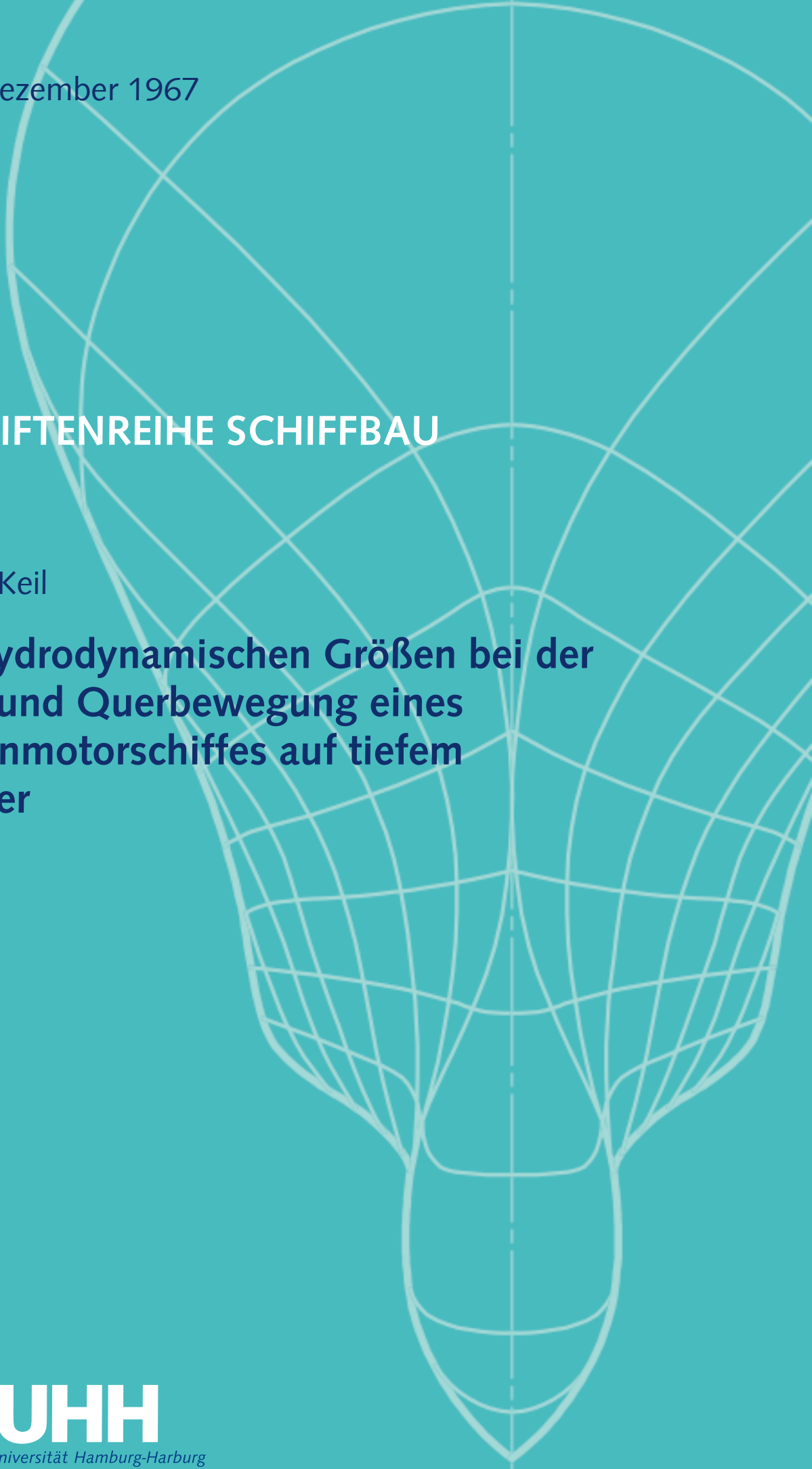
200 | Dezember 1967

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Harald Keil

Die hydrodynamischen Größen bei der Roll- und Querbewegung eines Küstenmotorschiffes auf tiefem Wasser



TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 200

Die hydrodynamischen Größen bei der Roll- und Querbewegung eines Küstenmotorschiffes auf tiefem Wasser

Harald Keil

Hamburg, Dezember 1967

Die hydrodynamischen Größen bei der Roll- und Querbewegung eines Kümo-Modells auf tiefem Wasser

I.	Einleitung	Seite 1
II.	Theoretische Zusammenhänge	1
III.	Modellversuche	2
	1. Versuchseinrichtung	2
	2. Modell und Aufbau	3
	3. Versuchsdurchführung und -auswertung	4
IV.	Ergebnisse und deren Vergleiche	6
	1. Einzelgrößen	6
	2. Resultierendes Trägheitsmoment	10
V.	Schluß	11
VI.	Symbole	13
VII.	Literatur	14
VIII.	Abbildungen	15

Dieses Vorhaben wurde im Auftrage des Germanischen Lloyd durchgeführt.

