregte dynamische Druckänderungen auf das Meßsignal zu vermuten. Um diesen indirekten Beschleunigungseinfluß weitgehend auszuschalten, wurde der Modellboden im Bereich der Meßstellen durch energieaufnehmende Verstärkungen in Form von hohen im Abstand von 5 cm stehenden Bodenwrangen aus 10 mm starkem Sperrholz versteift (Bild II). Messungen mit verstärktem Boden bestätigen die Vermutung, daß beim Stoß auf einen "weichen" flachen Boden (wohl hauptsächlich durch elastisches Zurückweichen) die erste Druckspitze erheblich abgebaut wird gegenüber dem entsprechenden Versuch mit steifem Boden (Bild 5)

Um den direkten Beschleunigungseinfluß auszuschalten, wurden die Druckaufnehmer vom Typ 701 A durch entsprechende, aber beschleunigungskompensierte Aufnehmer vom inzwischen auf dem Markt erschienenen Typ 7031 ersetzt

Aufnehmer Typ	Eigenfrequenz	Beschleunigungs-empfindlichkeit
701 A	65 kHz	$10^{-3}$ at/g
7031	80 kHz	$10^{-4}$ at/g

Außerdem wurde das Modell dadurch noch weiter verstärkt, daß die Bodenwangen durch zwei intercostale Längsträger verbunden wurden. Für diesen endgültigen Zustand des Modells sind in Bild 6 die Meßsignale der nichtkompensierten und der beschleunigungskompensierten Geber im Bereich breiten, flachen Bodens gegenübergestellt.

Beide Maßnahmen beeinflussten die Verläufe der registrierten Drucksignale der hinteren Meßstellen. Den wesentlichsten Einfluß brachte die Bodenverstärkung, nach der überhaupt erst Spitzen zu erkennen waren. Die Verwendung der beschleunigungskompensierten Geber vom Typ 7031 führte hauptsächlich zu einer Glättung der Kurven und zu einer eindeutigen Ablesbarkeit der Druckspitzen. Auffallend ist ein leichter zeitlicher Versatz der Druckspitzen an diesen hinteren Meßstellen, der sich wohl durch die Wirkung eines Luftpolsters in Form einer Absenkung des Wasserspiegels erklären läßt. Die nach hinten sanfter werdenden Druckanstiege weisen auch auf diesen Effekt hin.

Die Ergebnisse der mit dieser endgültigen Anordnung durchgeführten Fallversuche sind in Bild 7-12 dargestellt. Der Maximaldruck  $p_{max}$  ist über der Auftreffgeschwindigkeit  $V_0$  doppelt logarithmisch aufgetragen. Durch die Meßpunkte ist jeweils eine mittlere Gerade mit der Steigung 'zwei' gezeichnet. Der damit vorausgesetzten quadratischen Abhängigkeit des Maximaldrucks

von der Auftreffgeschwindigkeit scheinen die Meßpunkte mindestens nicht signifikant zu widersprechen. Bei den Meßstellen 0,80 L und 0,85 L ist als Vergleich die von Ochi und Schwartz [7] für den Kiel eines zylindrischen Modells der Mariner-Spantform an der Stelle 0,825 L angegebene Gerade mit eingetragen. Obwohl dort ein Modell im Maßstab 1:20 verwendet wurde, zeigt sich leidliche Übereinstimmung mit den hier am viermal kleineren Schiffsmodell gemessenen Drücken. Es scheint sogar so, als ob die Potenz 1,705 des Geschwindigkeitsgesetzes, das Ochi und Schwartz aus ihren Messungen abgeleitet haben, etwas besser zu den Druckmeßpunkten des reinen Fallversuchs mit dem Schiffsmodell passen würde, als das hier grundsätzlich vorausgesetzte quadratische Geschwindigkeitsgesetz.

## 5. Drehfallversuch in glattem Wasser

### 5.1. Aufbau

Der Aufbau der Meß- und Registriereinrichtung entspricht beim Drehfallversuch genau dem Aufbau beim translatorischen Fallversuch. Der Versuch findet aber in dem 2 m breiten Schlepptank statt, und an die Stelle der Parallelführung tritt eine Lagerung des Modells auf einer festen Querachse an Deck 0,2 L vor dem hinteren Lot. Die Wahl dieser Achse stellt einen Kompromiß dar zwischen einer realistischen Stampfachse in der Nähe der halben Schiffslänge und einer so weit hinten liegenden Achse, daß das Modell in der Ausgangsstellung hinter der Achse nicht wesentlich tiefer eintaucht und, vor allem beim späteren Versuch in Wellen, die Wasseroberfläche möglichst wenig stört.

Tiefgang und Anfangsneigung lassen sich über zwei Spindeln einstellen; die hintere ist mit der Drehachse verbunden, die vordere mit einem Elektromagneten, der auf das Auslösesignal hin einen Winkelhebel aus einer verstellbaren Klaue am Modell zieht. Das fallende Modell löst wieder kurz vor dem Auftreffen der Meßstellen über den Mikroschalter den Startimpuls für den Oszillographen aus. Die Wegaufzeichnung geschieht wieder über Zahnstange und Induktivgeber an der Stelle  $x = 0,65 L$ , so daß die Komponente der Fallgeschwindigkeit senkrecht zum Modellboden an der Stelle 0,65 L abgelesen werden kann (Bild 13).

### 5.2. Durchführung und Ergebnisse

Bei der Reihe der Drehfallversuche wurde der Tiefgang unter der Drehachse von 0 - 60 mm bzw. 100 mm variiert, wobei für die meisten Tiefgänge wieder zwei Ausgangsneigungen 5 und 10° untersucht wurden.

Bei diesem Versuch trifft der Modellboden je nach Tiefgang unter der Drehachse und Lage der Meßstelle die Wasseroberfläche unter einem bestimmten Winkel (schiefer Stoß).

Als Auftreffwinkel wird der Winkel zwischen Kiel und ungestörter Wasseroberfläche definiert, dessen Scheitel in der Meßstelle liegt.

Die Maximaldrücke  $p_{\max}$  dieser Versuchsreihe wurden zunächst wie beim reinen Fallversuch doppeltlogarithmisch über der Auftreffgeschwindigkeit  $v_0$  aufgetragen (Bild 14-19). Innerhalb der so entstandenen Punkthaufen sind die verschiedenen Auftreffwinkel\* durch verschiedene Punktarten unterschieden. Es ist zu erkennen, daß die zum gleichen Auftreffwinkel gehörenden Meßpunkte sich jeweils etwa parallel zu der als Vergleich eingezeichneten Mittellinie der reinen Fallversuche gruppieren. Die auch hier bestätigte quadratische Geschwindigkeitsabhängigkeit voraussetzend, wurde der Druckbeiwert  $p_{\max} / \left(\frac{\rho}{2} v_0^2\right)$  über dem Auftreffwinkel  $\alpha$  aufgetragen (Bild 20-25).

Trotz der zum Teil erheblichen Streuung der Meßwerte ist deutlich ein Abklingen der Druckbeiwerte bei größeren Eintauchwinkeln zu erkennen. An den vorderen beiden Meßstellen liegen die maximalen Beiwerte im Bereich  $0 \leq \alpha \leq 0,03$  in der Größenordnung 100 ohne eindeutig erkennbares Maximum. An den dahinterliegenden Meßstellen liegt das Maximum überraschenderweise nicht etwa bei  $\alpha = 0$  sondern um  $\alpha = 0,02$  in der Größenordnung 300 - 600, während bei  $\alpha = 0$  oder  $\alpha = 0,01$  ein Minimum bei Beiwerten von 100 - 200 in der Größenordnung des mit eingezeichneten Mittelwertes des reinen (translatorischen) Fallversuchs zu erkennen ist. Dieses zunächst überraschende Ergebnis im flachbodigen Bereich ist vermutlich auch auf die Wirkung des Luftpolsters zurückzuführen, das etwa bei einem Auftreffwinkel von 0,03 unwirksam wird, weil die Luft schnell genug nach vorn entweichen kann.

\* bzw. Tiefgang unter Drehachse

## 6. Drehfallversuch in regelmäßigen, entgegenlaufenden Wellen

### 6.1. Aufbau

Der mechanische Aufbau des Drehfallversuchs bleibt unverändert. Das Modell fällt aber in eine regelmäßige entgegenlaufende Welle. Gemessen wird wieder der Maximaldruck  $p_{\max}$  beim Auftreffen. Die Auftreffgeschwindigkeit ist nun die Relativgeschwindigkeit zwischen Modell und Wellenoberfläche im Augenblick des Auftreffens  $v_{\text{Rel}}$ . Der Auftreffwinkel ist der Relativwinkel  $\alpha_{\text{Rel}}$  zwischen Kiel und Tangente an die Wellenkontur im Auftreffpunkt der Meßstelle.

Die Relativgeschwindigkeit und besonders der Relativwinkel sind aber direkt nur sehr schwer zu messen. Stattdessen wurde die Phasenlage  $\varphi$  der Welle an der Meßstelle im Augenblick ihres Auftreffens ermittelt und daraus mit gemessener Höhe und Länge der ungestörten Welle sowie Fallgeschwindigkeit und Tiefgang des Modells für die jeweilige Meßstelle eine nominelle Relativgeschwindigkeit  $v_{\text{Rel}}$  und ein nomineller Relativwinkel  $\alpha_{\text{Rel}}$  abgeleitet. Zur Kontrolle der Phasenlage der Welle wurde der Auslösemagnet durch eine Lichtschranke gesteuert, die in der Höhe der ungestörten Wasseroberfläche quer über dem Schlepptank liegt (Bild 26).

Die Lichtschranke wird in einem Wellental manuell aktiviert. Von diesem Zeitpunkt läuft der Versuch automatisch ab. Die nächste vordere Wellenflanke löst durch Schließen der Lichtschranke einen Impuls aus, der über den Magneten das Modell zum Fallen freigibt und gleichzeitig einen elektronischen Zähler zur Messung einer Zeit  $t_1$  startet. Das fallende Modell löst kurz vor dem Auftreffen über den Mikroschalter einen zweiten Impuls aus, der den Zähler nach der Zeit  $t_1$  stoppt und gleichzeitig den einmaligen Strahldurchlauf des Oszillographen startet. Das Schirmbild des Oszillographen wird wieder fotografiert, und die ablesbare Laufzeit des Strahls bis zur Registrierung der Druckspitze  $t_2$  ergibt zusammen mit der vom Zähler angezeigten Zeit  $t_1$  die Laufzeit  $t = t_1 + t_2$  der Welle von der definierten Phasenlage beim Schließen der Lichtschranke bis zum Auftreffen der Meßstelle.

## 6.2. Durchführung und Ergebnisse

Die Drehfallversuche in Wellen wurden nur mit einer Welle von 1,5 m Länge und einer Höhe von 7,5 cm durchgeführt. Die Wellenlänge 2 m entsprechend  $L_{pp}$  des Modells war ungeeignet, weil die Breite des Schlepptanks im IfS ebenfalls etwa 2 m beträgt. Dadurch wurden sehr schnell durch Streuung der einfallenden Wellen stehende Querwellen angeregt, die den Versuch in der beabsichtigten Form undurchführbar machen.

Im Laufe der Versuche wurde die Phasenlage dadurch verändert, daß die Fallvorrichtung mit dem Modell gegenüber der Lichtschranke stufenweise verschoben wurde.

Vor Beginn jedes Versuchs wurde zunächst der Wellenerzeuger in Tätigkeit gesetzt. Nachdem etwa 10 - 15 Wellenperioden das Modell passiert hatten, wurde der Versuch eingeleitet unter der Annahme, daß dann die Einschaltstörungen am Versuchsort abgeklungen waren. Nach Beendigung des Versuchs wurde der Wellenerzeuger sofort abgeschaltet. Unter Einhaltung einer Wartezeit zur Beruhigung der Wasseroberfläche konnte so alle 15 Minuten ein Versuch durchgeführt werden.

Die aus den Messungen beim Dreh-Fall-Versuch in Wellen mit der nominellen Relativgeschwindigkeit  $v_{Rel}$  gebildeten Druckbeiwerte  $p_{max} / (\frac{\rho}{2} v_{REL}^2)$  sind zusammen mit dem nominellen Relativwinkel über dem Phasenwinkel der Welle an der Meßstelle im Augenblick ihres Auftreffens aufgetragen (Bild 27-32). Die Meßpunkte streuen zwar stark, da die Wellen doch nicht ganz regelmäßig und schon durch das Modell gestört waren; trotzdem ist deutlich zu erkennen, daß die höchsten Druckbeiwerte dann auftraten, wenn der Relativwinkel beim Auftreffen klein ist. Dabei ist kein Unterschied festzustellen, ob der Relativwinkel im Wellental oder auf dem Wellenberg klein wird. Das Abfallen der Maximaldrücke von einem kritischen kleinen Relativwinkel bis zum Winkel null (wie beim Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser) ist hier nicht zu erkennen.

Wegen der Unregelmäßigkeiten der Welle wirkt sich dieser Effekt hier nur in Form einer besonders großen Streuung der Meßpunkte im Bereich kleiner Relativwinkel aus.

An den vorderen Meßstellen liegen diese höchsten Werte aber noch weit unter dem miteingezeichneten Mittelwert der reinen Fallversuche.

An den hinteren beiden Meßstellen mit breitem, flachem Boden liegen die maximalen Druckbeiwerte dagegen zum Teil weit über dem Mittelwert aus den Fallversuchen. Diese Erscheinung deutet wohl wie beim Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser darauf hin, daß der dämpfende Effekt des Luftpolsters in einem gewissen Bereich kleiner Eintauchwinkel unwirksam wird, so daß dann die größten Druckbeiwerte auftreten.

## 7. Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die gemessenen Maximaldrücke  $p_{\max}$  aus allen drei Versuchsarten sind für jede Meßstelle in Bild 33-38 in doppelt-logarithmischer Auftragung über der Auftreffgeschwindigkeit  $v_0$  bzw.  $v_{\text{Rel}}$  gegenübergestellt.

An den vorderen Meßstellen ist deutlich eine Abstufung der gemessenen Maximaldrücke mit abnehmender Tendenz vom reinen Fallversuch über den Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser zum Dreh-Fall-Versuch in Wellen zu erkennen. Dabei erreichen die höchsten Werte aus dem Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser bei ungünstigsten Eintauchwinkeln das Niveau des reinen Fallversuchs.

An den hinteren, flachbodigen Meßstellen ist die Abstufung kaum mehr zu erkennen. Die höchsten Werte aus beiden Dreh-Fall-Versuchen liegen weit über denen aus dem translatorischen Fallversuch mit ebenem Kiel in glattes Wasser.

Für die Meßstelle bei  $X = 0,9 L$  ist in Bild 38 auch die Gerade aus den Seegangsversuchen von Ochi [4,5] mit dem doppelt so großen Mariner-Modell zusammen mit den Meßpunkten für die gleiche Meßstelle eingetragen. Diese Werte von Ochi liegen im Bereich der kleineren hier beim Dreh-Fall-Versuch in Wellen gemessenen Werte, was darauf hindeuten könnte, daß der dämpfende Effekt des "Luftpolsters" mit wachsender Modellgröße zunimmt, oder daß die ungünstigsten Auftreffwinkel beim echten Seegangsversuch an dieser Meßstelle kaum vorkommen. Das könnte man auch nach Bild 32 vermuten, wo in die Darstellung der Druckbeiwerte aus dem Dreh-Fall-Versuch in Wellen über dem Phasenwinkel der mittlere Beiwert nach Ochi mit eingetragen ist.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus allen drei Versuchen und von allen sechs Meßstellen wurde in Bild 39 mit Hilfe von Klassierungen der Druckbeiwerte versucht. Beim reinen Fallversuch ist am besten ein Maximum bei  $X = 0,75$  zu erkennen.

Bei beiden Dreh-Fall-Versuchsarten ist das Maximum wegen der größeren Streuung zwar weniger deutlich, aber doch im Bereich

zwischen  $X = 0,7$  und  $0,8 L$  zu lokalisieren. Die größere Streuung ist zu einem wesentlichen Teil schon durch die in dieser Auftragung nicht berücksichtigte weitere Variable 'Auftreffwinkel' bedingt. Das Auftreten eines Maximums beim Druckbeiwert über der Lage der Meßstelle am Schiff ist überraschend.

Wenn dafür nicht die lokalen elastischen Eigenschaften des Modells verantwortlich sind, wofür die äußere Struktur der Konstruktion keinen Anhalt bietet, so könnte das ein Hinweis darauf sein, daß der dämpfende Effekt des Luftpolsters bei einer kritischen Breite des flachen Bodens unwirksam wird, ähnlich wie bei einem kritischen Auftreffwinkel.

## 8. Feststellungen

Die Ergebnisse vergleichender Versuchsreihen von translatorischen Fallversuchen und Dreh-Fall-Versuchen in Glattwasser und Dreh-Fall-Versuchen in regelmäßigen Wellen mit Druckmessungen am Kiel des gleichen "Mariner"-Modells lassen folgende Feststellungen zu:

1. Die Annahme einer quadratischen Abhängigkeit des Maximaldrucks beim Stoß  $p_{\max}$  von der Auftreffgeschwindigkeit  $v_0$  bzw.  $v_{\text{rel}}$  scheint bei allen drei Versuchsarten sinnvoll zu sein.
2. Die Steifigkeit des Modellbodens im flachen Bereich ist von erheblichem Einfluß auf Druckverlauf und Höhe der Druckspitzen.
3. Beim Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser treten die größten Druckbeiwerte im flachbodigen Bereich  $p_{\max}/(\frac{\rho}{2} v_0^2)$  nicht bei verschwindendem Auftreffwinkel  $\alpha$  sondern etwa bei  $\alpha = 0,02$  auf. Diese größten Druckbeiwerte liegen weit über denen aus dem translatorischen Fallversuch mit verschwindendem Auftreffwinkel.
4. Der Dreh-Fall-Versuch in regelmäßigen Wellen zeigt deutlich die Abhängigkeit des Druckbeiwertes vom Auftreffwinkel. Allerdings ist wegen der Unregelmäßigkeit der Wellen nicht mehr zwischen einem kritischen und dem verschwindenden Auftreffwinkel zu unterscheiden.

Die Druckbeiwerte scheinen im Durchschnitt etwas niedriger zu liegen als beim Dreh-Fall-Versuch in Glattwasser, in seltenen Fällen werden diese etwa erreicht.

Die Druckbeiwerte aus dem Seegangversuch von Ochi [4,5] liegen im Bereich der kleinsten Werte aus dem Dreh-Fall-Versuch in Wellen.

5. Bei der Betrachtung des Verlaufs der Ergebnisse aller drei Versuchsarten über der Schiffslänge ist ein Maximum der Druckbeiwerte im Bereich  $\times = 0,7 - 0,8 L$  erkennbar, was vielleicht auf eine kritische Breite des flachen Bodens zurückzuführen sein könnte.

Literatur:

- [1] Meyerhoff, K.:  
Übersicht über grundlegende theoretische und  
experimentelle Arbeiten zum Problem der Boden-  
stöße bei Schiffen.  
Vortrag vor der Hauptversammlung der Schiffbau-  
technischen Gesellschaft, Hamburg 1967.
- [2] Bledsoe, M.D. und F.M. Schwartz:  
Experiments on rotational impact.  
DTMB Report 1145 (1961)
- [3] Todd, M.A.:  
Slamming due to pure pitching motion.  
DTMB Report 883 (1954)  
Deutsche Übersetzung von F.K. Rubbert: "Über  
die durch reine Stampfschwingungen hervorgeru-  
fenen hydrodynamischen Stöße".  
Schiffstechnik 2 (1954/55), p. 51 - 59
- [4] Ochi, M.K.:  
Prediction of occurrence and severity of ship  
slamming at sea.  
5th Symposium on Naval Hydrodynamics,  
Bergen 1964, p. 545 - 596
- [5] Ochi, M.K.:  
Extreme behaviour of a ship in rough seas -  
Slamming and shipping of green water.  
Trans. SNAME 72 (1964), p. 143 - 202

- [ 6 ]                   Diskussionsbemerkungen zum Vortrag:  
Übersicht über grundlegende theoretische und  
experimentelle Arbeiten zum Problem der Boden-  
stöße bei Schiffen.  
Schiff und Hafen 19 (1967), p. 880
- [ 7 ]                   Ochi, M.K. und Schwartz, F.M.:  
Two dimensional experiments on the effect of  
hull form on hydrodynamic impact.

Anhang 1: Bild Nr. 1 - 39



Mariner Modell

M 1:80

$L_{pp} = 2015 \text{ mm}$

$B = 289,5 \text{ mm}$

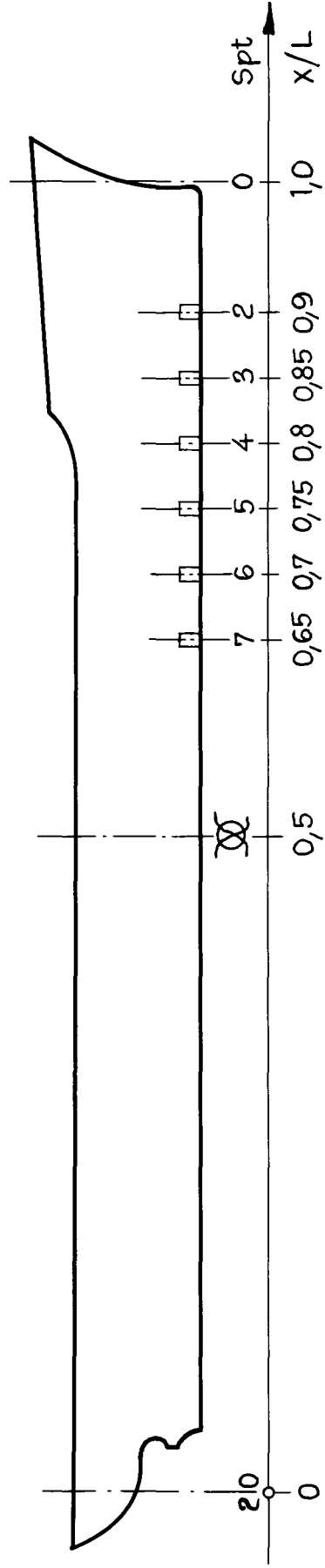


Bild 2: Lage der Druckmeßstellen im Modell

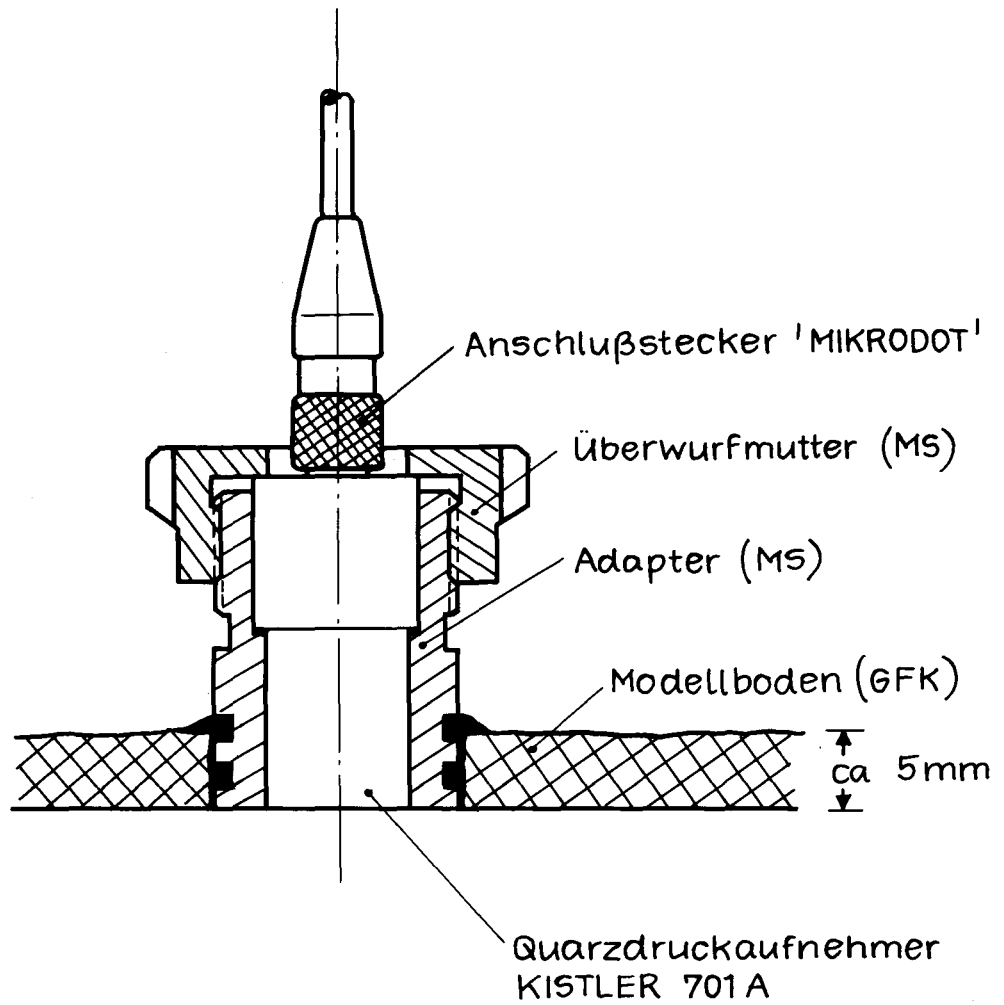


Bild 3: Einbau der Druckaufnehmer M 2:1

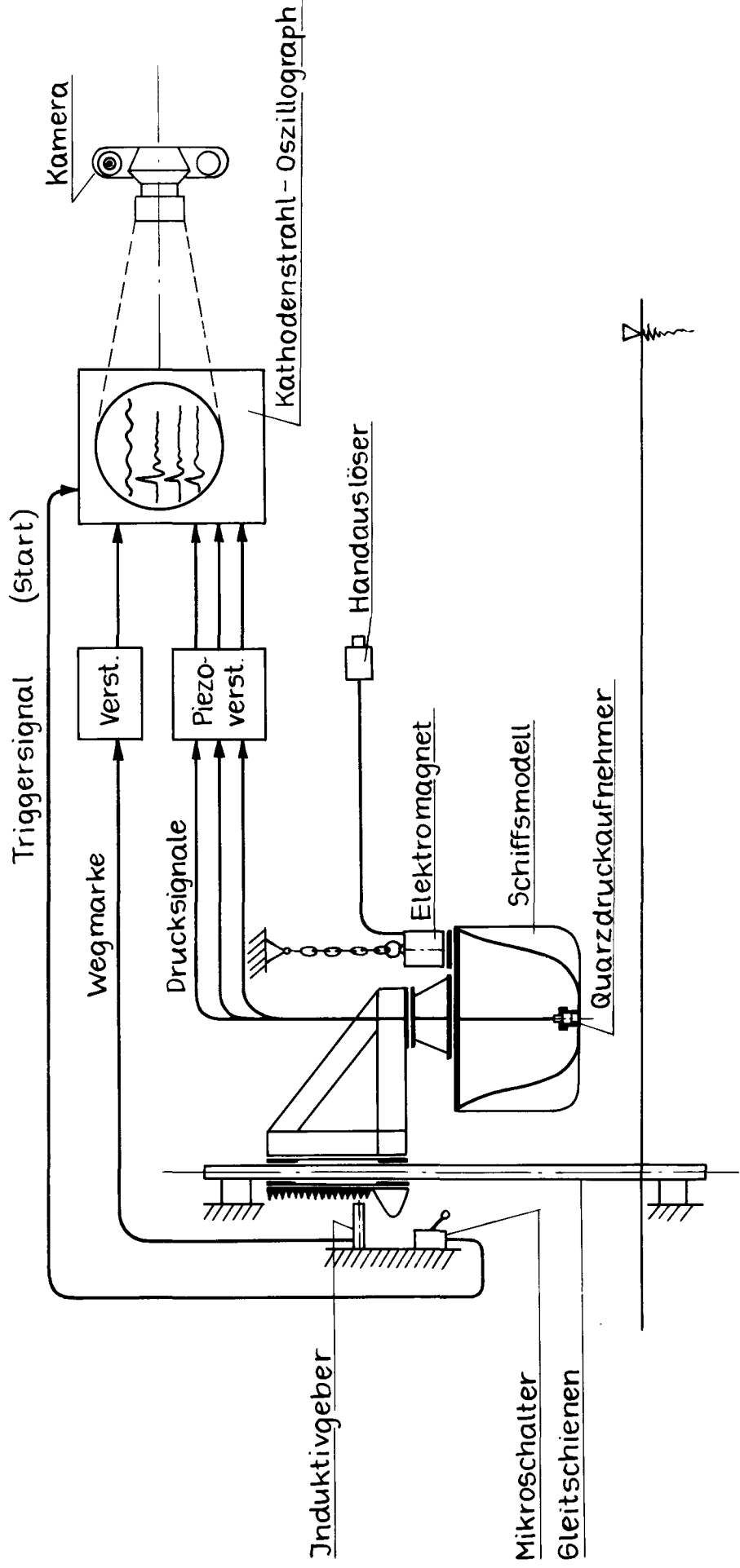
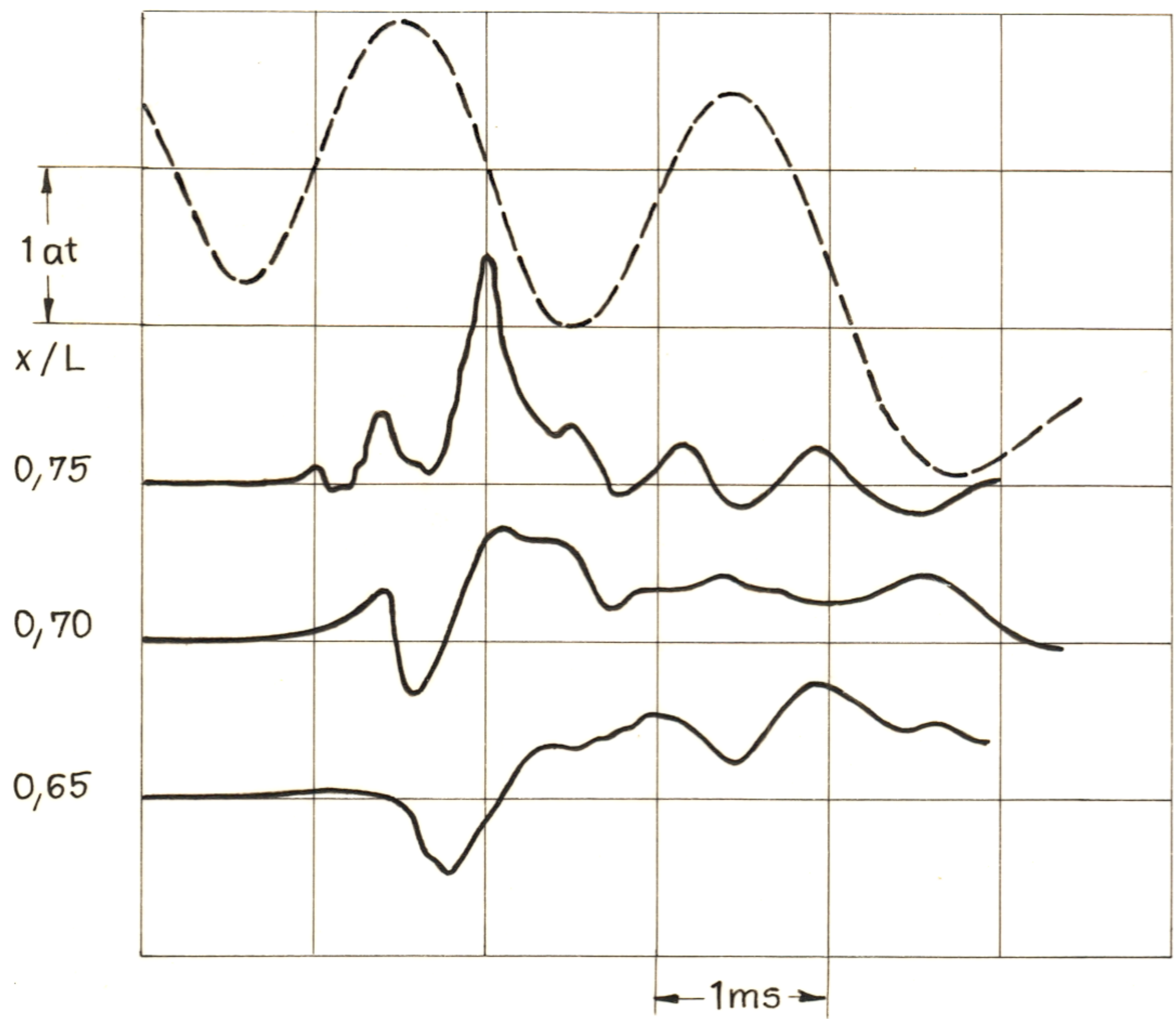


Bild 4: Schema der Einrichtung für den translatorischen Fallversuch

### Unversteiftes Modell



### Querversteiftes Modell

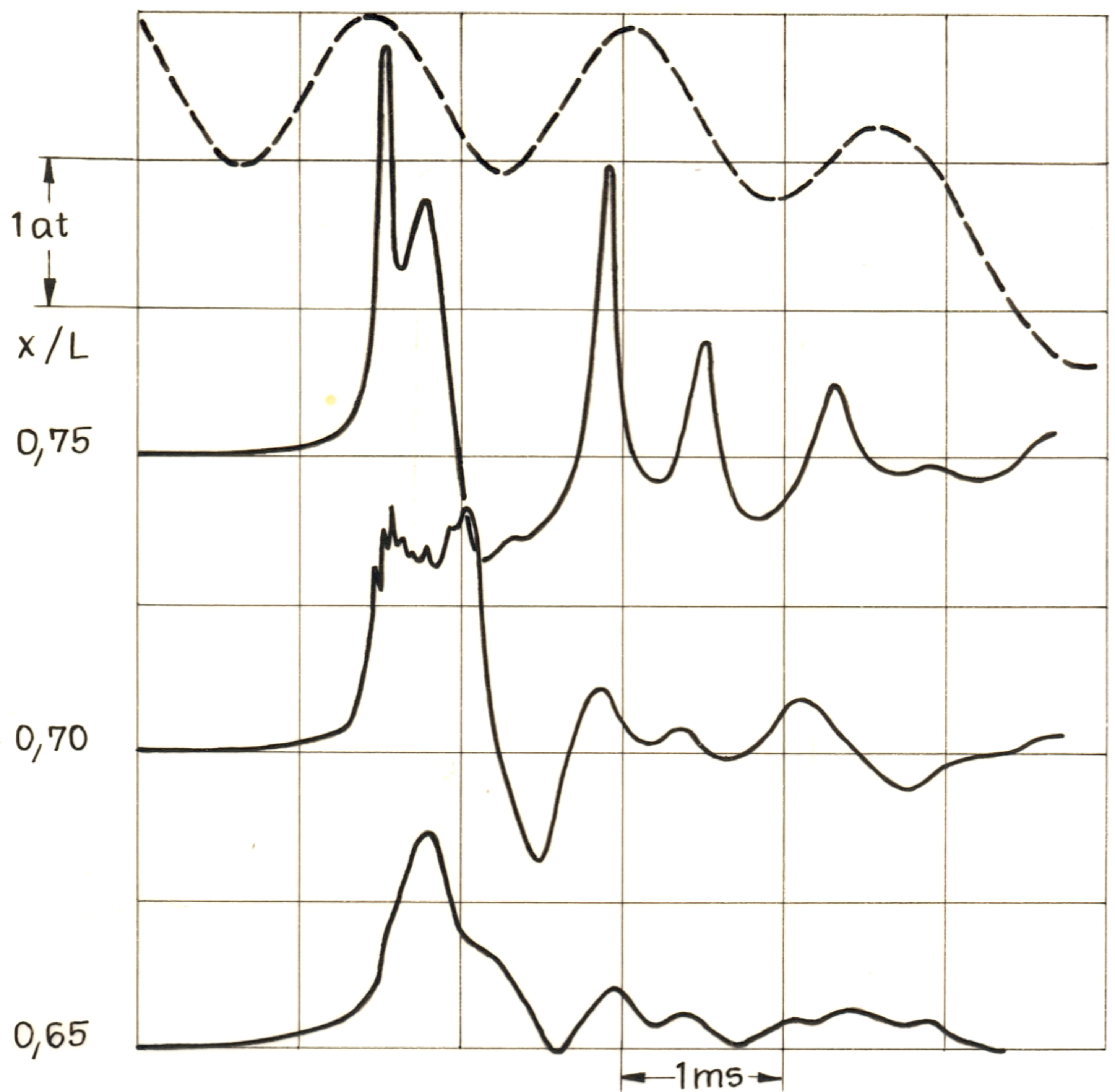
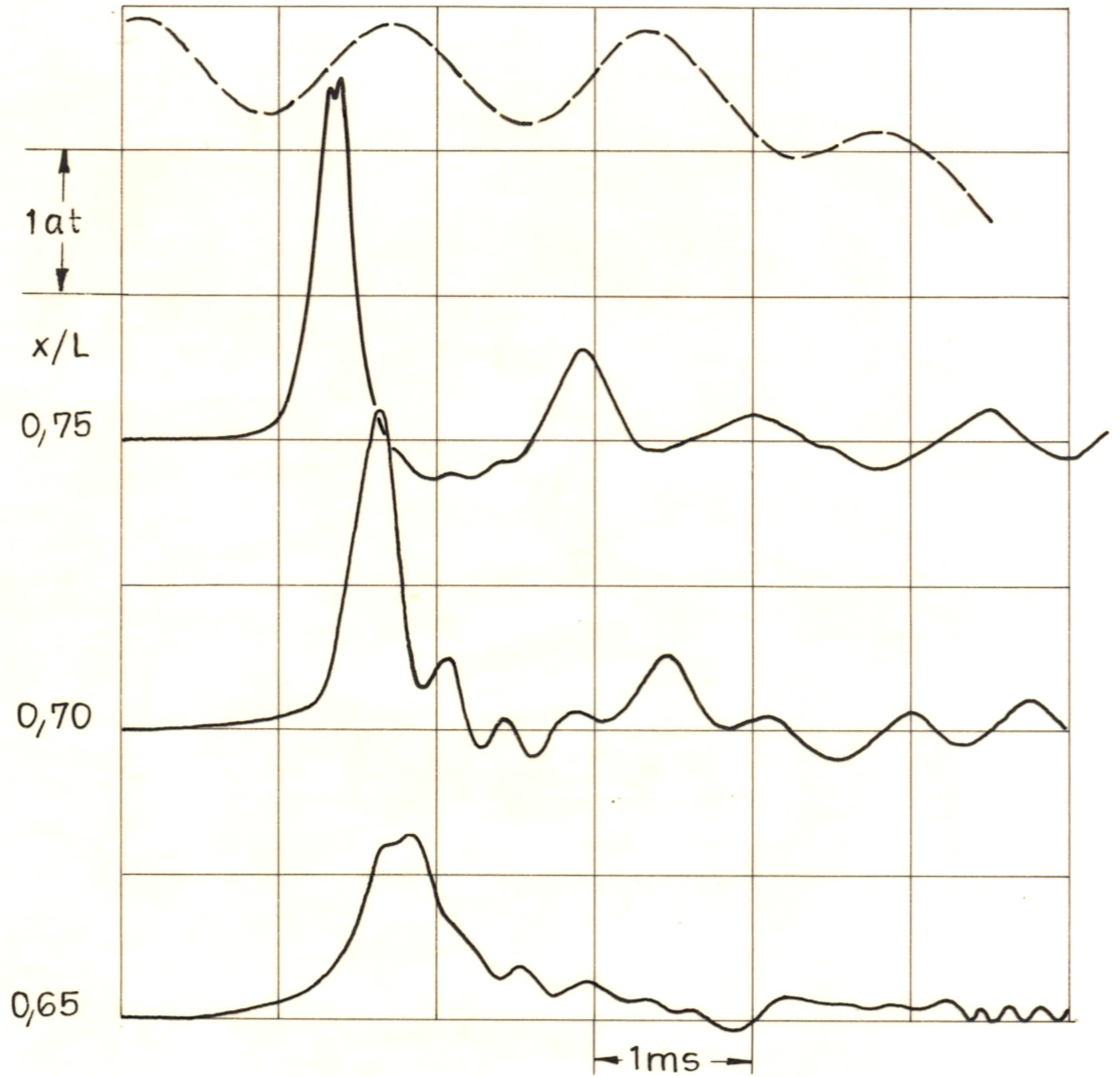