I. Einleitung

Sinn der Untersuchungen, über die hier berichtet wird, war es, experimentell im Modellversuch die hydrodynamischen Größen bei der Roll- und Querbewegung eines Schiffes zu bestimmen und mit den Ergebnissen einer nach der Streifenmethode mit den Ansätzen von Grim [1,2,3] durchgeführten Rechnung zu vergleichen. Als Beispiel wurde ein Küstenmotorschiff gewählt, da für diesen Schiffstyp die Kenntnis des hydrodynamischen Trägheitsmomentes aus folgendem Grund am wichtigsten erscheint. Küstenmotorschiffe sind die am meisten stabilitätsgefährdeten Schiffe. Deshalb ist es z.B. in der Holzfahrt üblich und auch von der Aufsichtsbehörde vorgeschrieben, während des Betriebes die metazentrische Höhe zu kontrollieren. Das geschieht normalerweise durch einen Rollversuch. Sinnvoll ist dies jedoch nur, wenn die neben dem $\overline{MG}$ die Rollzeit bestimmende Größe, das Trägheitsmoment, genügend genau bekannt ist. Es setzt sich aus dem Massenträgheitsmoment des Schiffes plus Ladung und dem hydrodynamischen Trägheitsmoment zusammen. In der vorliegenden Arbeit wird nur das hydrodynamische Trägheitsmoment betrachtet.

II. Theoretische Zusammenhänge

Wenn die Dämpfung gleich Null ist, bedeutet die freie Rollschwingung eines Schiffes eine reine Drehbewegung um den Pumkt D_{res} (Abb.1). Die Lage dieses Punktes ist abhängig von der Beladung des Schiffes und somit variabel. Er ist nicht mit dem Gewichtsschwerpunkt G identisch. Es ist vernünftiger, einen festliegenden Punkt als Bezugspunkt zu betrachten. Hier soll es der Punkt O sein, der Schnittpunkt der Mittschiffsebene mit der Schwimmwasserlinie. In Bezug auf diesen Punkt stellt die freie Rollschwingung eine gekoppelte Dreh- und Querbewegung dar. Die Differentialgleichungen dafür lauten:

$$(m+m'')\ddot{q} + (m \cdot \overline{OG} + \frac{J''}{h_\varphi})\cdot\ddot{\varphi} = 0 \qquad (1)$$

$$(J+J'')\cdot\ddot{\varphi} + g.m.\overline{MG} \cdot \varphi + m.\overline{OG}\cdot\ddot{q} + m''.h_q.\ddot{q} = 0 \qquad (2)$$

(Verzeichnis der Bezeichnungen siehe Abschnitt VI)
Auch die Trägheitsmomente und Hebel sind auf O bezogen.

Die Lage des resultierenden Drehpunktes D_{res} ergibt sich aus der Kombination von (1) und (2) zu

$$\overline{OD}_{res} = \frac{m.\overline{OG} + \frac{J''}{h_\varphi}}{m + m''} \qquad (3)$$

(Abstände sind vom Bezugspunkt nach unten positiv).

Das auf den resultierenden Drehpunkt D_{res} bezogene resultierende Trägheitsmoment läßt sich gleichfalls aus (1) und (2) bestimmen:

$$J_{res} = J'' - \frac{(m.\overline{OG}+m''.h_q)(m.\overline{OG}+\frac{J''}{h_\varphi})}{m + m''} + J$$

$$= J_\Theta + m.\overline{OG}^2 + J'' - \frac{(m.\overline{OG}+m''h_q)(m.\overline{OG} + \frac{J''}{h_\varphi})}{m + m''} \qquad (4)$$

Die Vernachlässigung der Dämpfung ist für die praktische Anwendung zulässig.