Bild 5: Gegenüberstellung der Drucksignale

### Unkompensierte Druckaufnehmer



### Beschleunigungskompensierte Druckaufnehmer

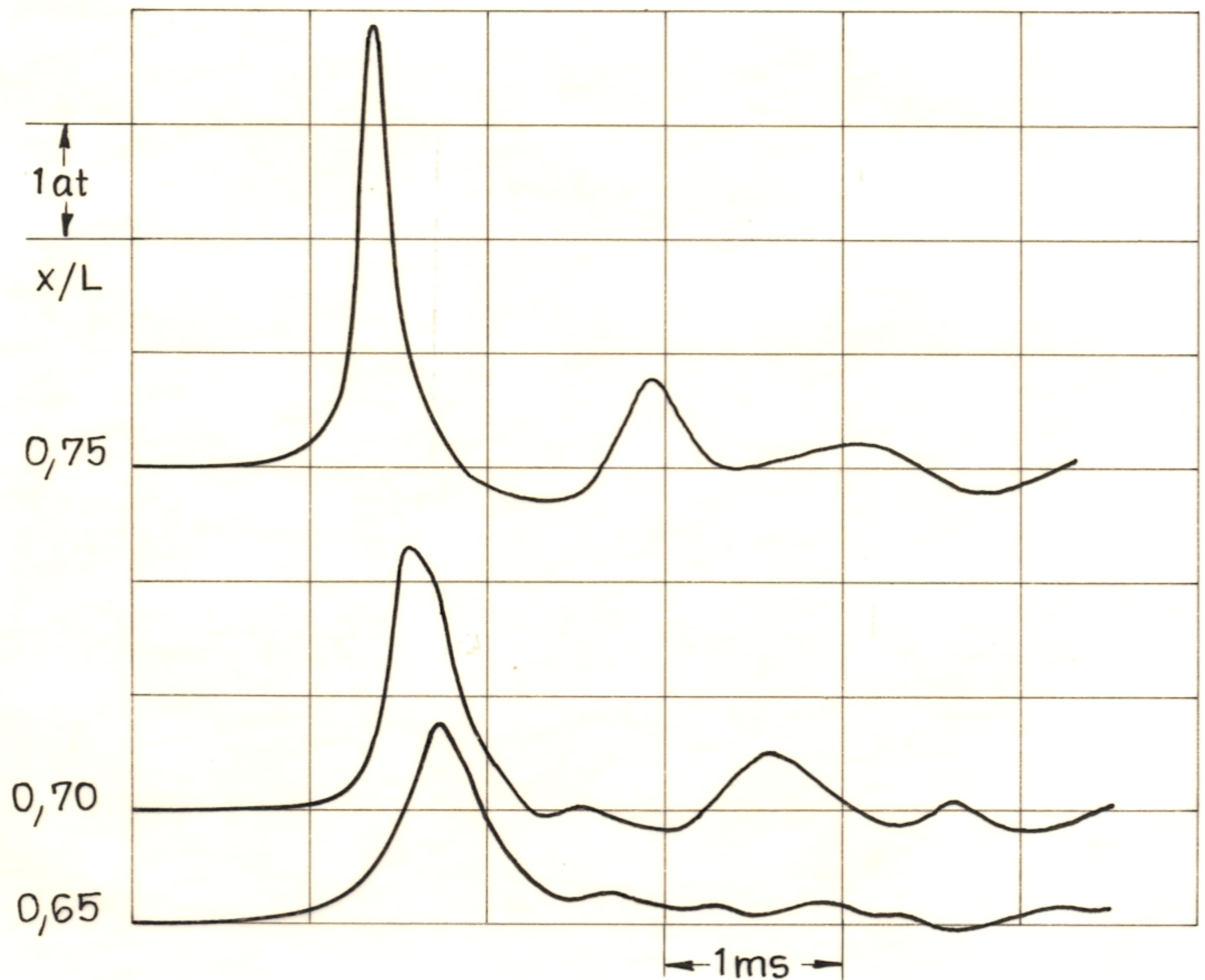


Bild 6: Gegenüberstellung der Drucksignale

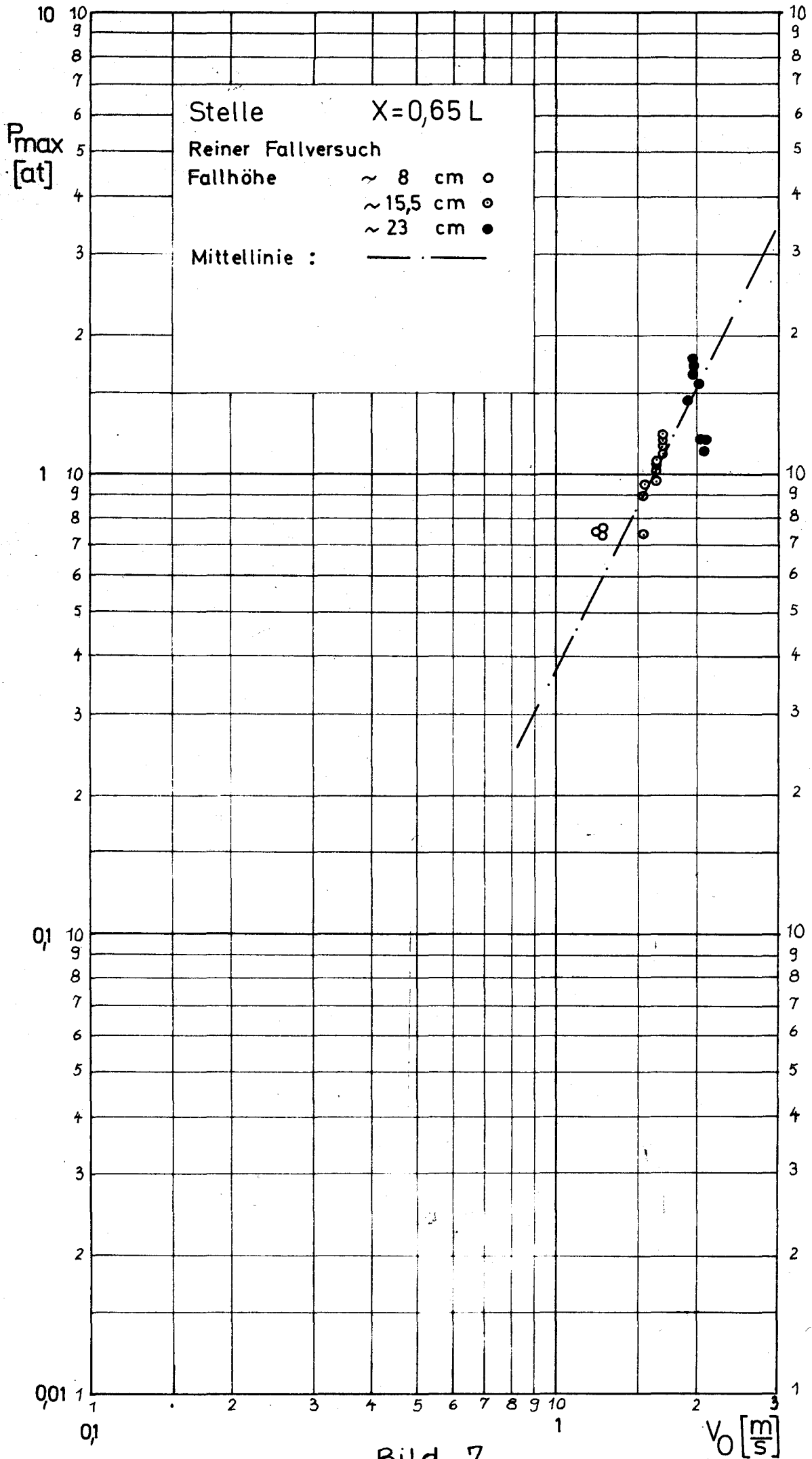


Bild 7

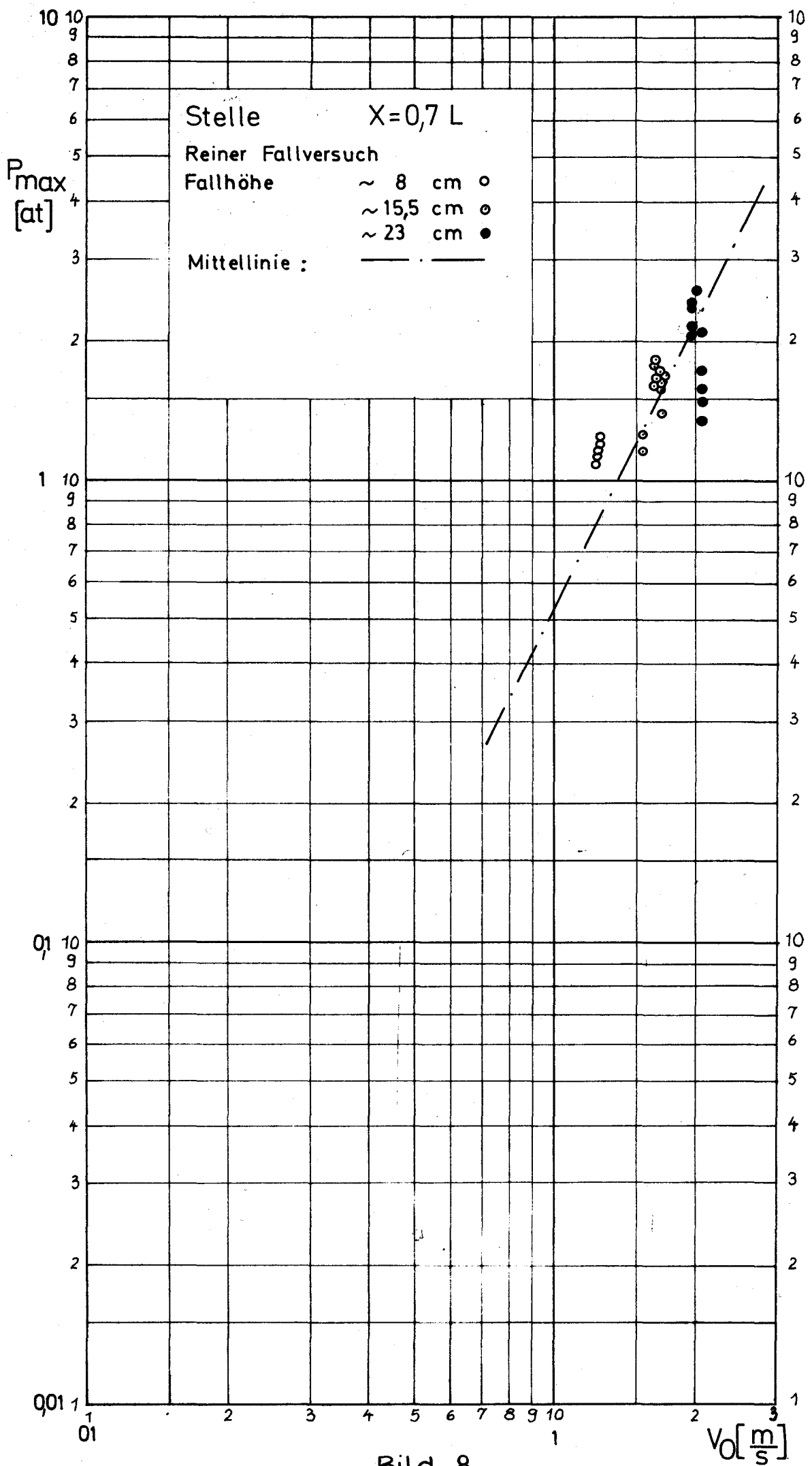


Bild 8

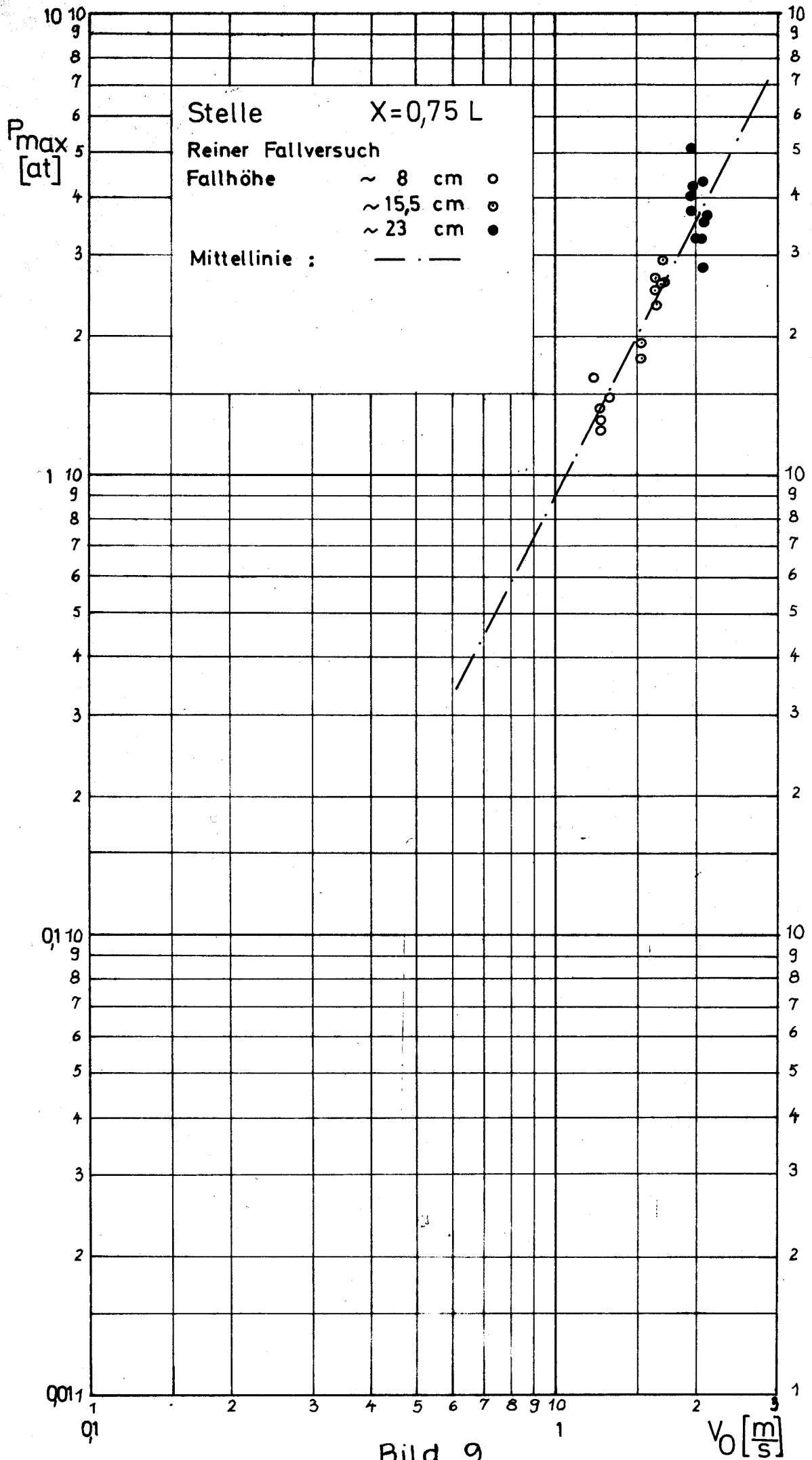


Bild 9

$V_0$  [m/s]

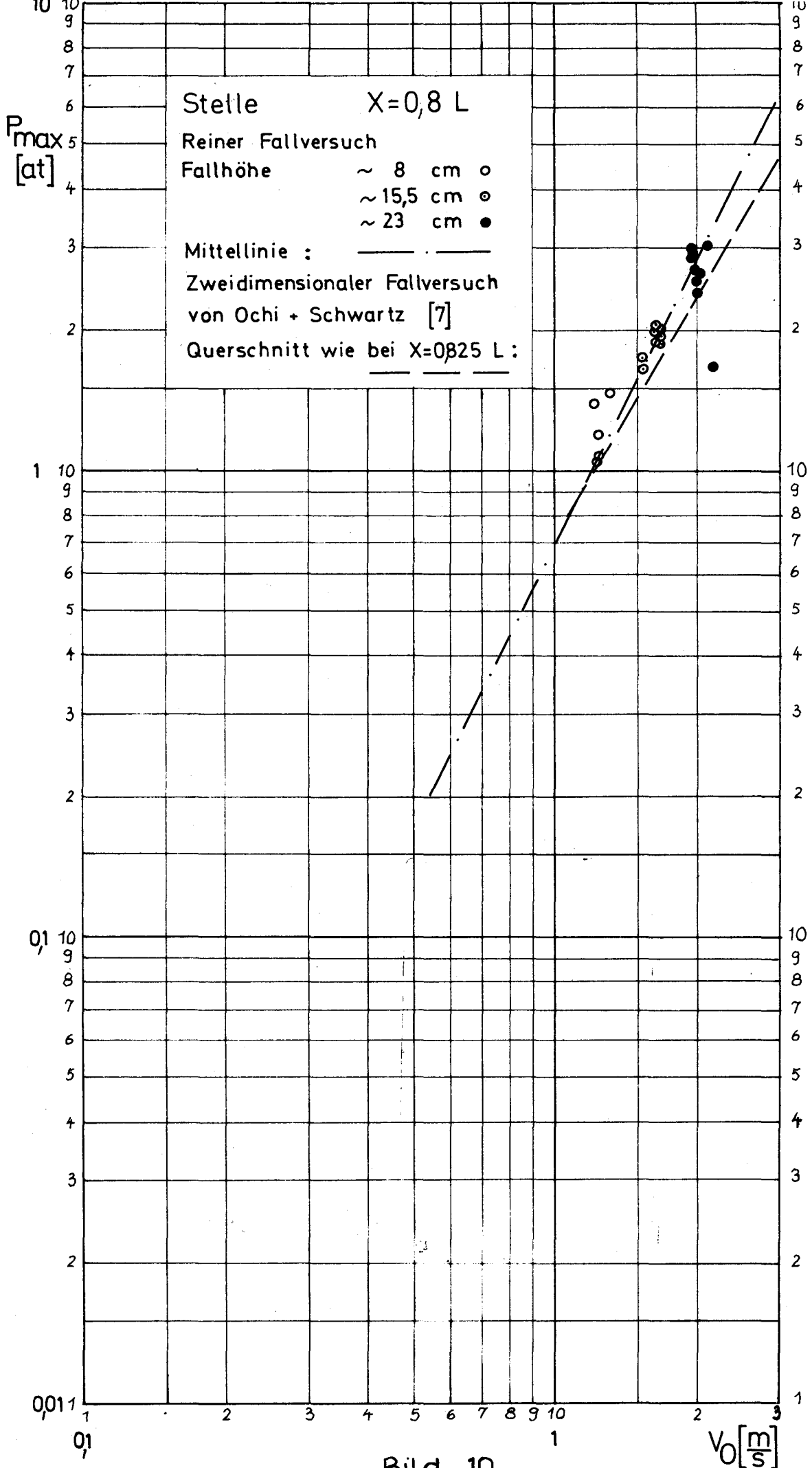


Bild 10

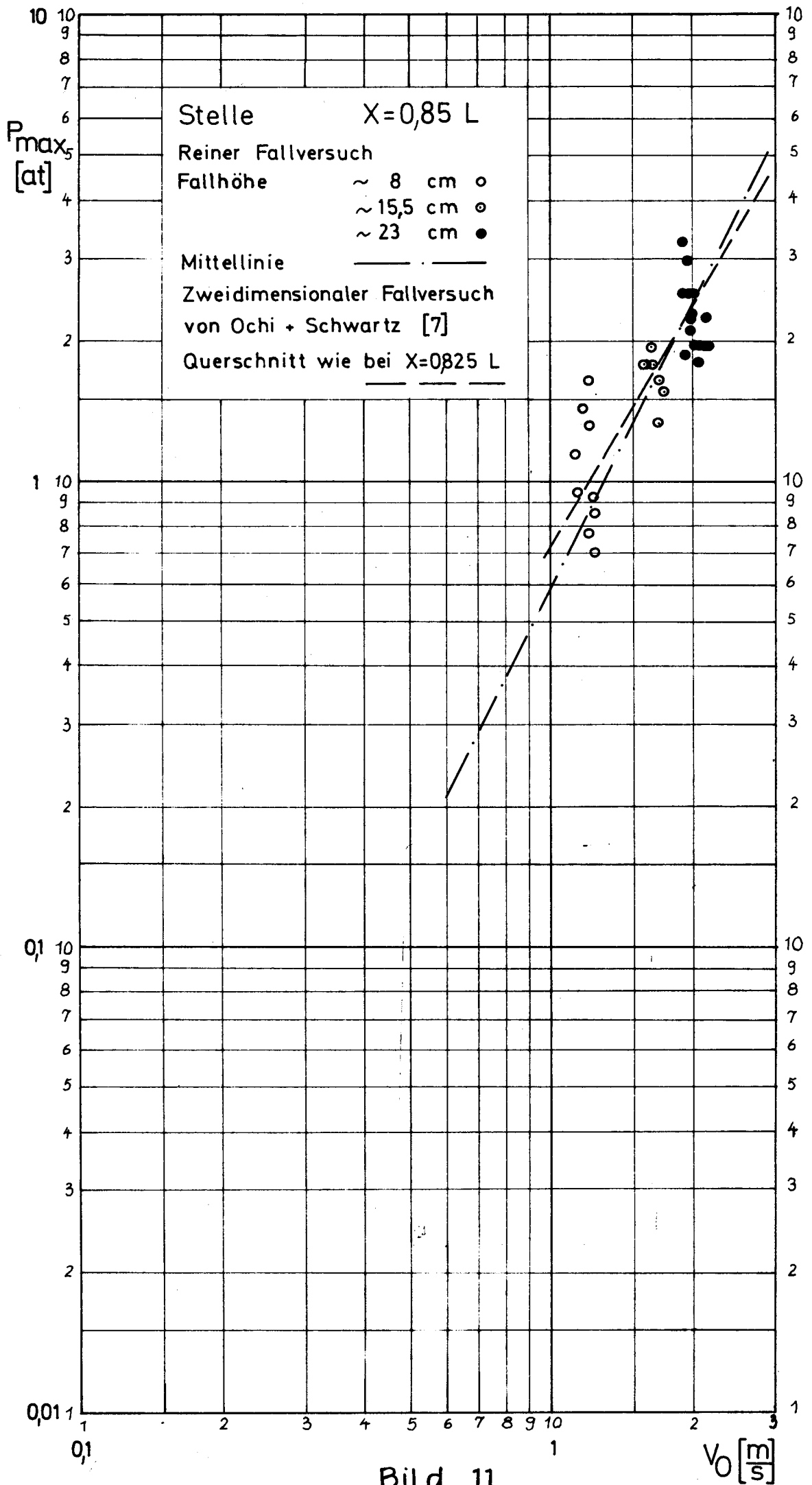
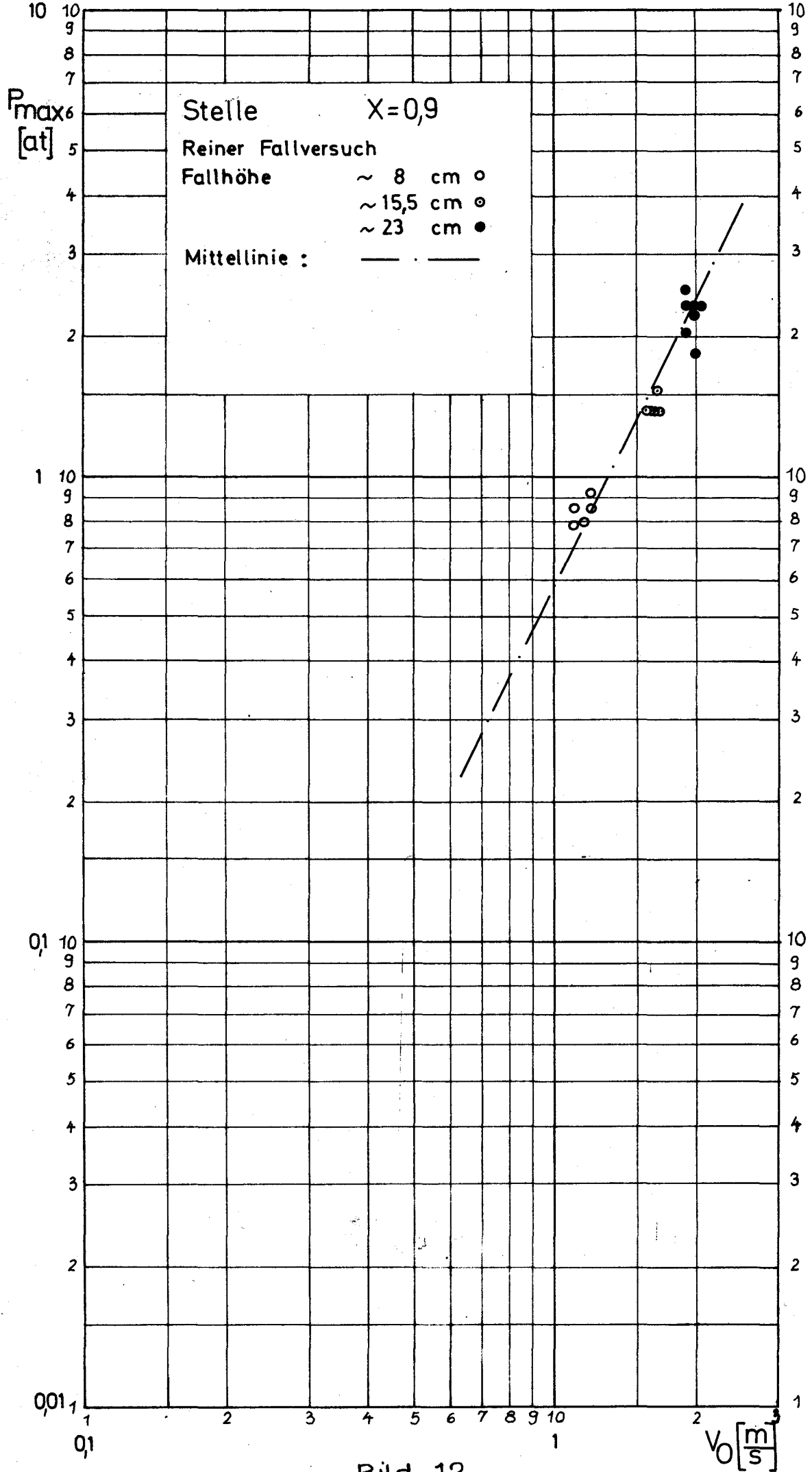


Bild 11

$v_0$  [m/s]



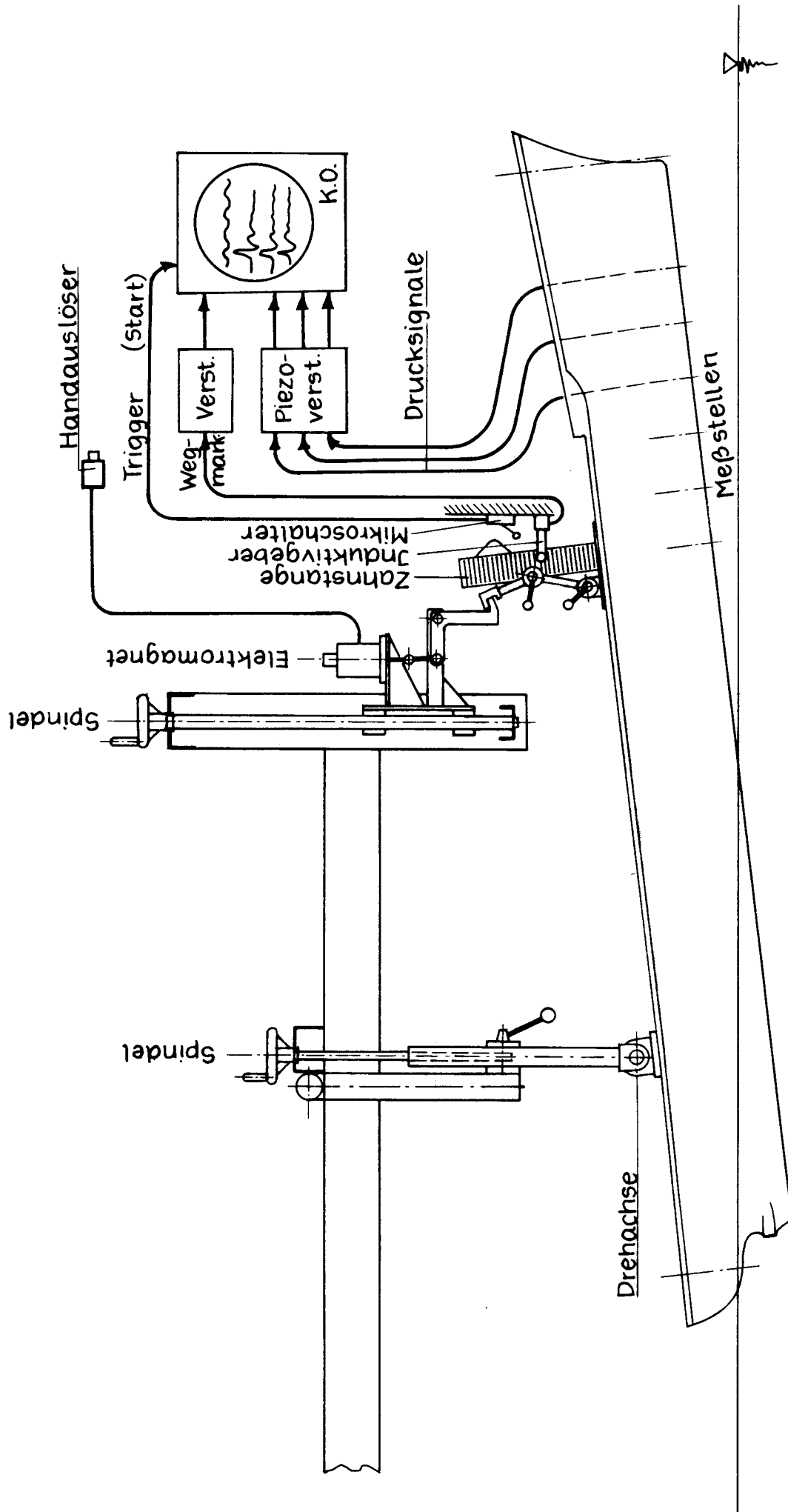


Bild 13 : Schema der Einrichtung für den Drehfallversuch in Glattwasser

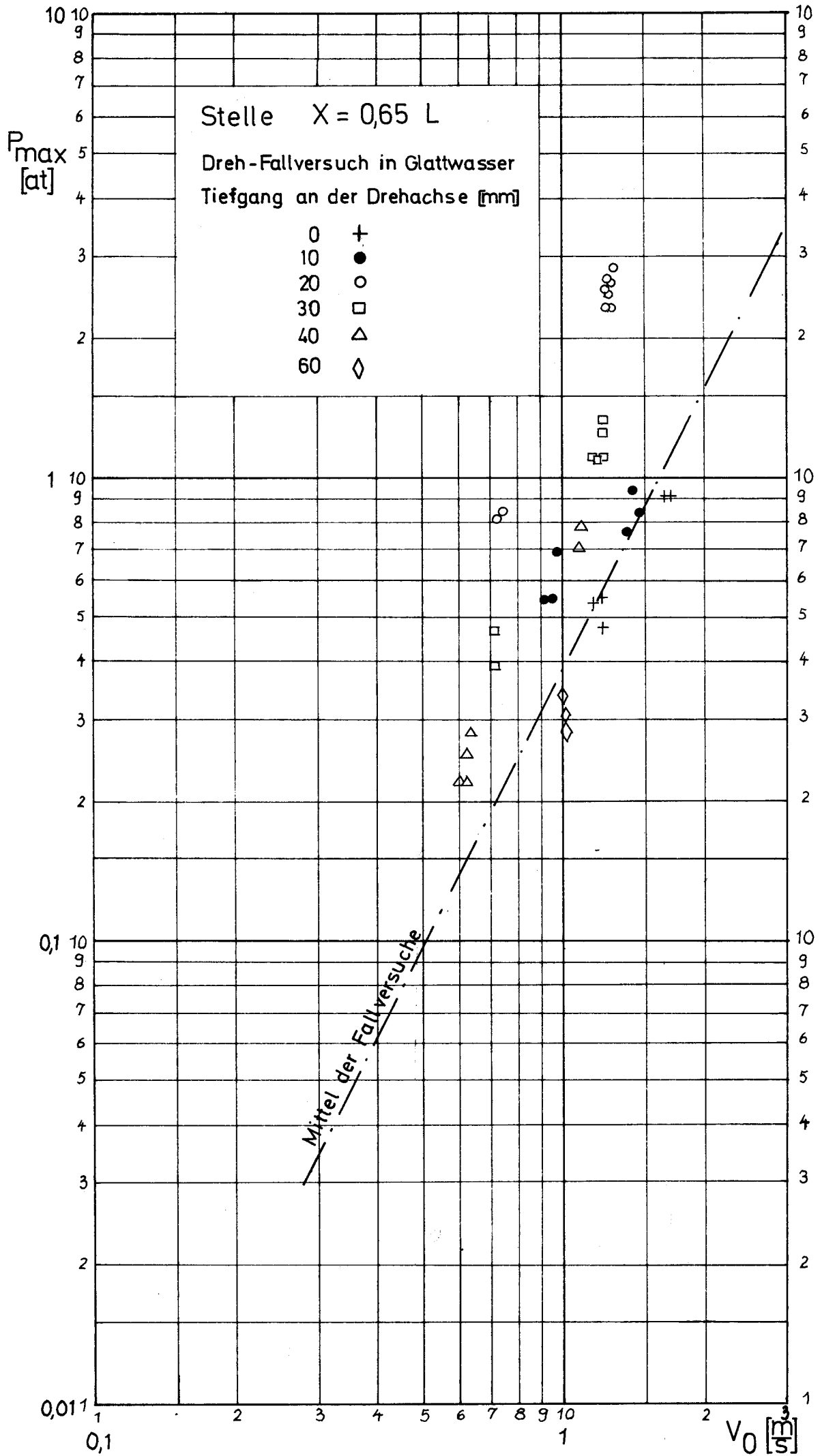


Bild 14

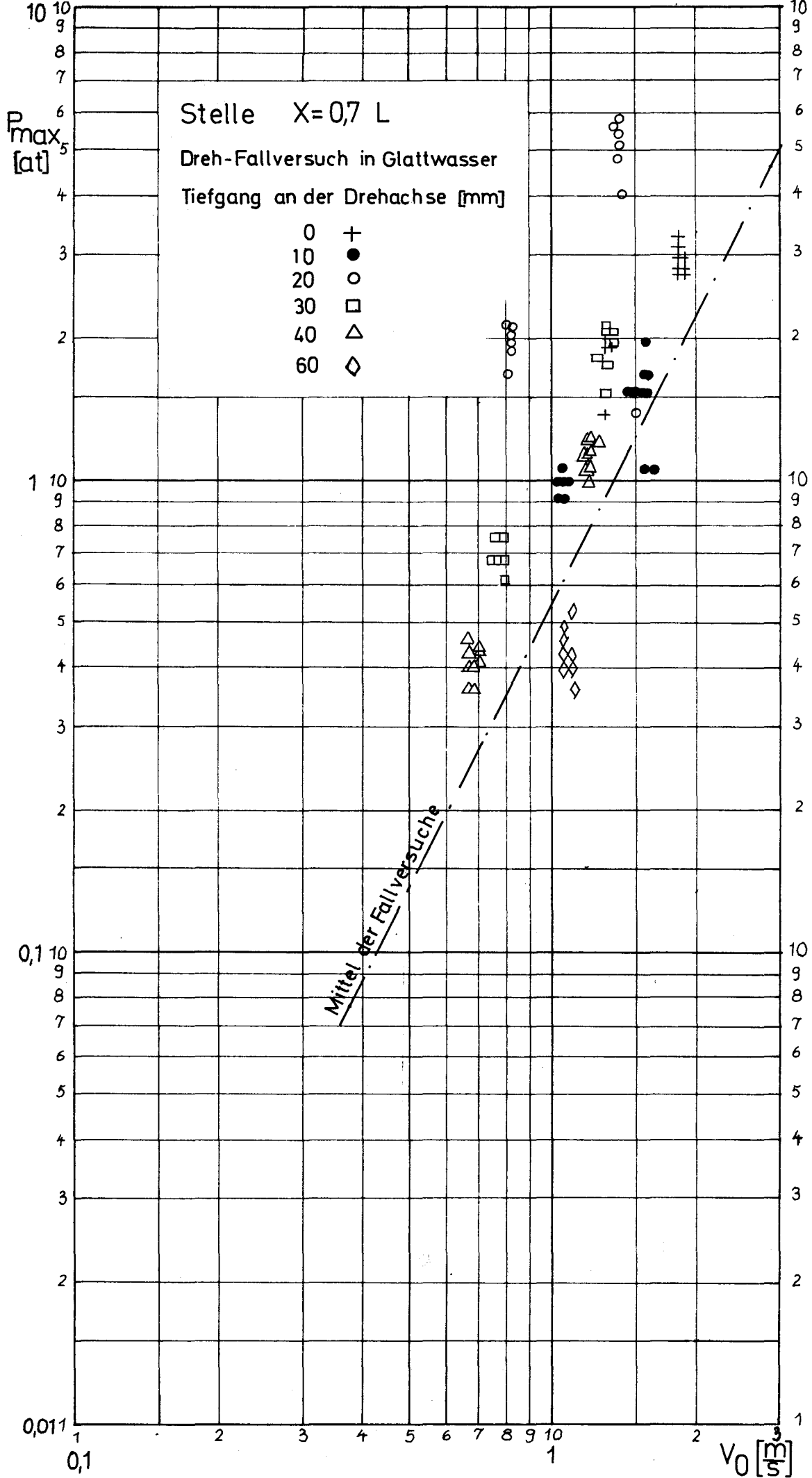


Bild 15

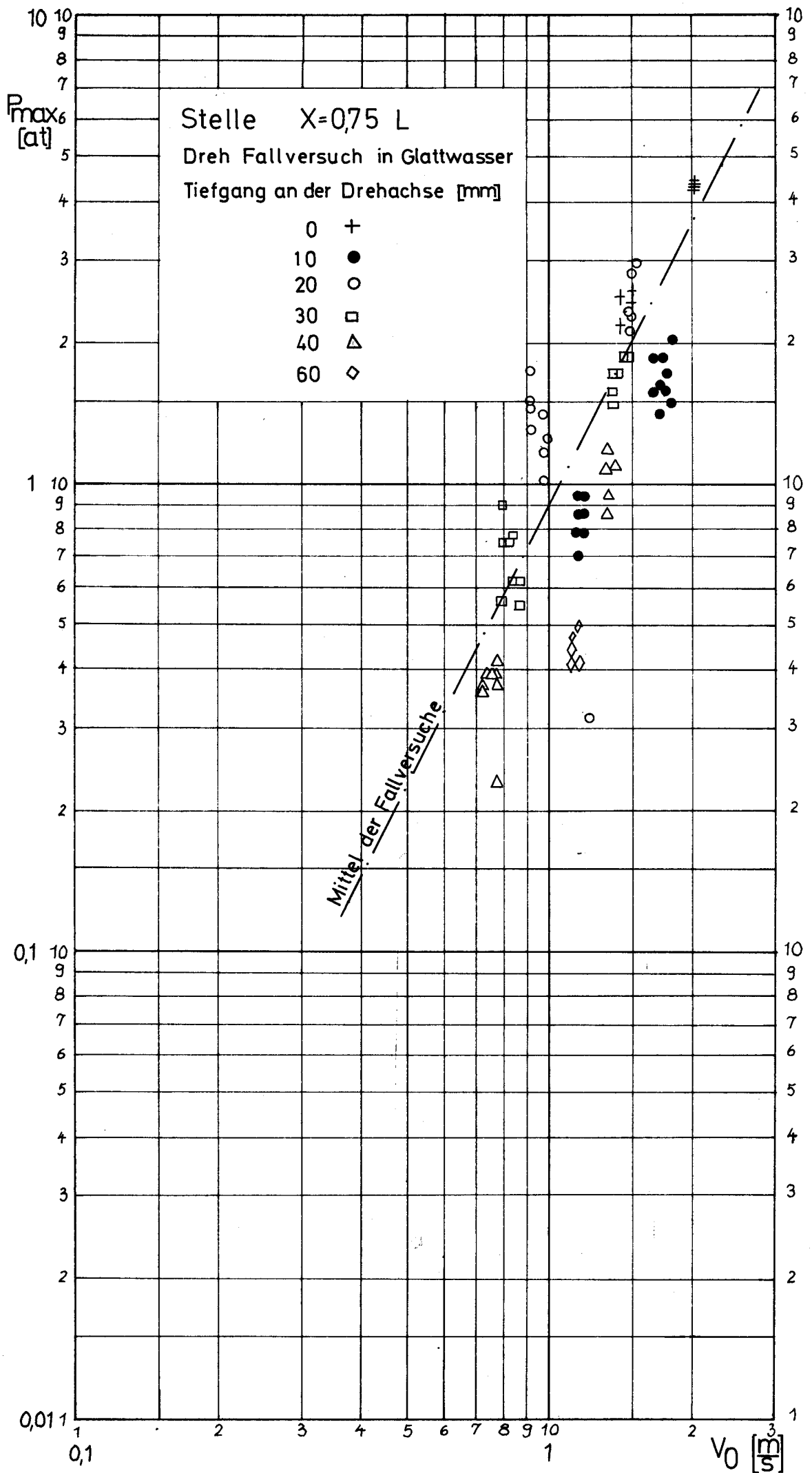


Bild 16

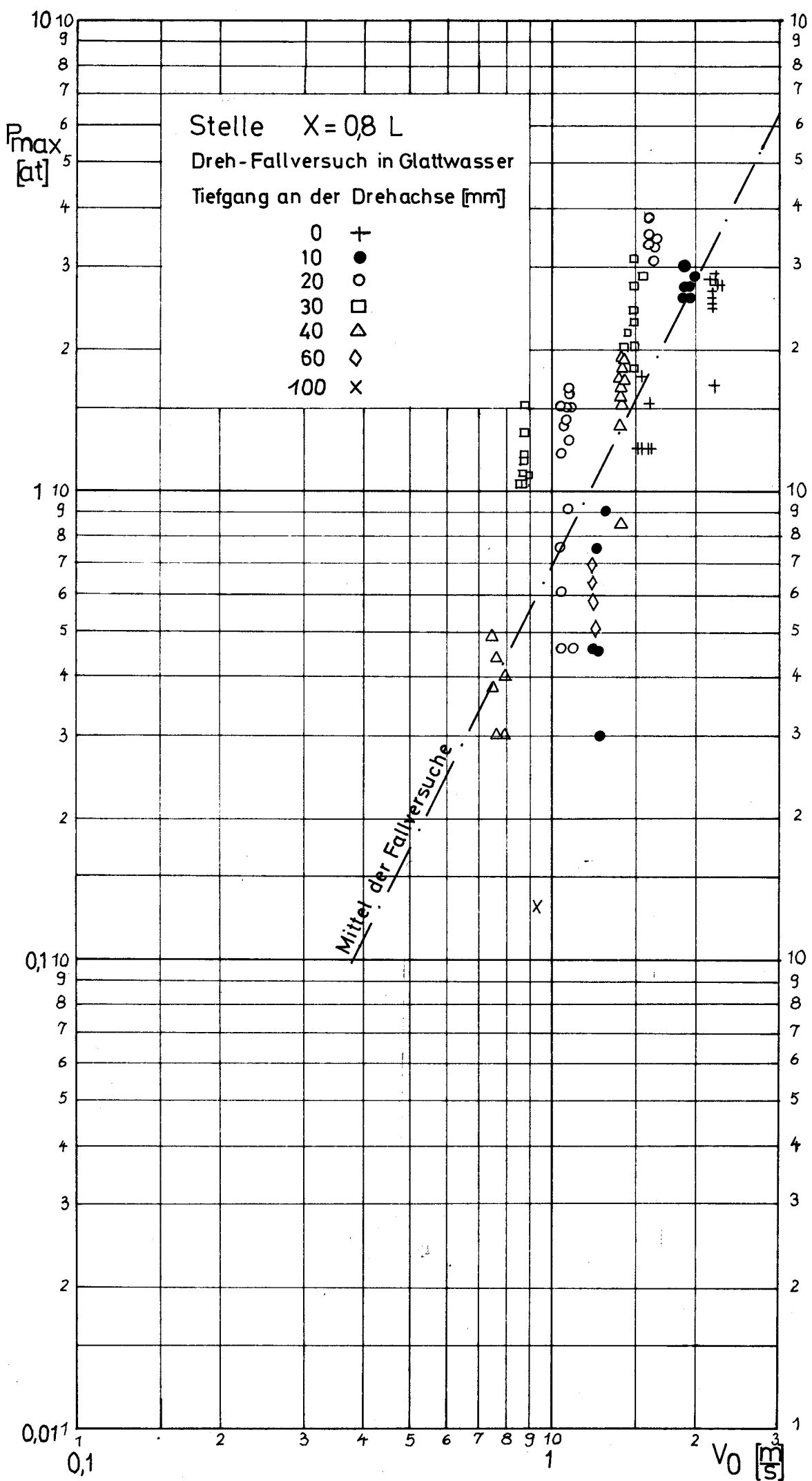


Bild 17

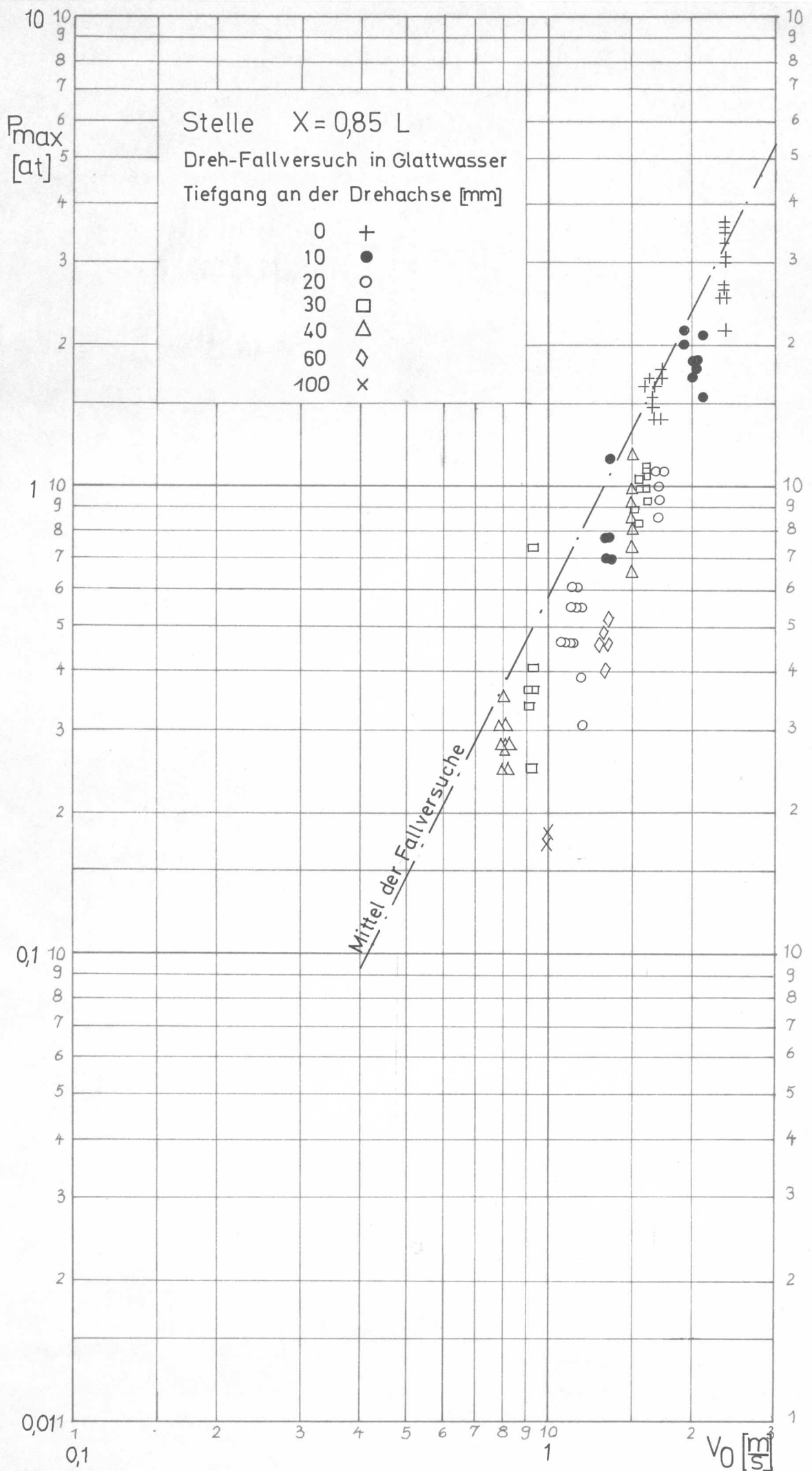


Bild 18

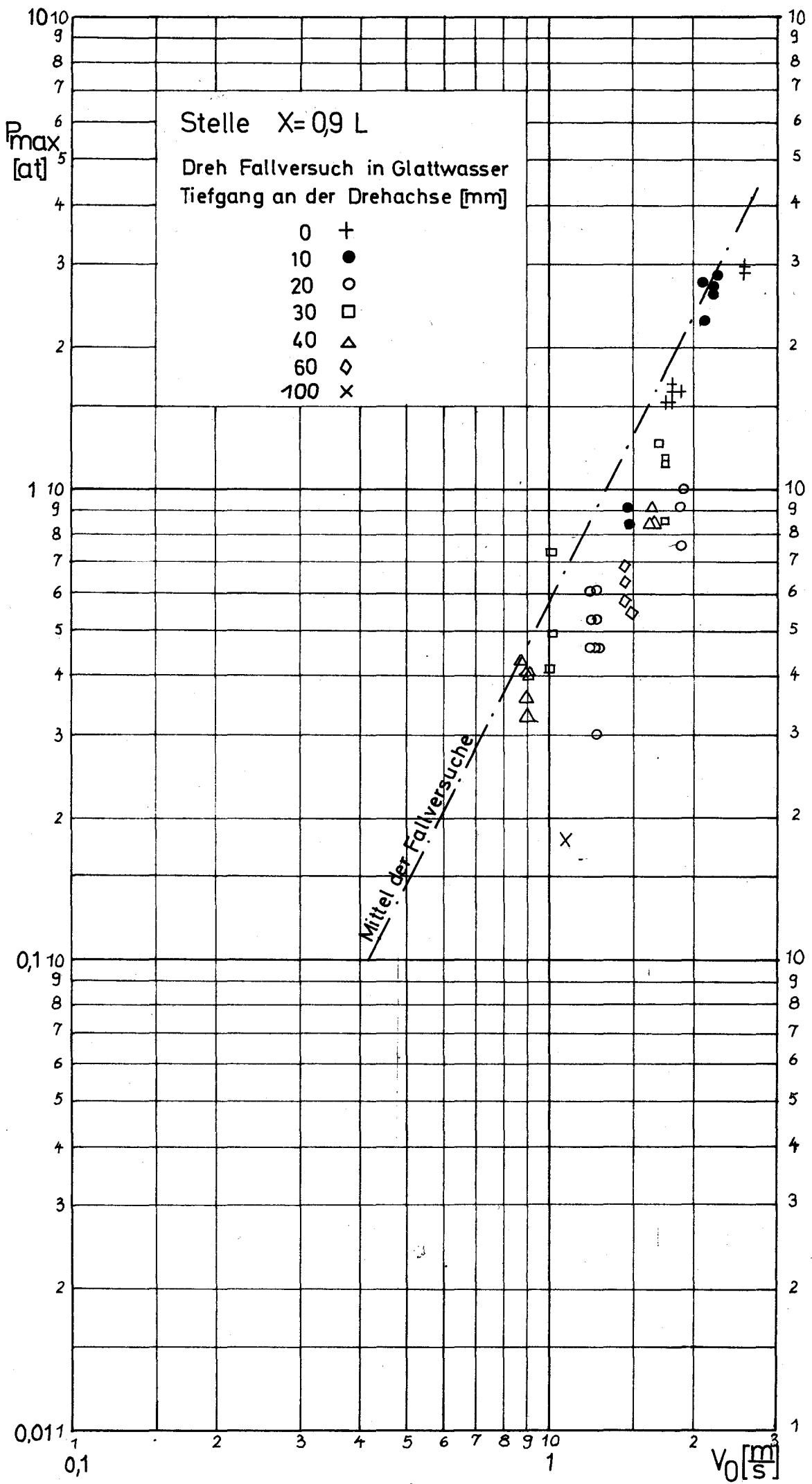


Bild 19

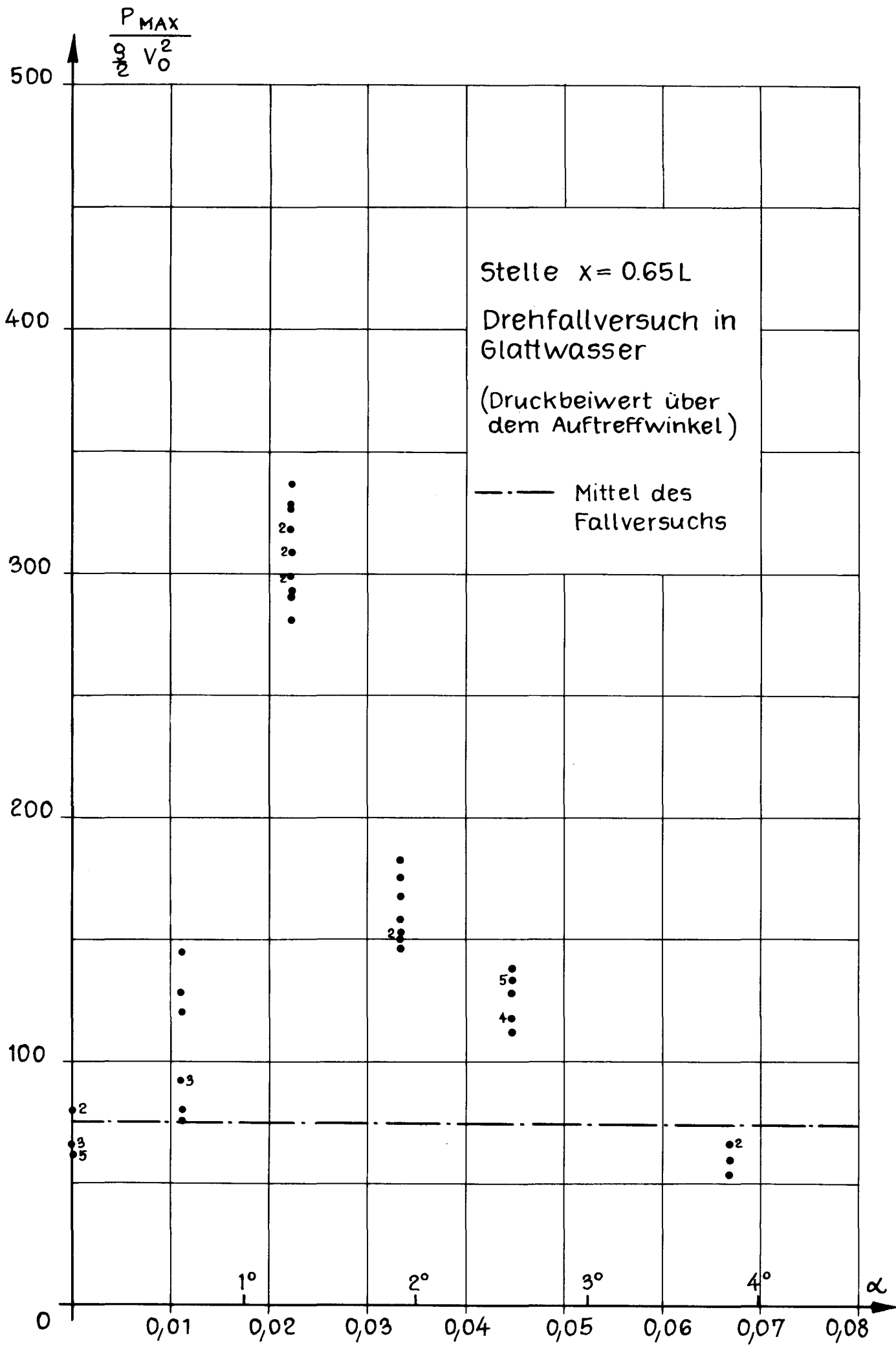


Bild 20

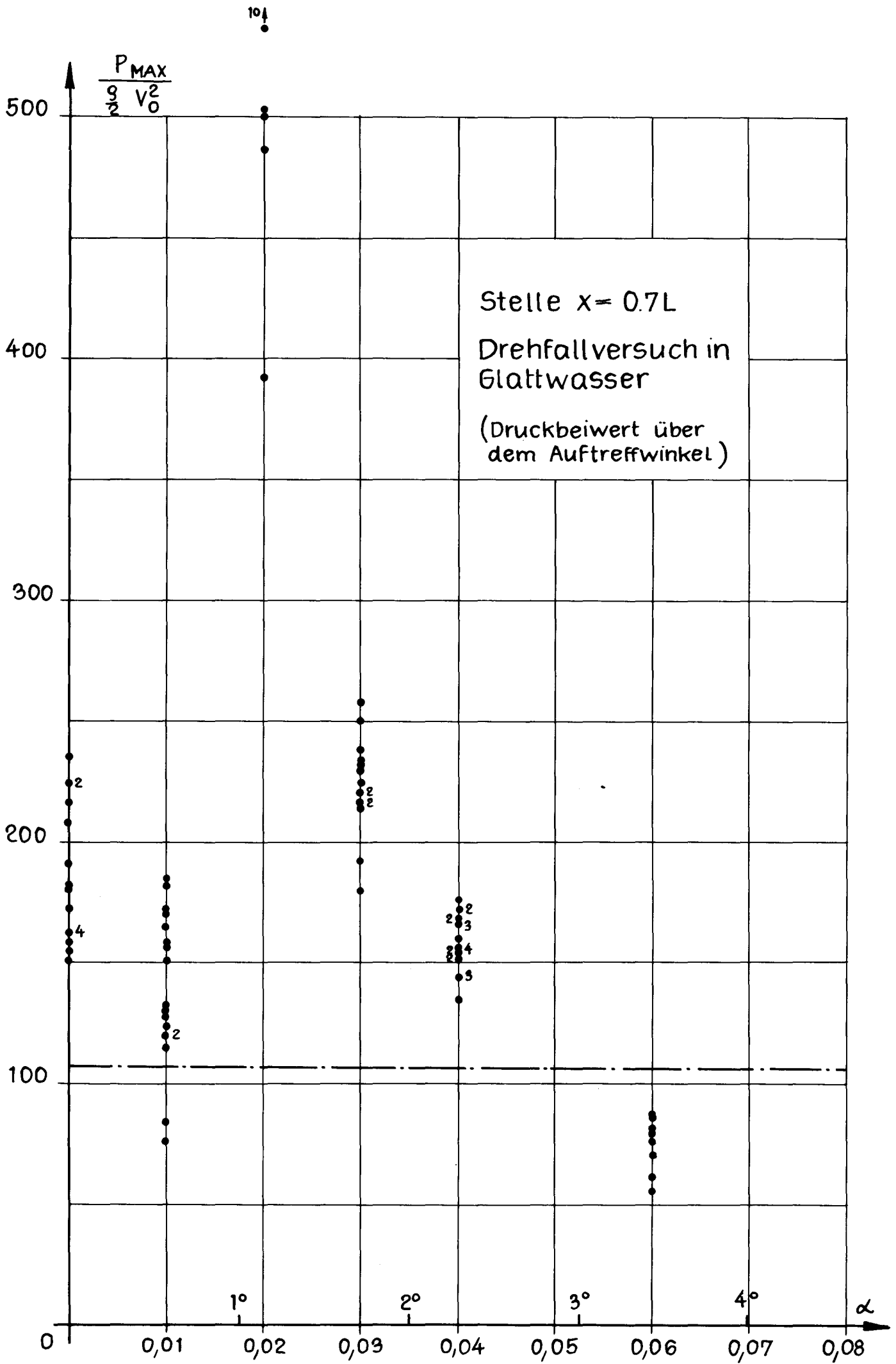


Bild 21

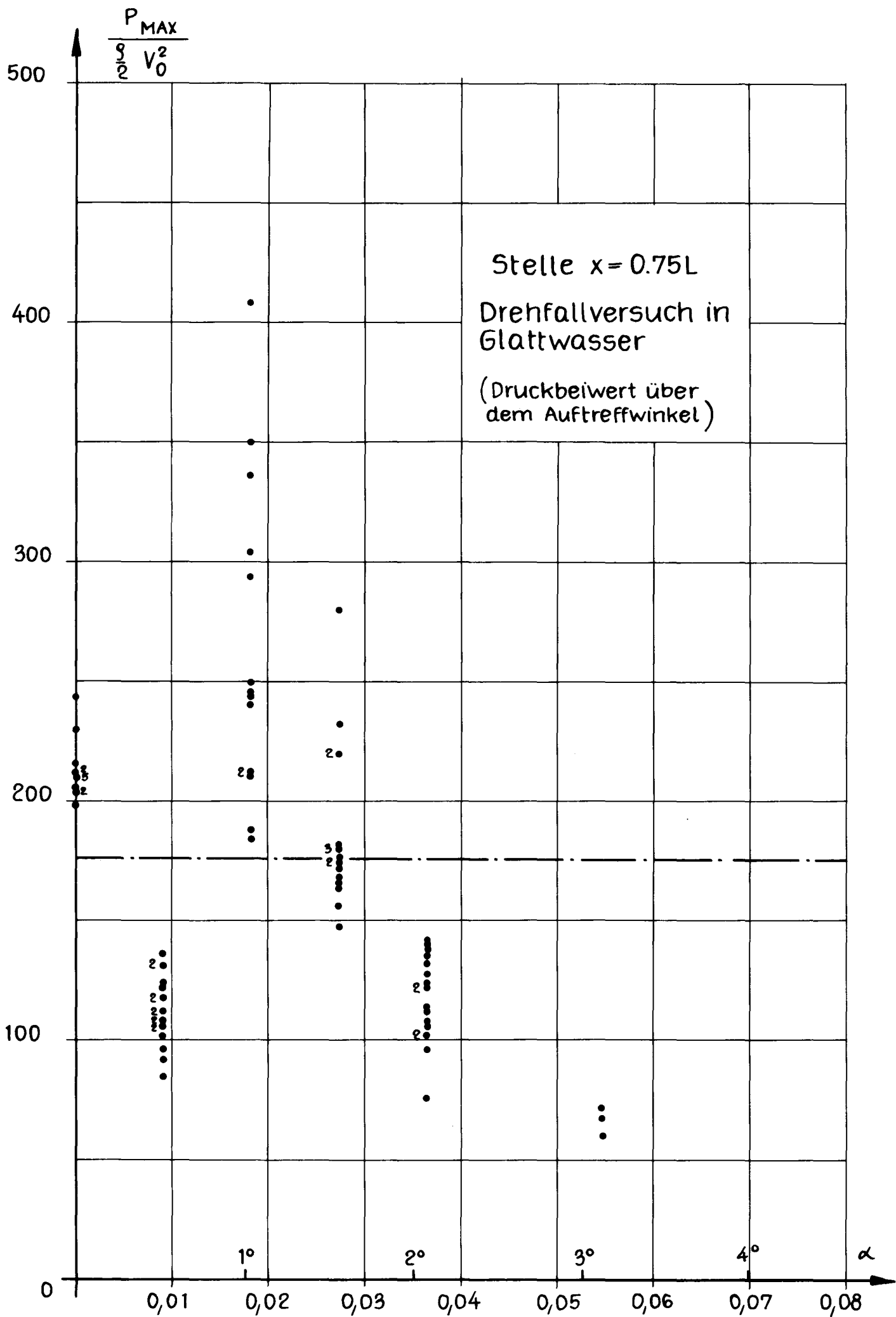


Bild 22

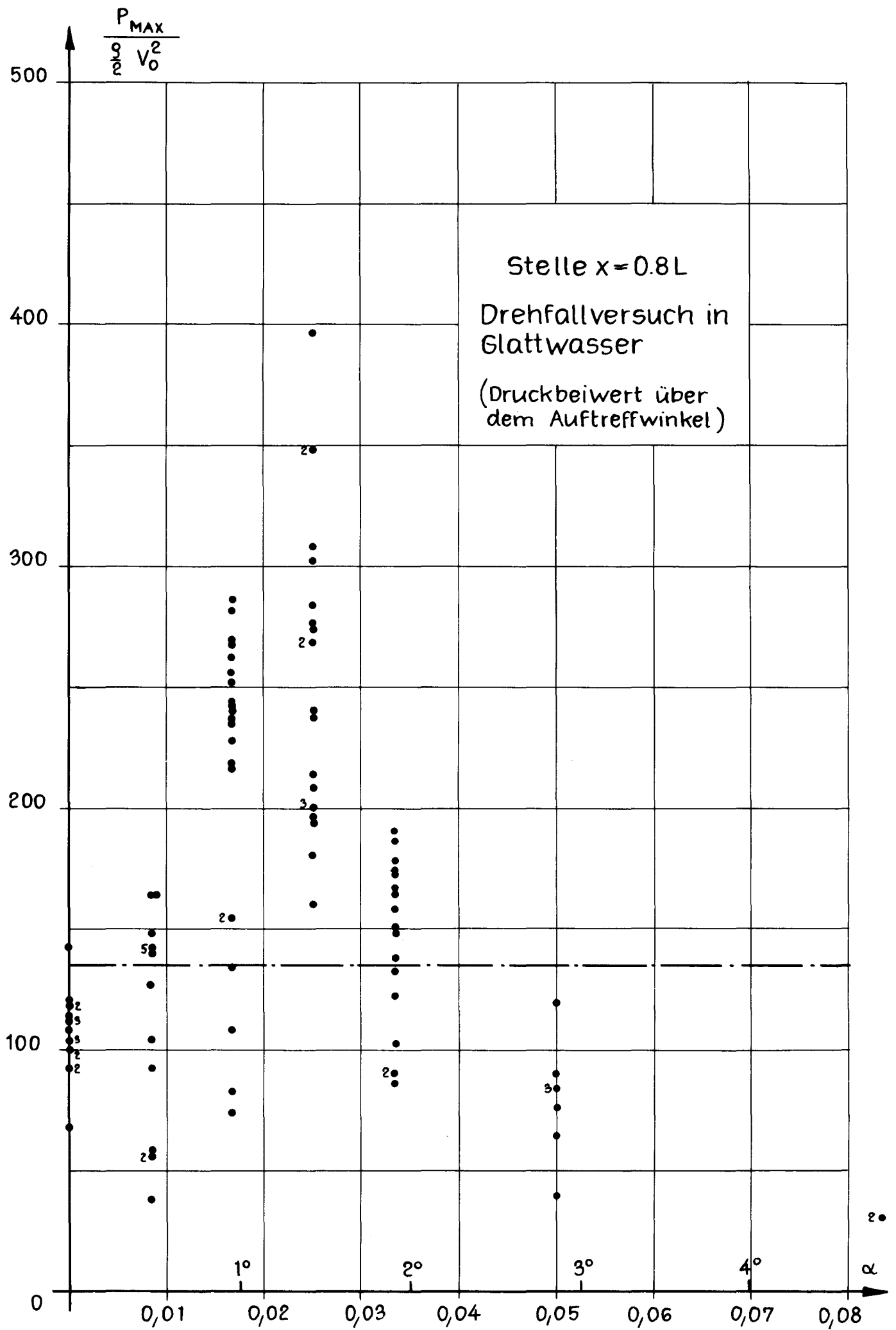


Bild 23

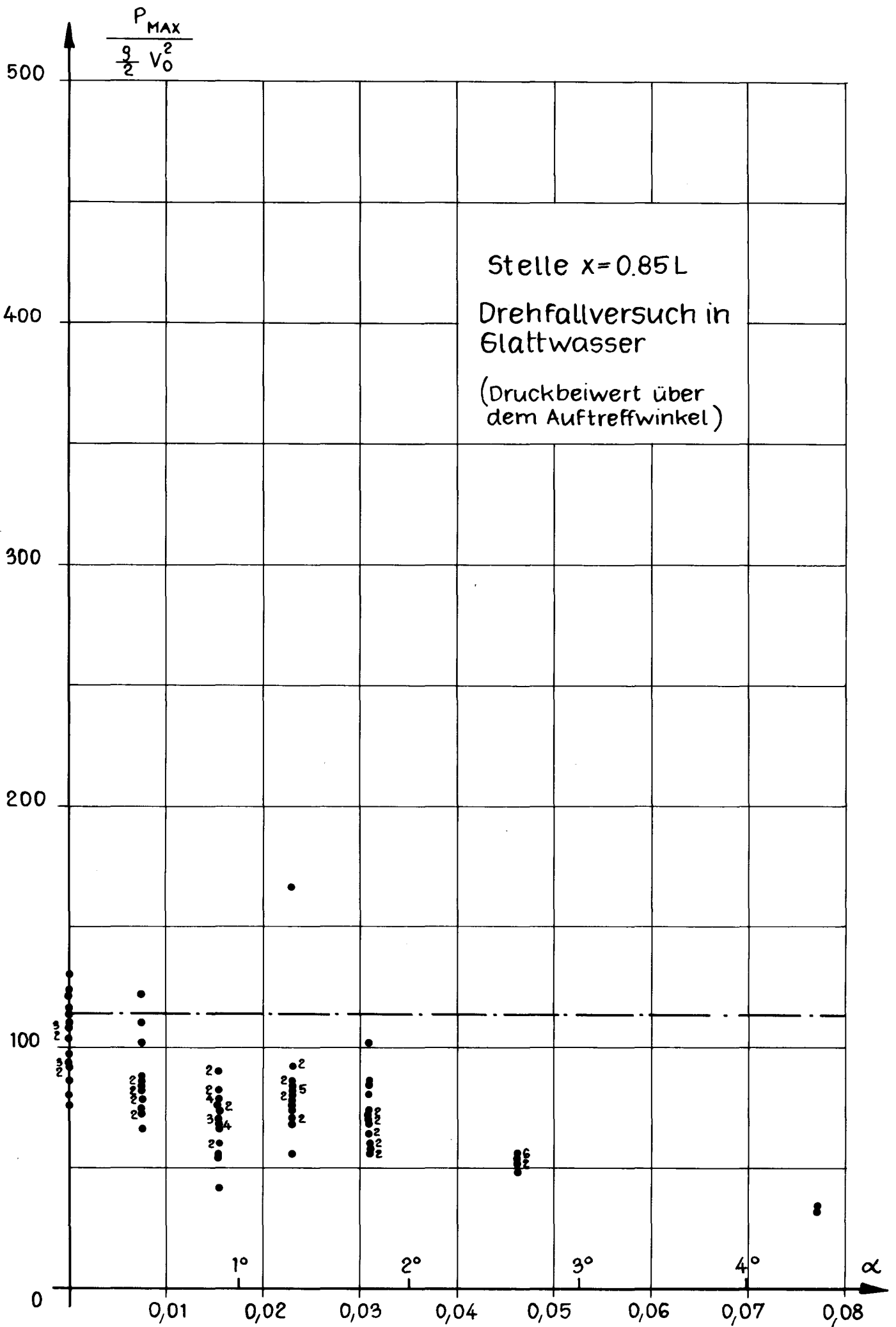


Bild 24

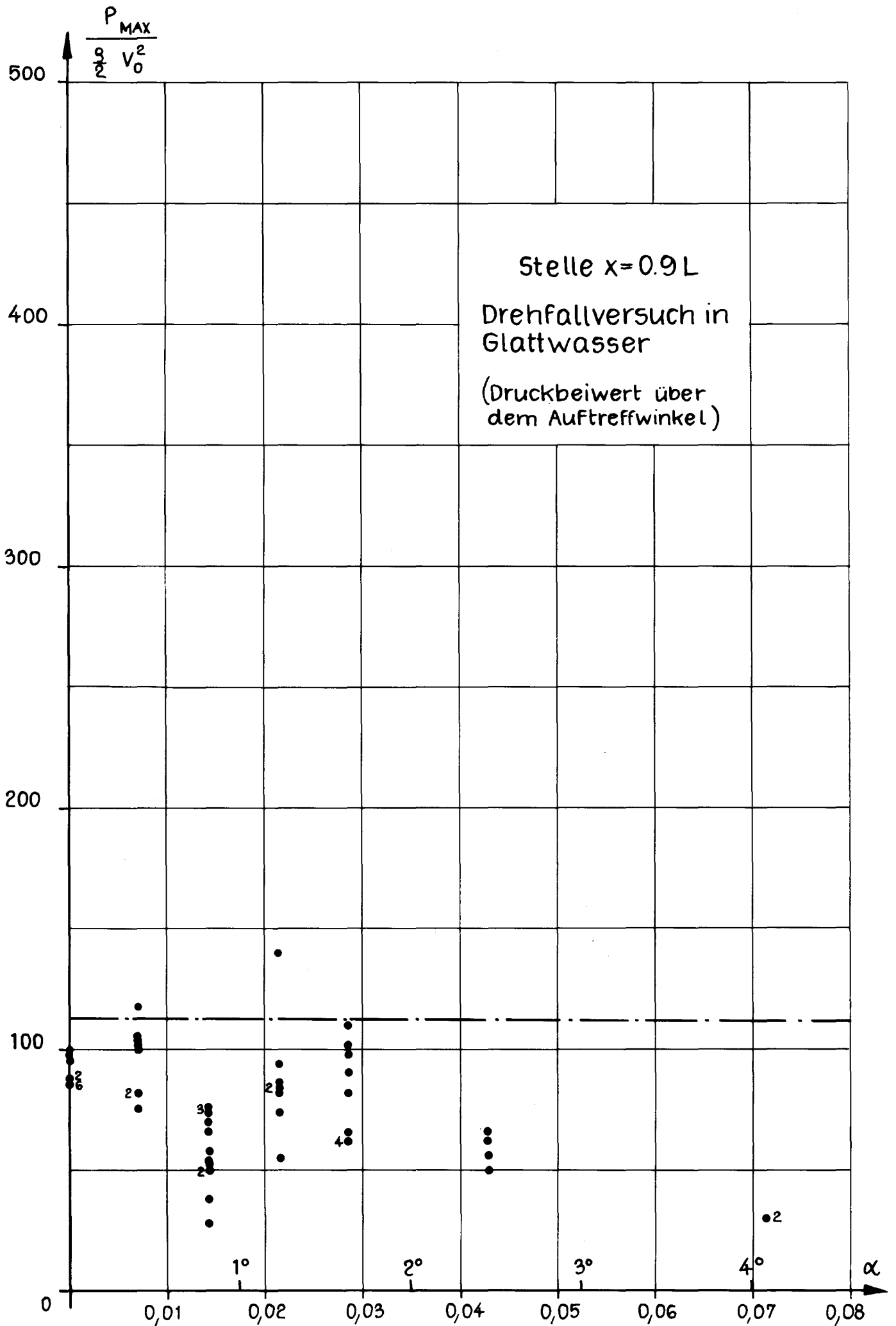


Bild 25

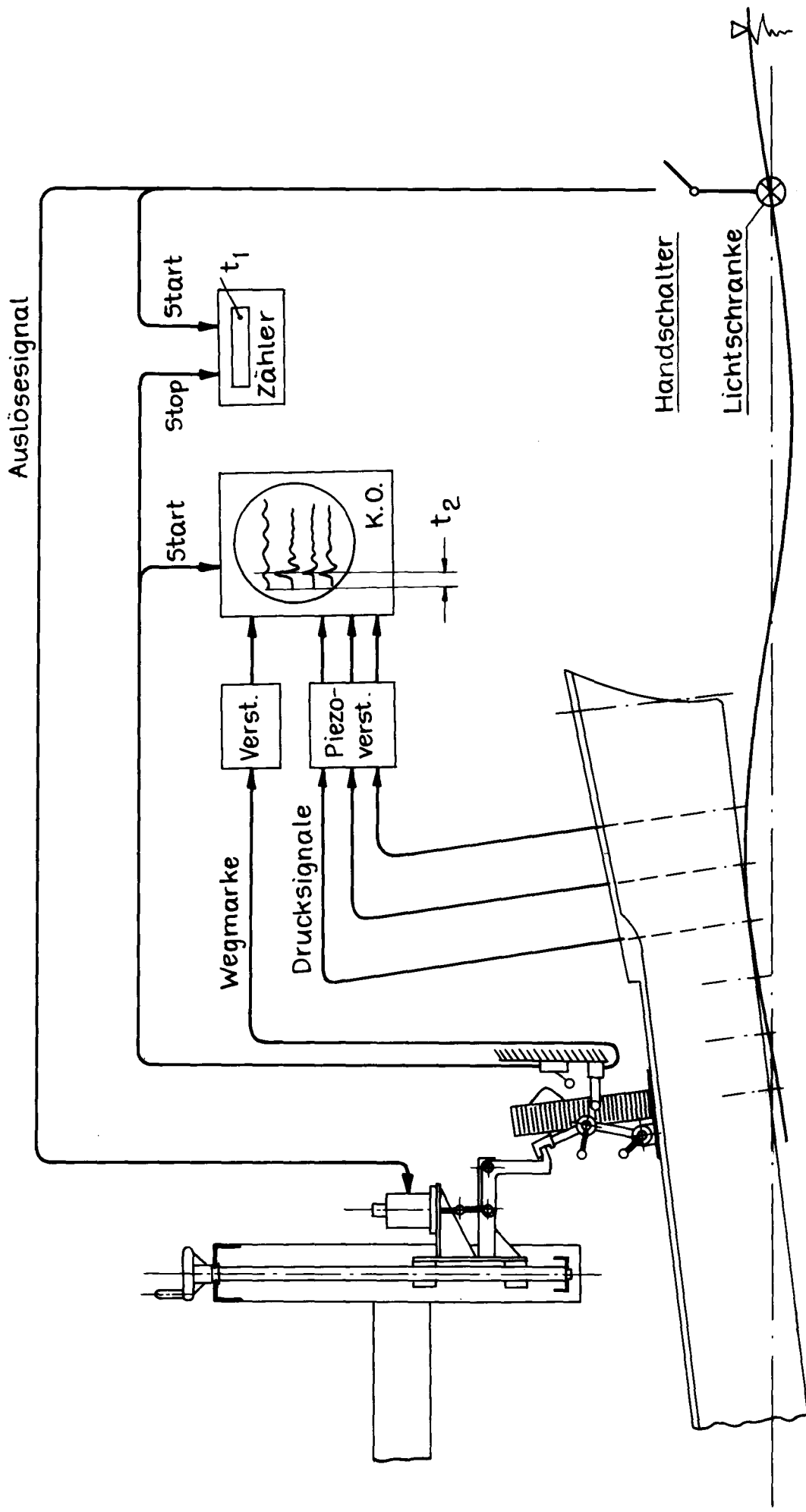


Bild 26 : Schema der Einrichtung für den Drehfallversuch in Wellen

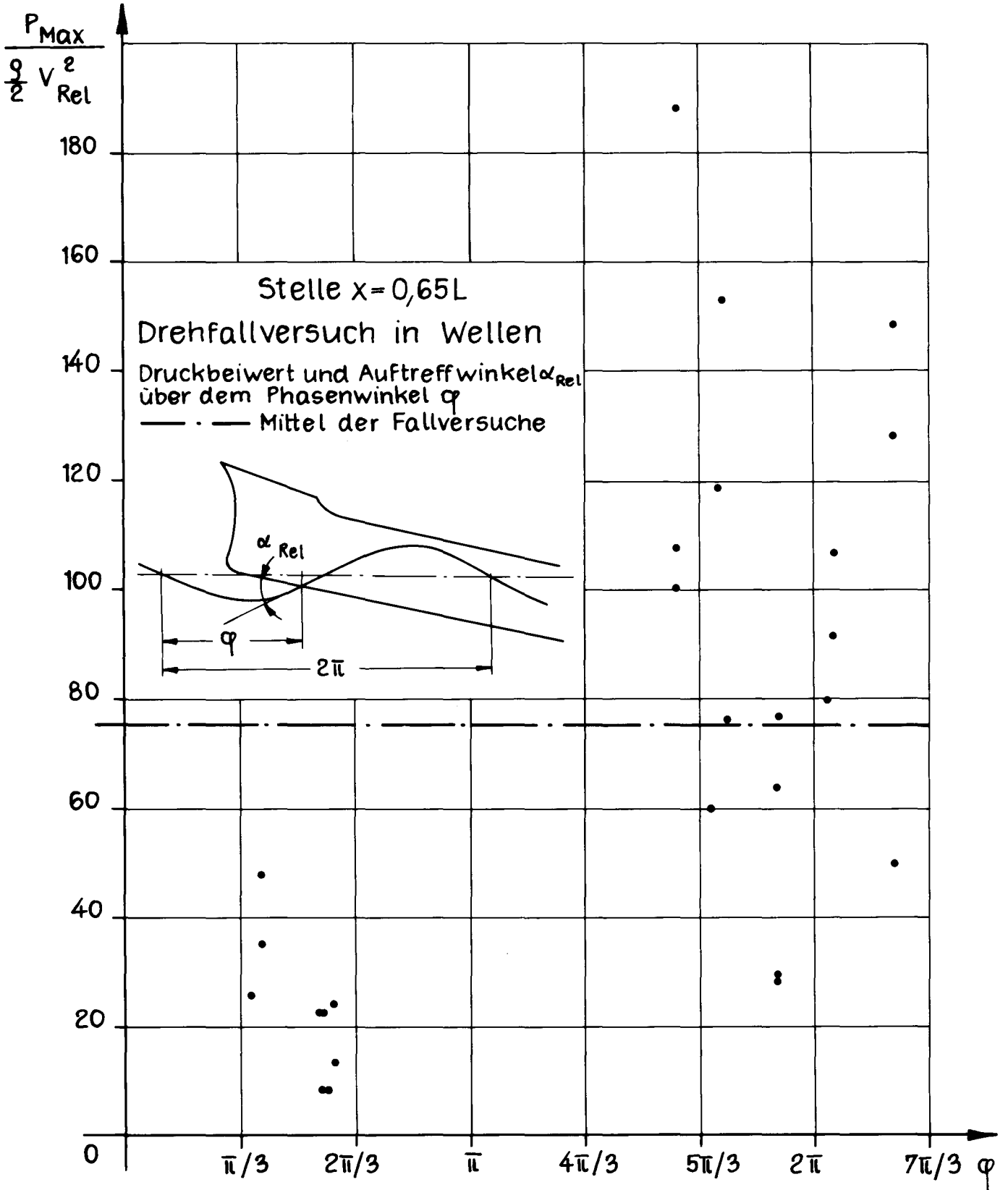
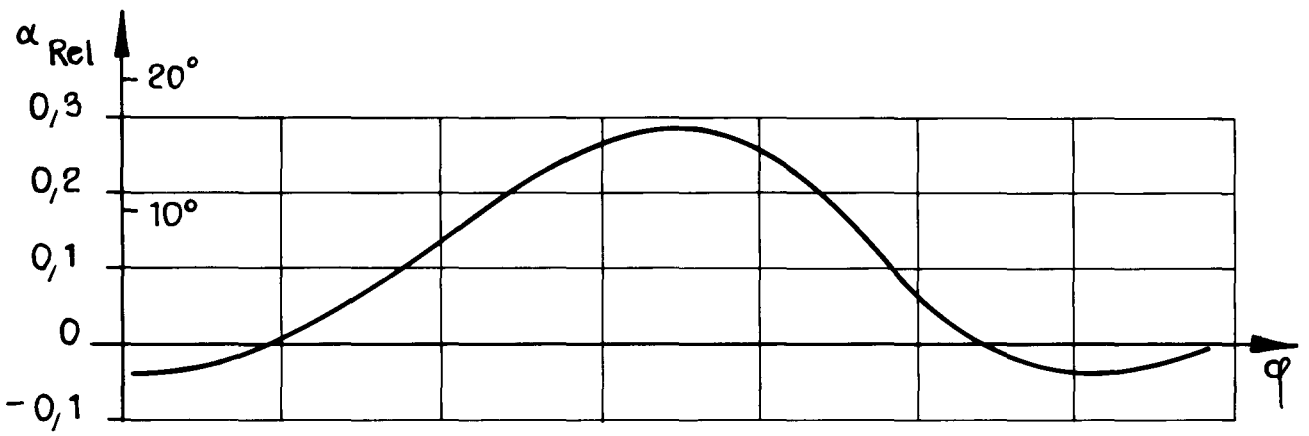


Bild 27

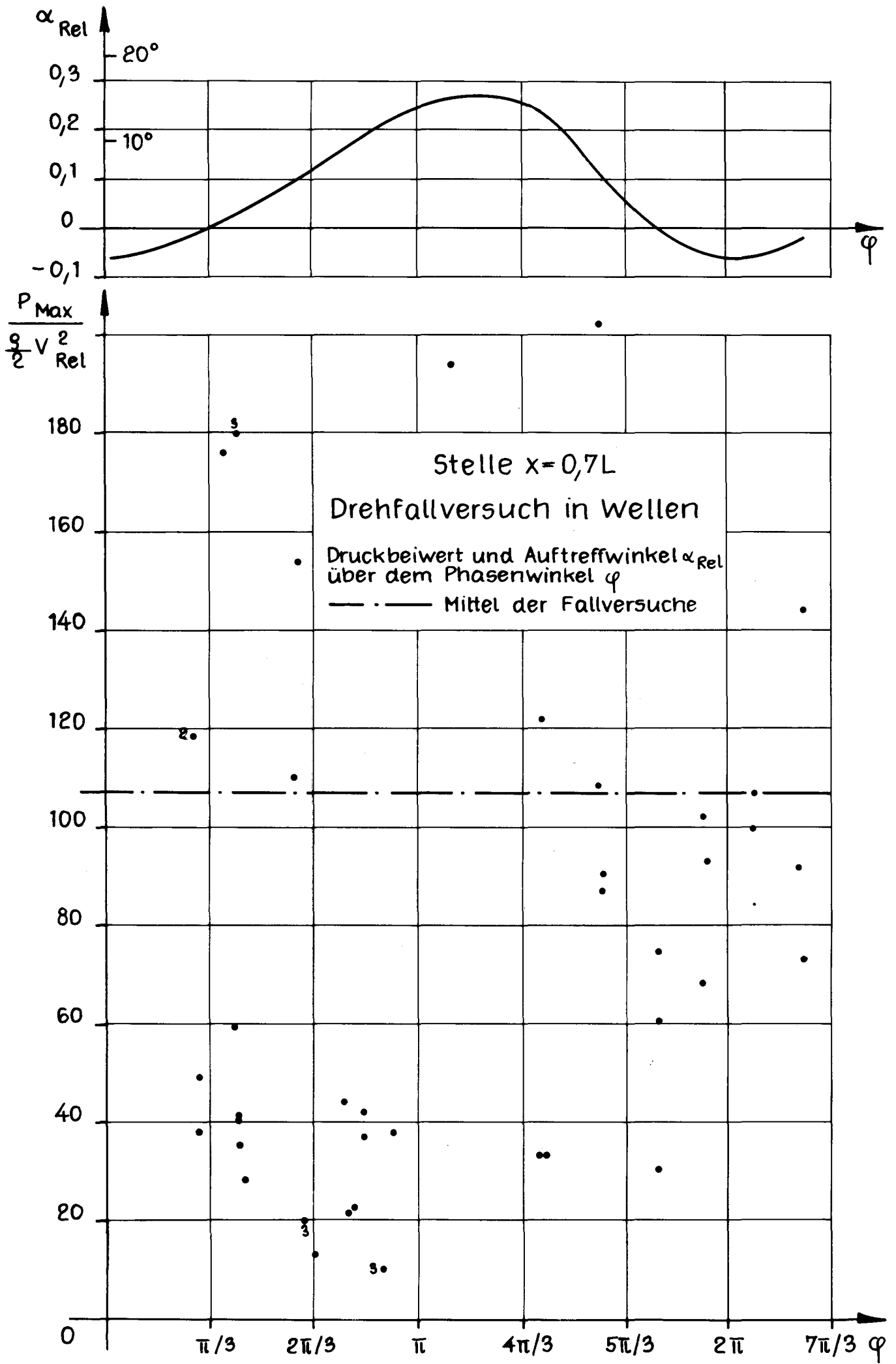


Bild 28

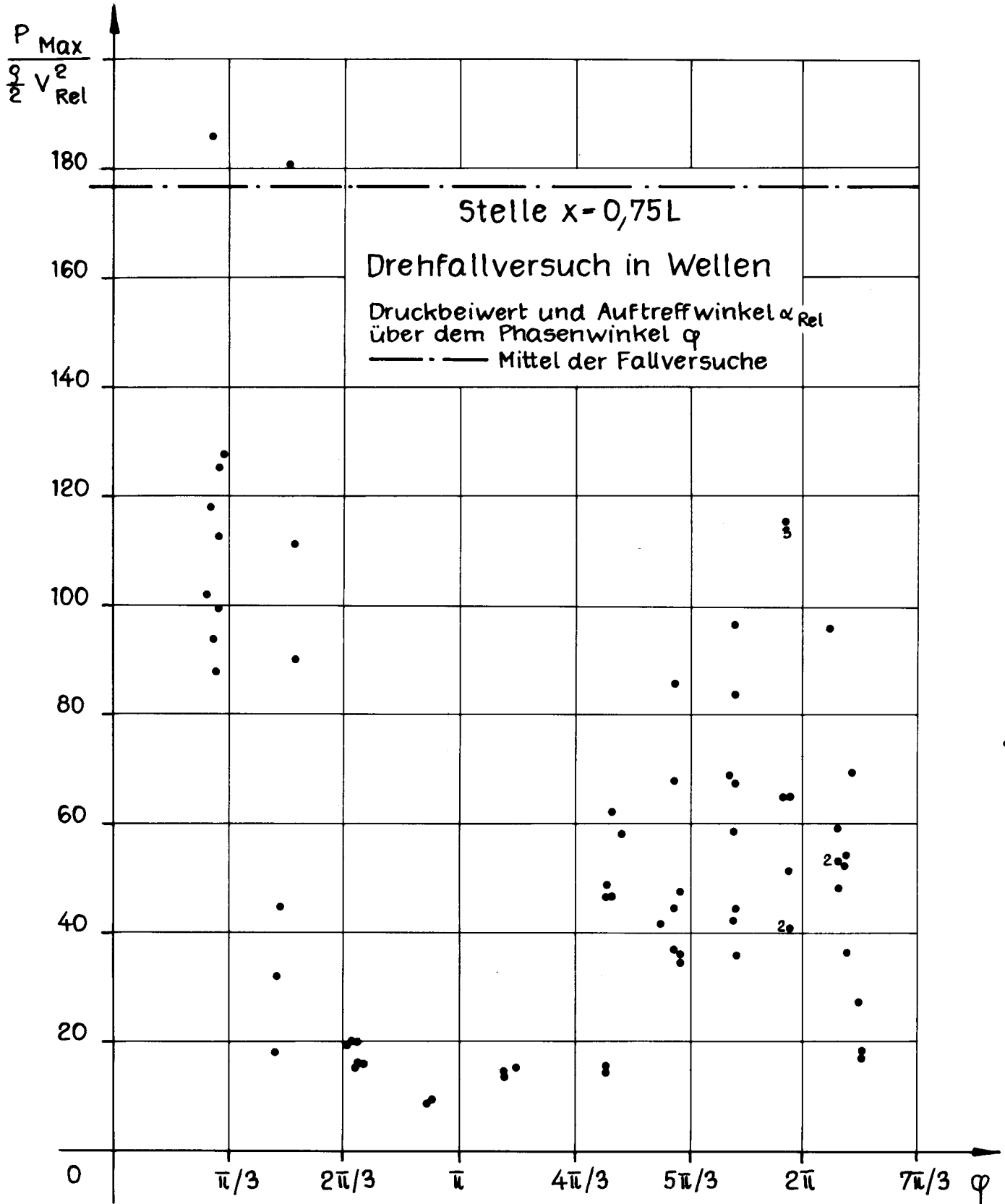
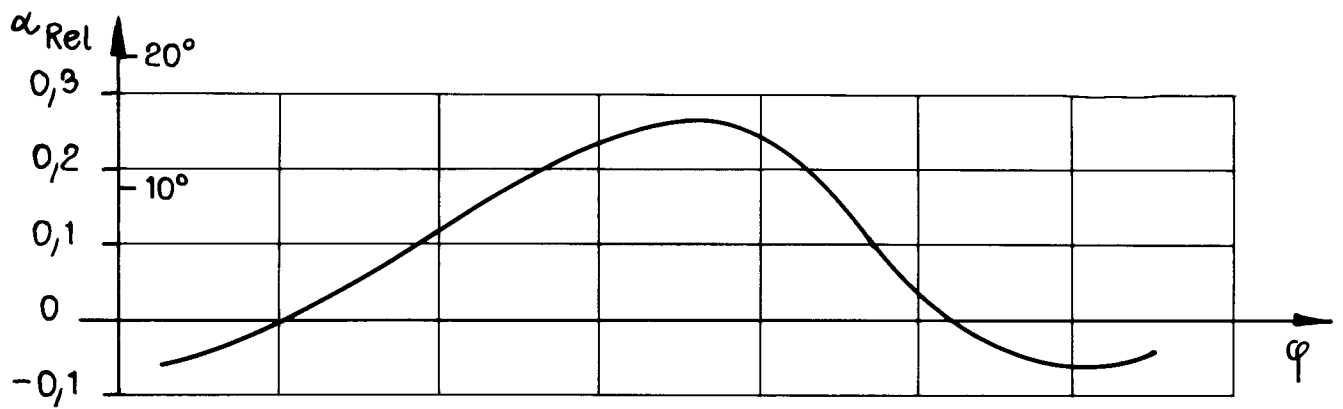


Bild 29

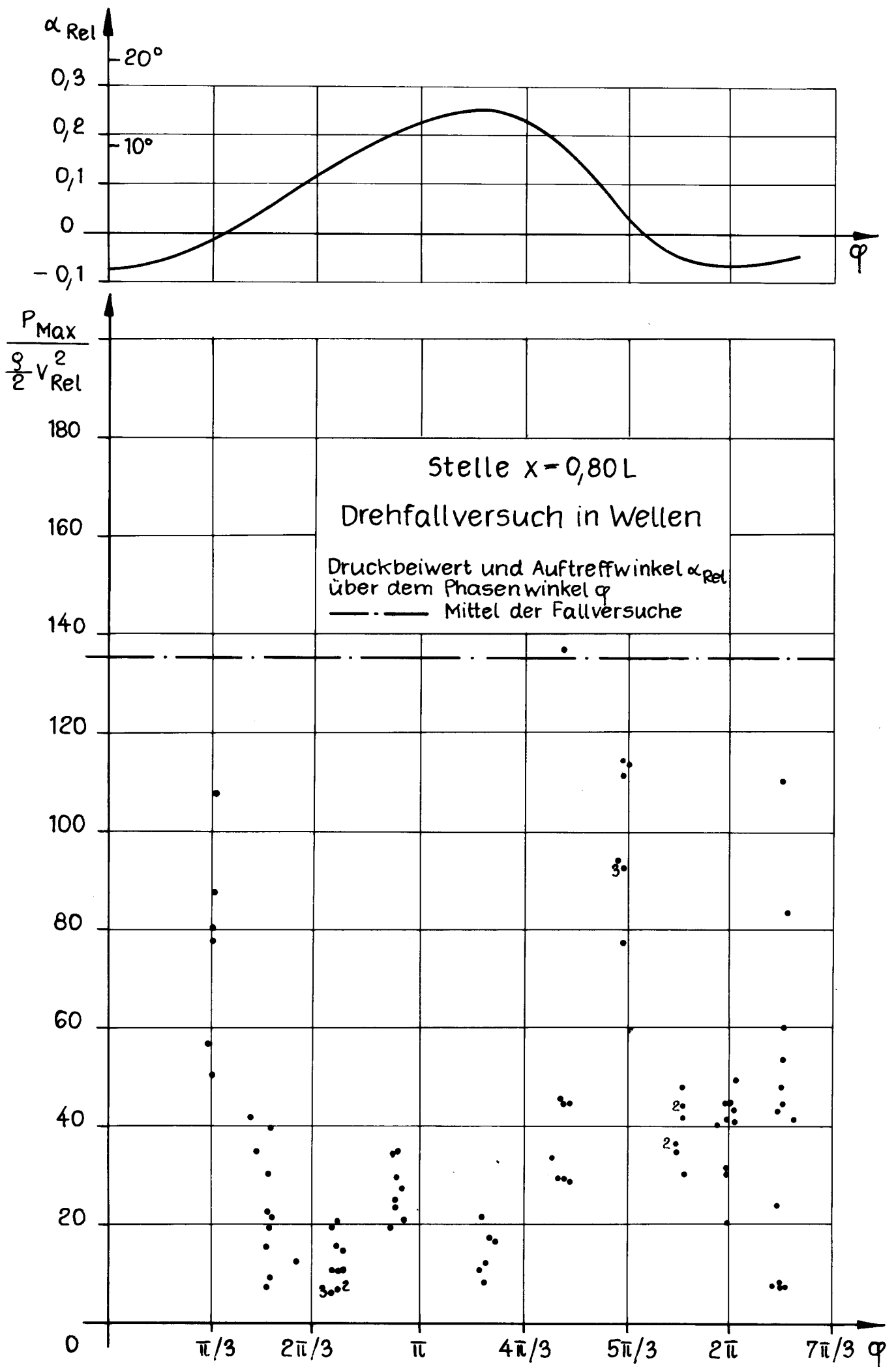


Bild 30

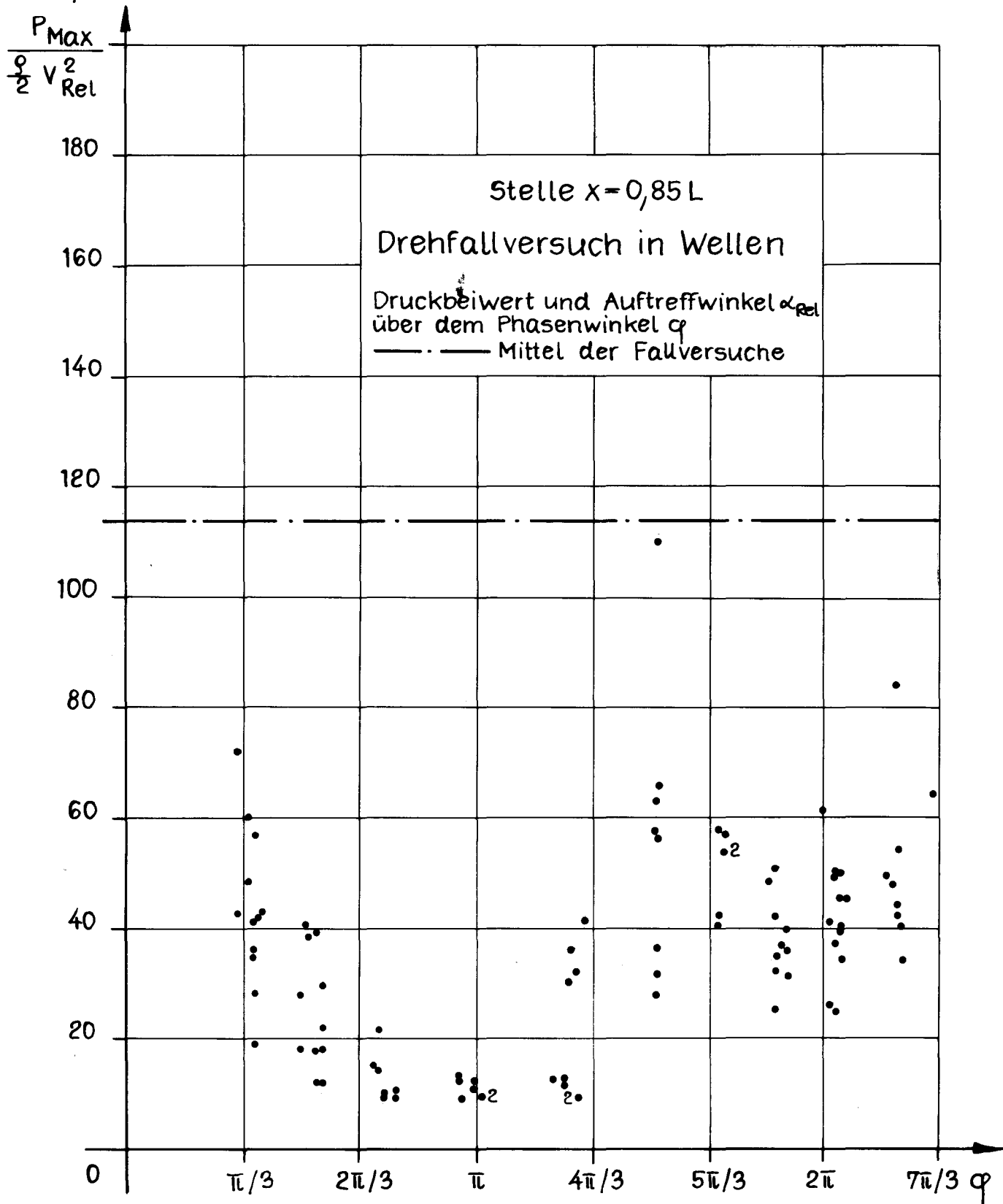
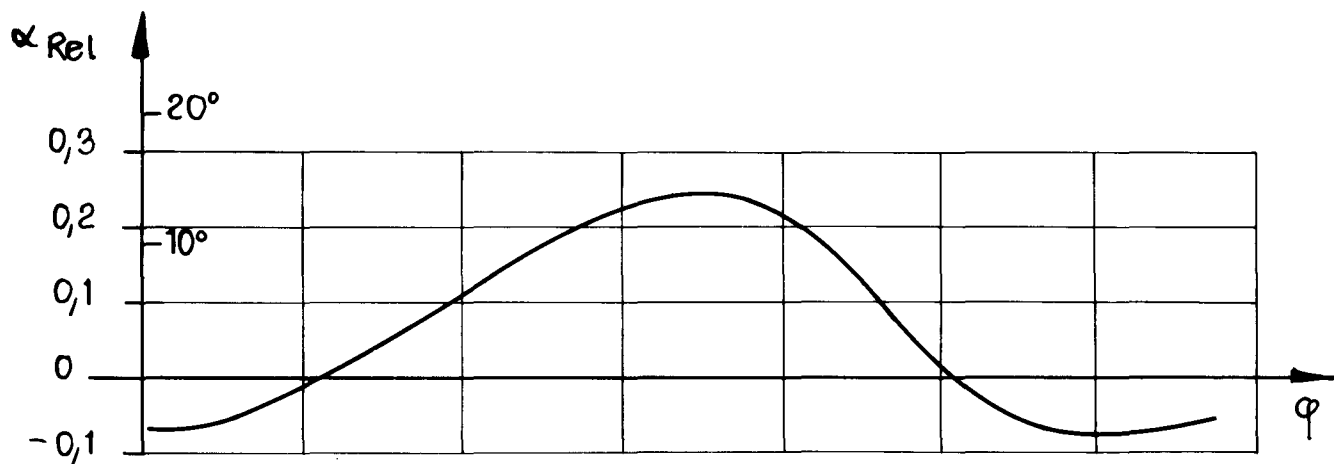


Bild 31

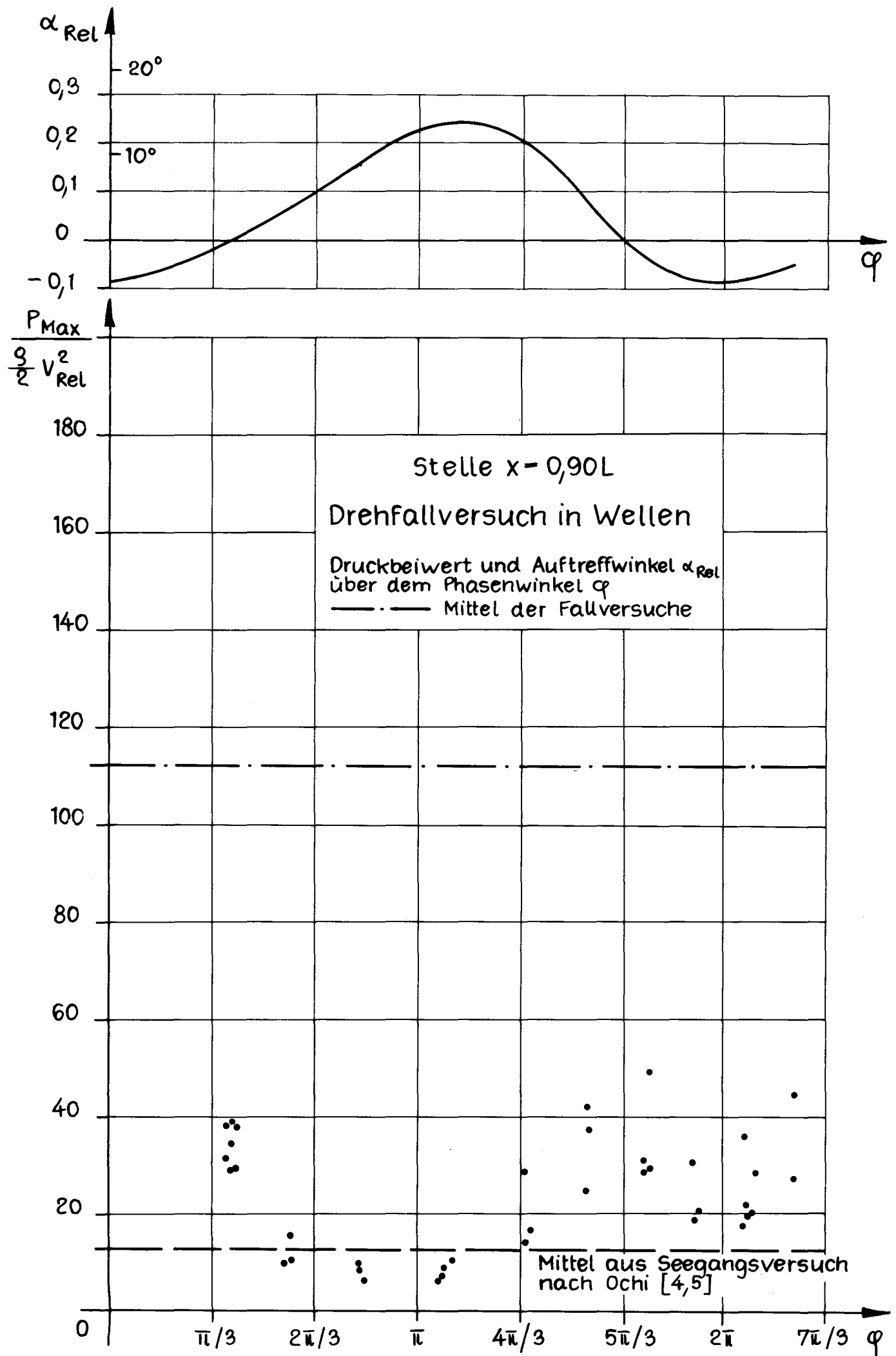


Bild 32



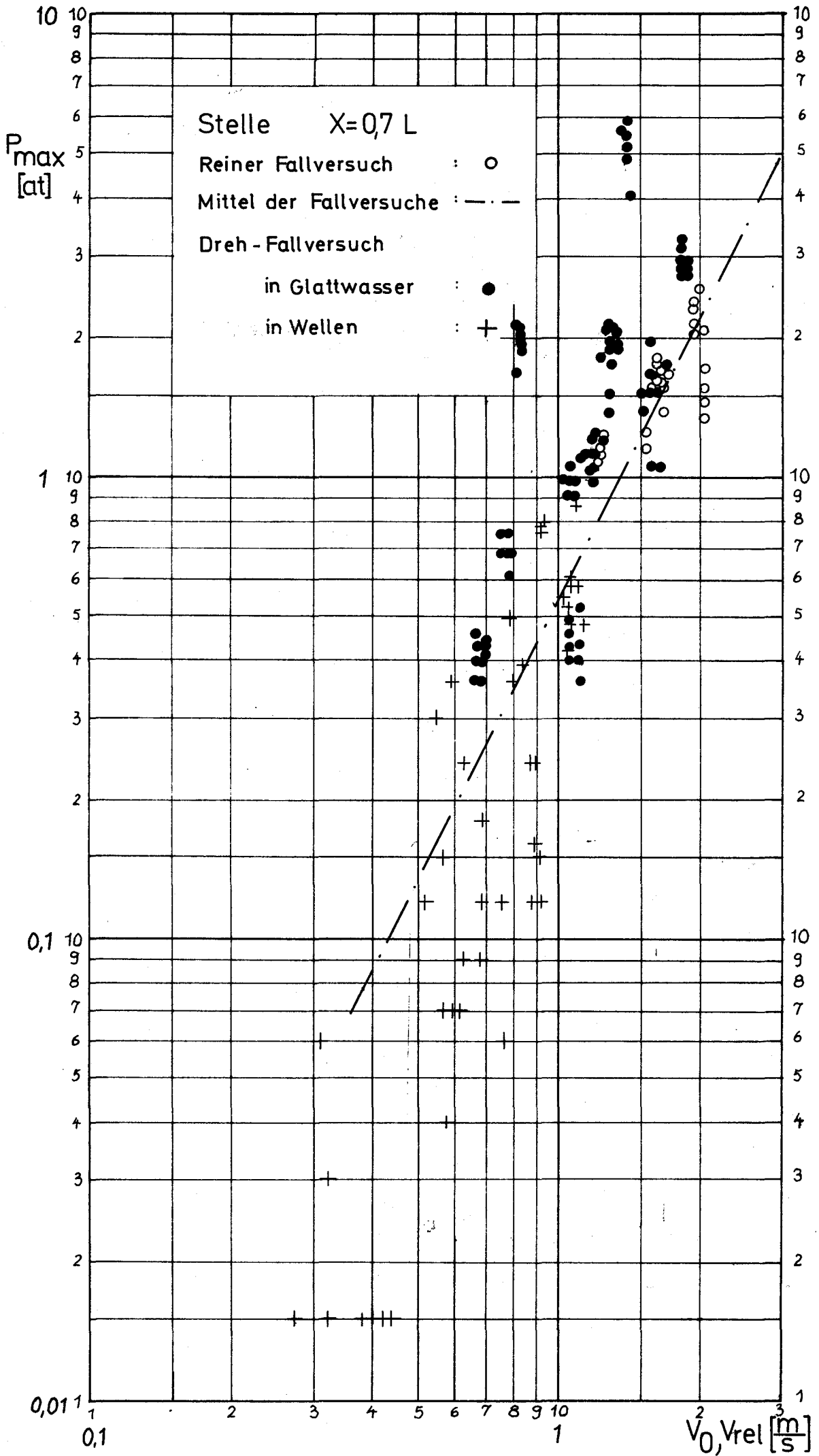


Bild 34

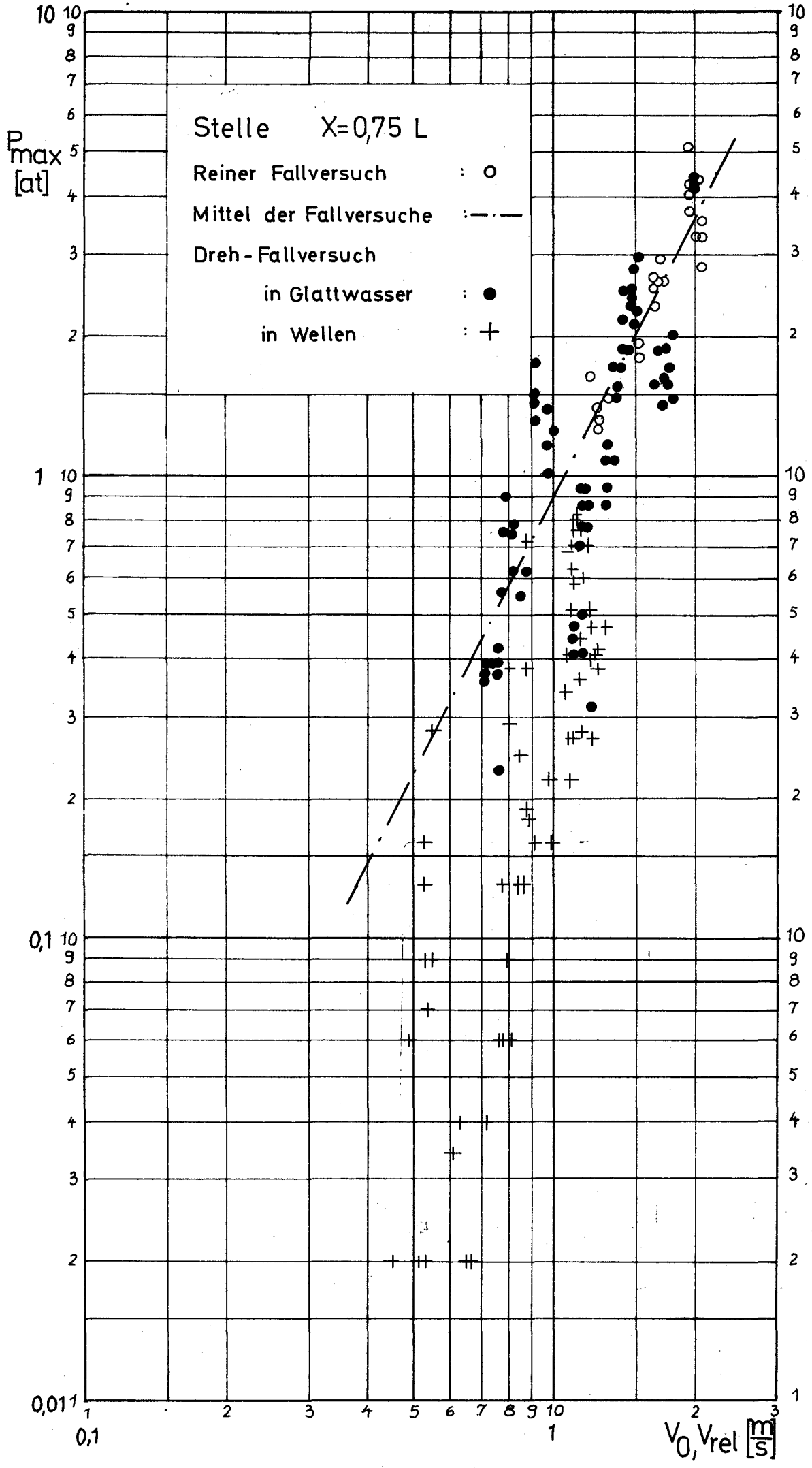


Bild 35

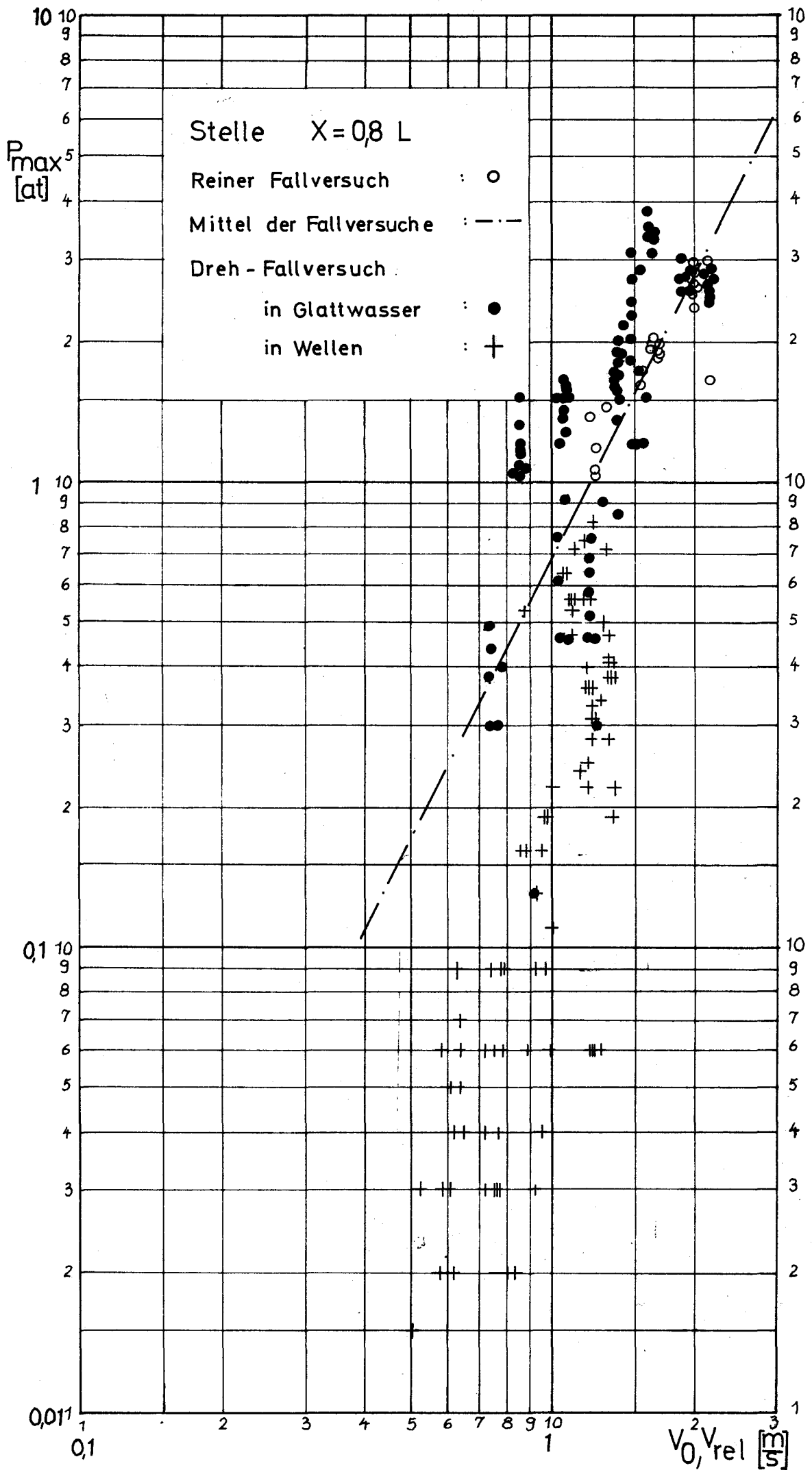


Bild 36

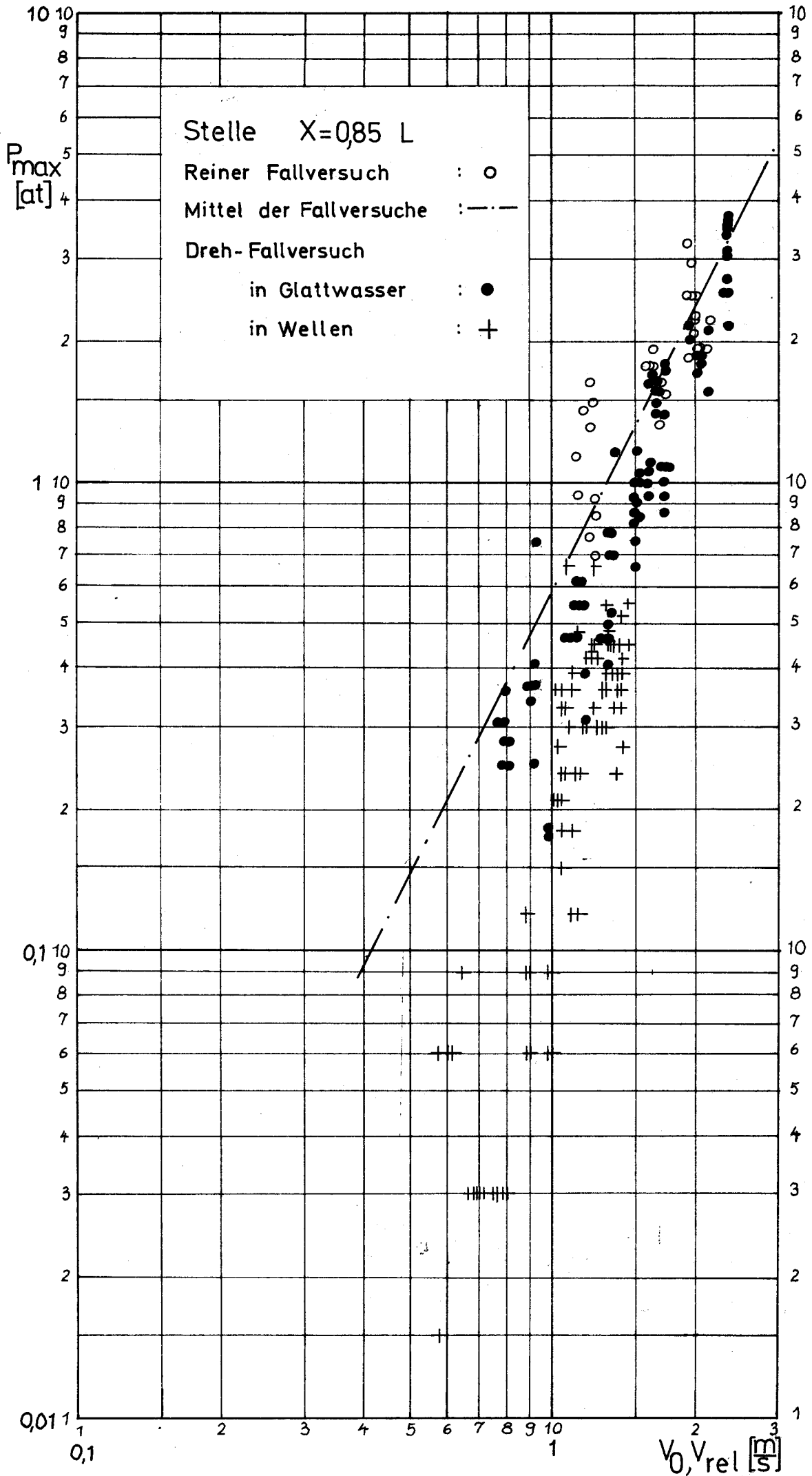


Bild 37

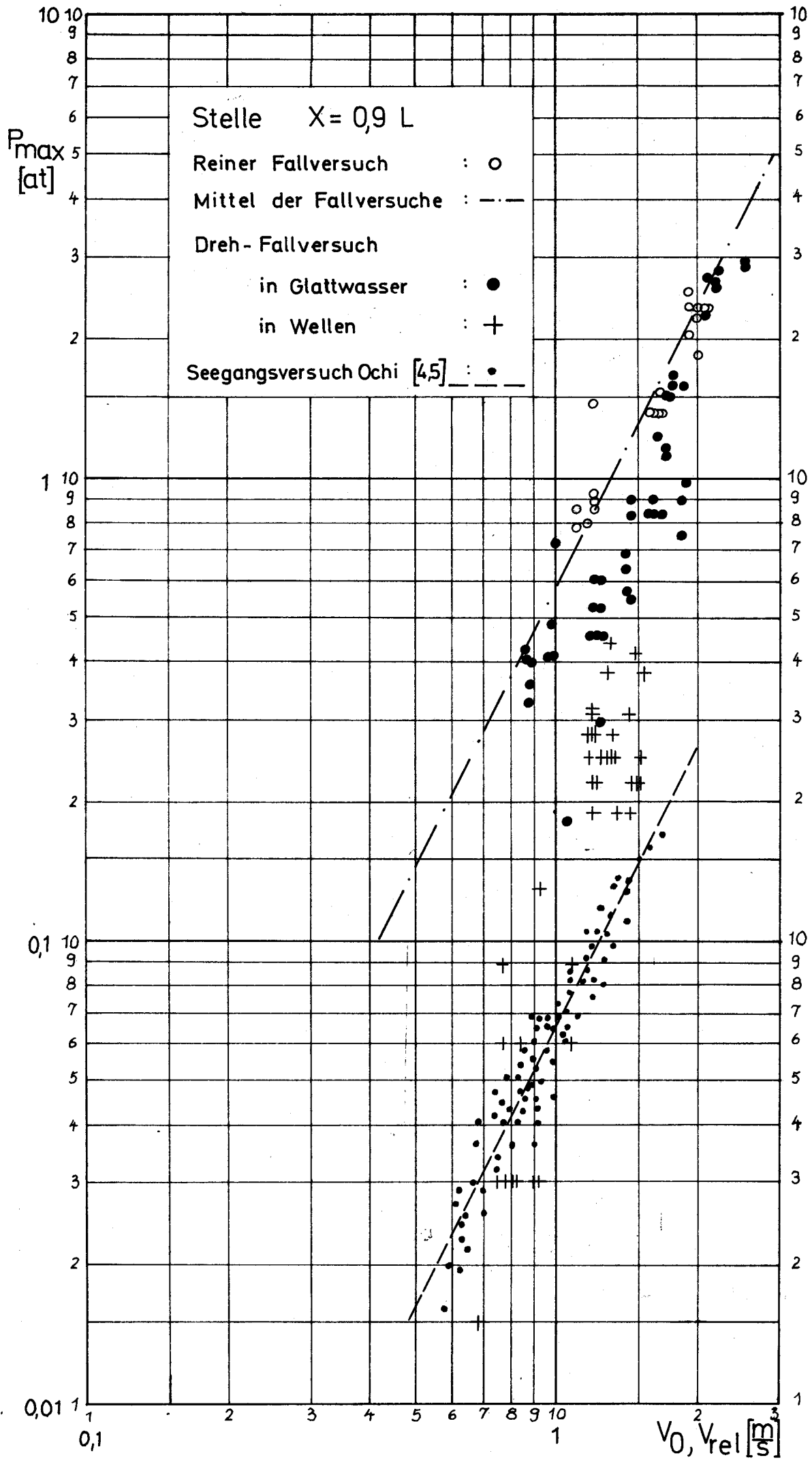


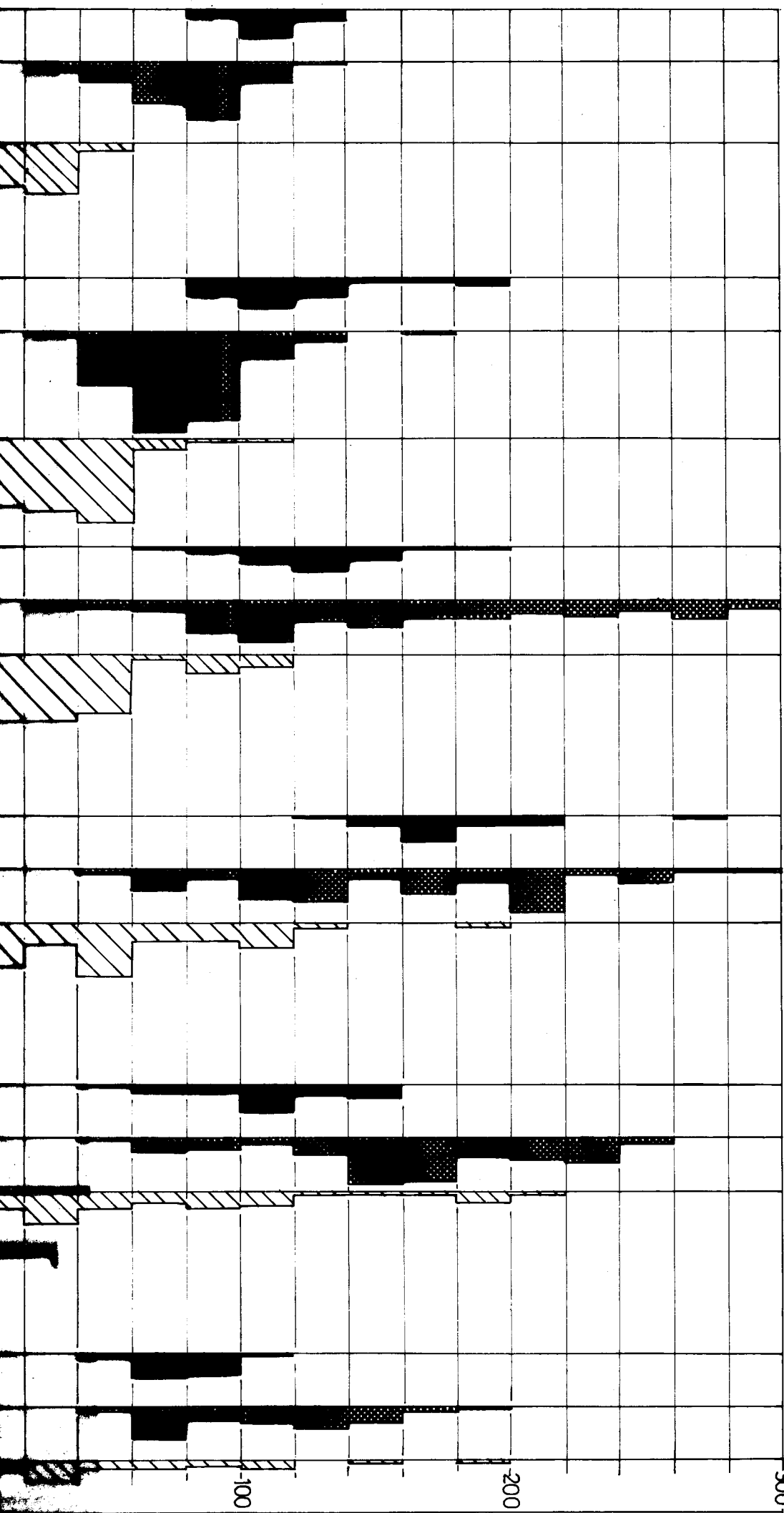
Bild 38

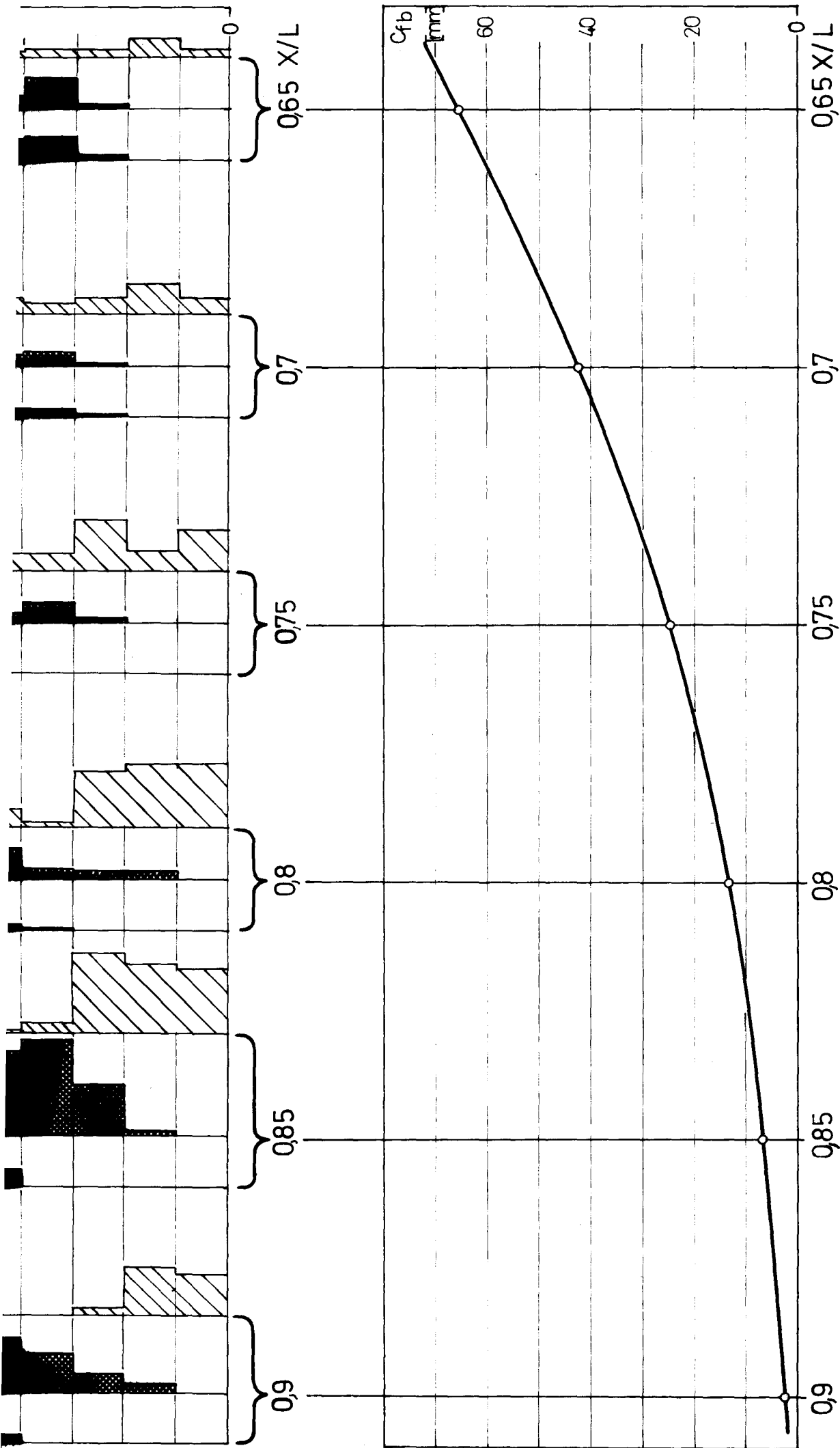
Reiner Fallversuch

Drehfallversuch: in Glattwasser

in Wellen

$$\frac{P_{\max}}{2 V_0^2}$$





Klassierung der bei allen drei Versuchsarten gemessenen Druckbeiwerte an allen sechs Meßstellen und halbe Breite des flachen Bodens  $c_{fb}$  an den Meßstellen

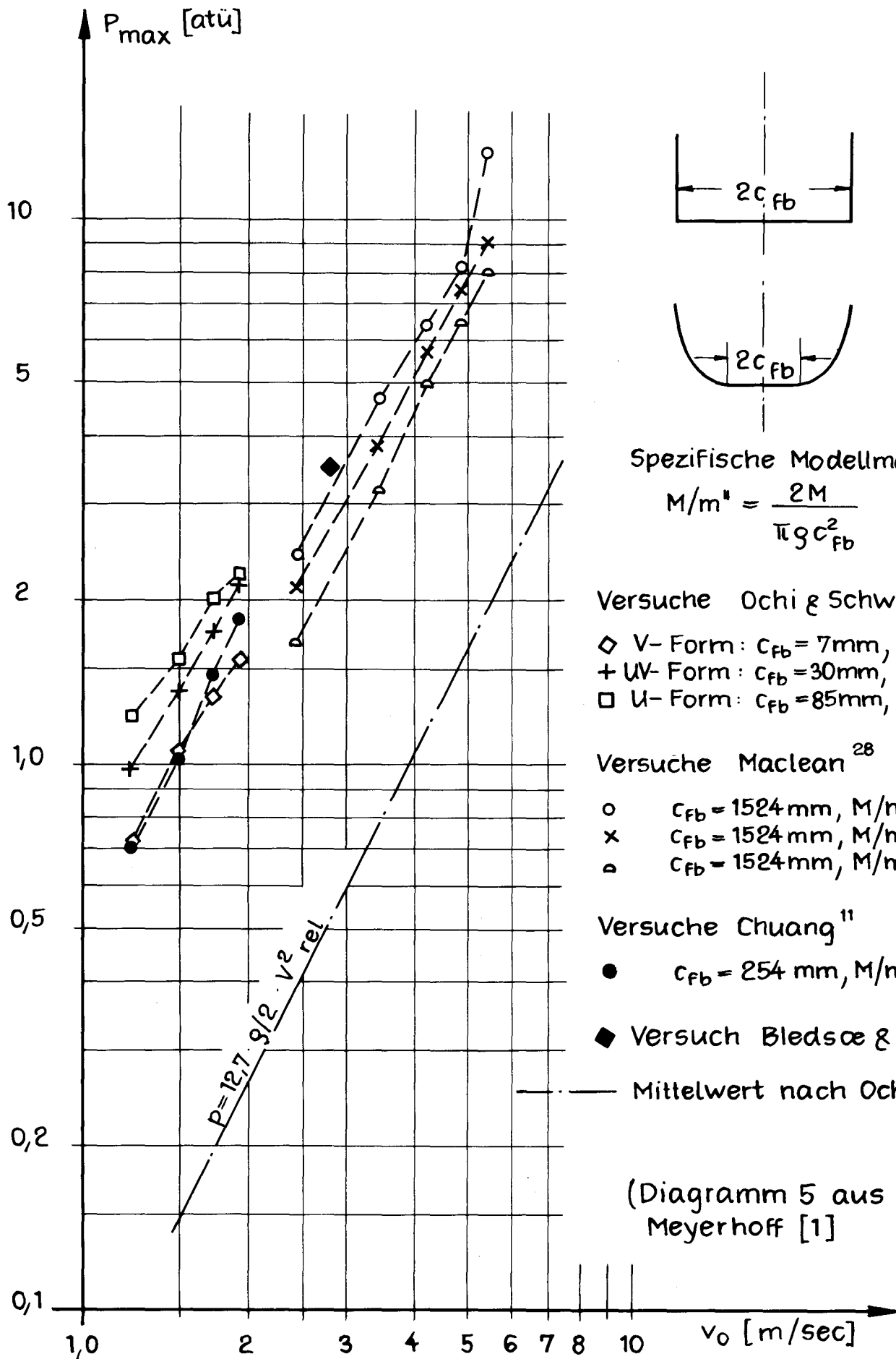
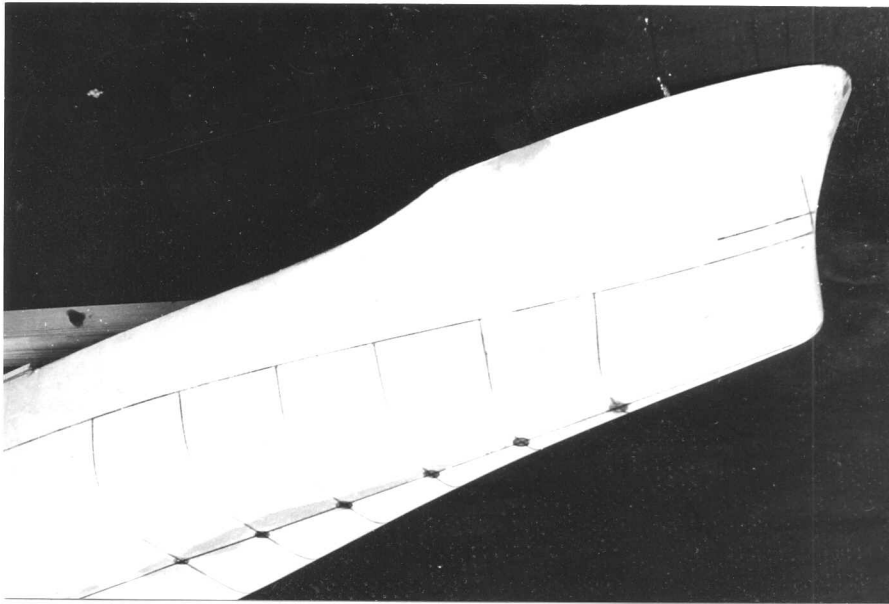


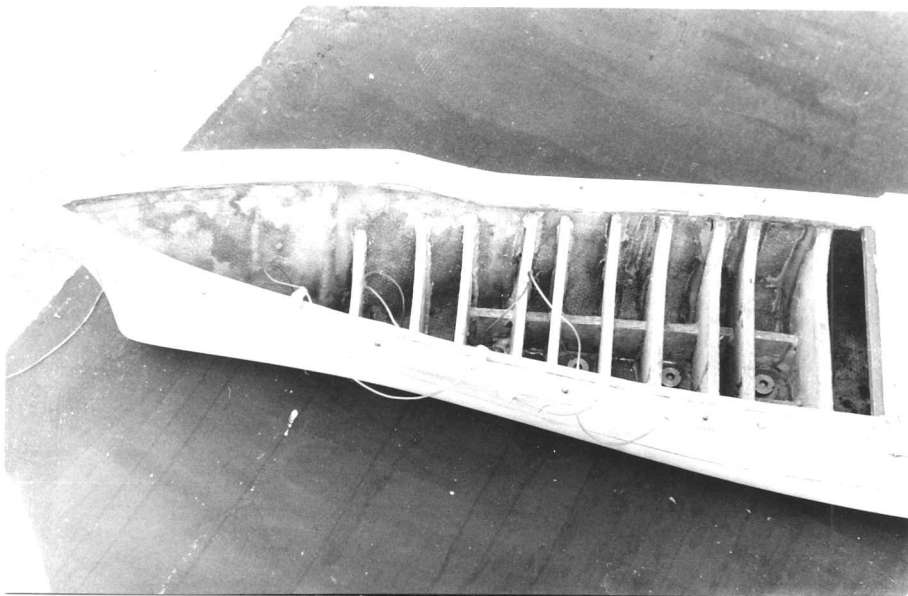
Bild 40

Anhang 2: Bild Nr. I - IX



Meßstellen  
am Modell

Bild I



Aussteifung  
des Modells

Bild II



Modell für  
Dreh-Fall-  
versuch  
ausgerüstet

Bild III

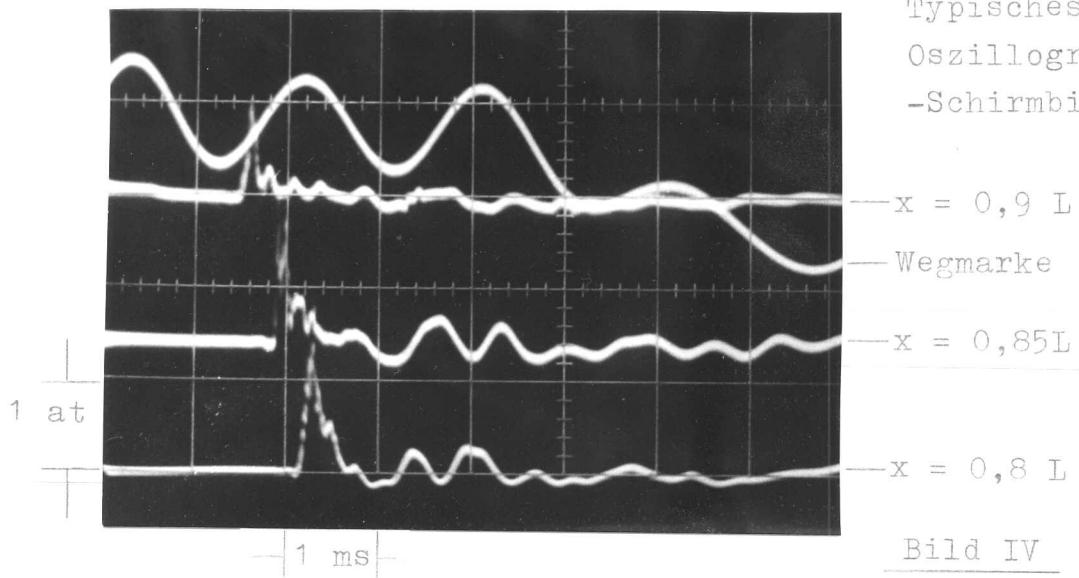


Bild IV

Nichtkompensierte Druckaufnehmer:

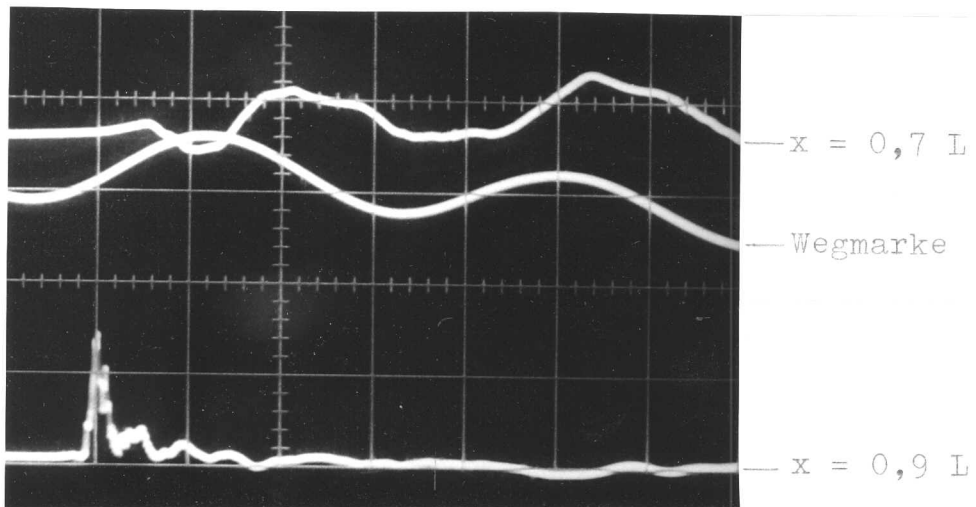


Bild V

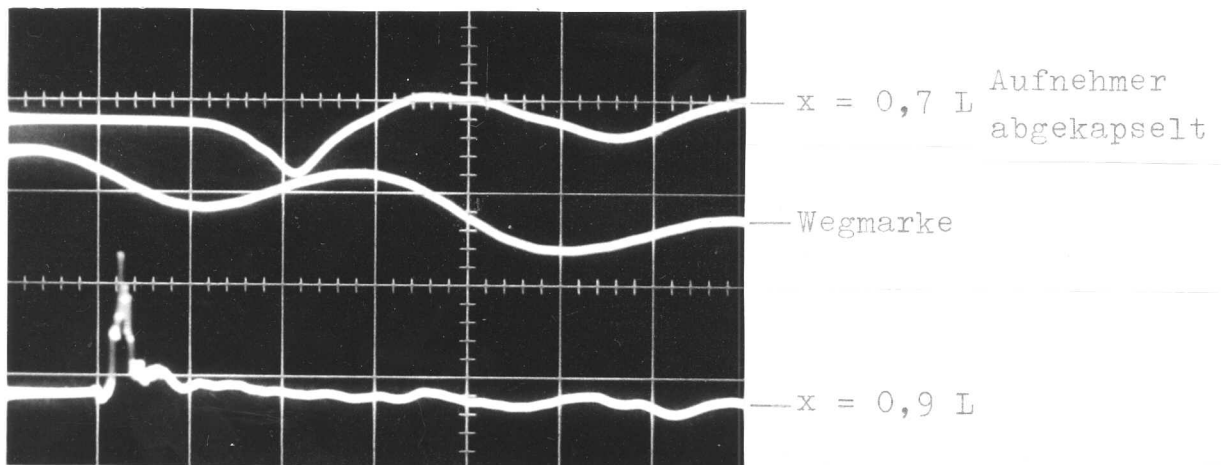
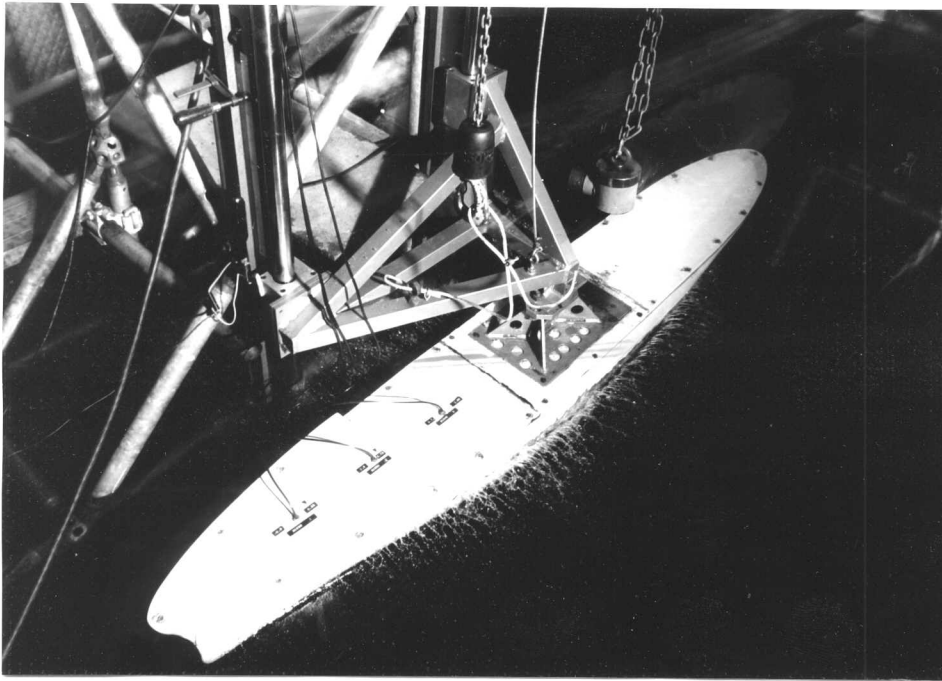
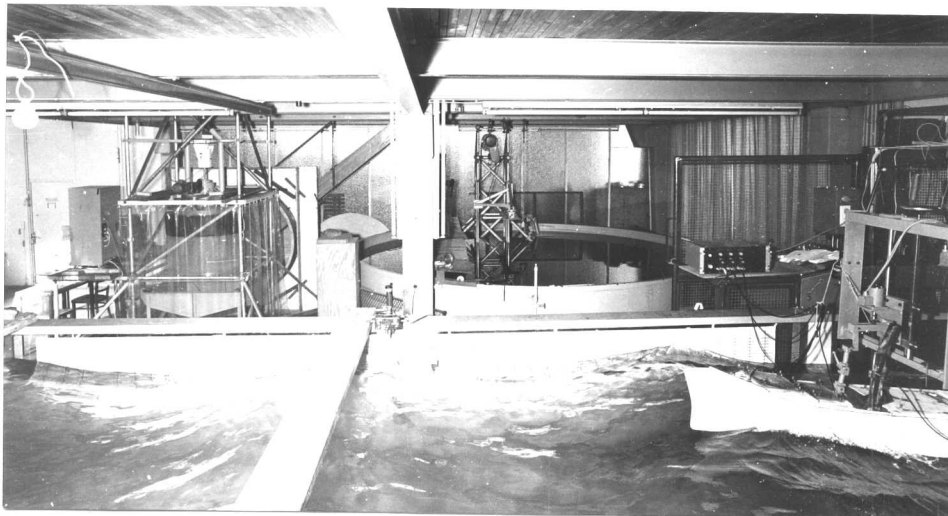


Bild VI



Fallversuchseinrichtung

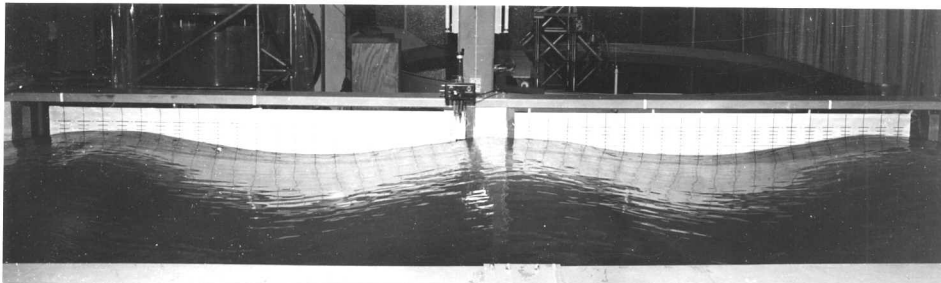
Bild VII



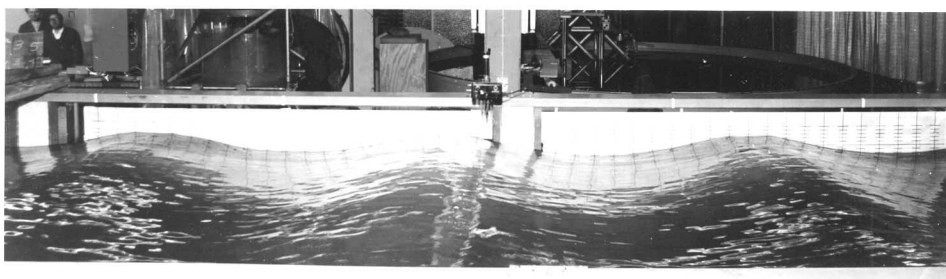
Modell an der Dreh-Fall-einrichtung festgehalten in Wellen

Bild VIII

Regelmäßige Wellen:



$\lambda = 2,0\text{m}$   $H = 10\text{cm}$



$\lambda = 1,5\text{m}$   $H = 10\text{cm}$

Bild IX