III. Der Modellversuch

1.1. Versuchseinrichtung

Für die Bestimmung von hydrodynamischen Massen und Trägheitsmomenten wurde auf Veranlassung von Prof. Weinblum am Institut für Schiffbau ein Oszillator entwickelt [4] . Dieser Oszillator (Abb. 2und 3) erlaubt eine Bewegung eines Modells in drei

Freiheitsgraden, zwei translatorische Bewegungen und eine Drehbewegung. Die Phasenlage der einzelnen Bewegungen zueinander ist beliebig wählbar. Da der Antrieb über Kurbelschleifen erfolgt, sind die Bewegungen harmonisch. Der mögliche Frequenzbereich reicht von 0,1 Hz bis 1,5 Hz. Bei der Drehbewegung können Amplituden bis 7^{o}, bei den Translationnen bis 60 mm eingestellt werden. Zur Messung der Kräfte und Momente dient eine mit Induktivgebern bestückte Dreikomponentenwaage (Abb.4), die ebenfalls am Institut für Schiffbau gebaut wurde. Hauptproblem bei dieser Konstruktion war, daß einerseits große Kräfte übertragen werden müssen, ohne daß ein Moment mitübertragen wird, und andererseits ein Moment eingeleitet werden muß, ohne daß eine Kraft übertragen wird.

Die Bewegung wird nicht analog aufgezeichnet, sondern es werden nur die Nulldurchgänge markiert. Dies geschieht durch Mikroschalter, die im Nulldurchgang der Bewegungen eine Meßspannung umpolen.

2. Modell und Aufbau

Als Versuchsobjekt diente das Araldítmodell eines Küstenmotorschiffes mit Schlingerkielen ohne Ruder im Maßstab $1:33^{1}/3$.

Hauptabmessungen der Großausführung:

$$L_{pp} = 55,30 \text{ m}$$
$$B = 10,44 \text{ m}$$
$$T = 3,90 \text{ m}.$$

Den Spantriß zeigt Abb.5.

Die Seitenhöhe des Modells wurde um 150 mm erhöht, um die Meßwaage vor Wasser zu schützen.

Bei der Herstellung des Modells wurde darauf geachtet, daß es so leicht gebaut wurde, wie es die Festigkeit eben zuließ. Auftrieb ist deshalb nicht gleich Gewicht.

Sowohl die hydrodynamische Masse als auch das auf den Punkt O bezogene hydrodynamische Trägheitsmoment muß unabhängig vom Drehpunkt sein. Um dies zu zeigen, wurden die Untersuchungen für drei verschiedene Drehpunkte durchgeführt, indem zwischen Dreikomponentenwaage und Modell verschiedene Aluminiumstücke geschraubt wurden (Abb.6).

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

Für die durch den Oszillator erzwungene Bewegung des Modells sind die Differentialgleichungen ähnlich wie (1) und (2), nur ist die Erregung ungleich Null, und alle Größen sind auf den jeweiligen Drehpunkt D und nicht auf O bezogen. Wegen der besonderen Konstruktion der Dreikomponentenwaage ist die translatorisch bewegte Körpermasse nicht identisch mit der Drehmasse des Körpers. Es werden deshalb Indizierungen Q (Querbewegung) und R(Rollbewegung) eingeführt.

$$(m_Q+m'')\ddot{q}+(m'_R\cdot\overline{DG}'_R+\frac{J''}{h_\varphi})\cdot\ddot{\varphi} = \overline{P}\cdot\cos(\omega t+\varepsilon_1) \qquad (5)$$

$$(J+J'')\cdot\ddot{\varphi} + A\cdot\overline{MD}\cdot\varphi + m_R\cdot g\cdot\overline{DG}_R\cdot\varphi + m_R\cdot\overline{DG}_R\cdot\ddot{q}+m''\cdot h_q\cdot\ddot{q}=\overline{M}\cos(\omega t+\varepsilon_2) \qquad (6$$

Zur Vereinfachung der Auswertung kann man die gekoppelte Bewegung auftrennen und zuerst eine reine Drehbewegung $\varphi=\overline{\varphi}\cdot\cos\omega t$, später eine reine Querbewegung $q=\overline{q}\cdot\cos\omega t$ erzeugen. Kraft P, Moment M, Bewegungsamplitude $\overline{q}$ bzw. $\overline{\varphi}$ und Phasen ε werden im Versuch bestimmt, und zwar zunächst in Luft zur Ermittlung

der Körpermassen und -schwerpunkte. In Luft sind Bewegung und Kraft bzw. Moment in Gegenphase.

Die Bestimmungsgleichungen für die gesuchten Größen in Luft lauten dann:

Reine Querbewegung ($\varphi = \ddot{\varphi} = 0$):

$$m_Q = \frac{\overline{P}_{QL}}{\overline{q}\cdot\omega^2} \tag{7}$$

$$m_R \cdot \overline{DG}_R = \frac{\overline{M}_{QL}}{\overline{\varphi}\omega^2} \tag{8}$$

Reine Drehbewegung ($q = \ddot{q} = 0$):

$$m'_R \cdot \overline{DG}'_R = \frac{\overline{P}_{RL}}{\overline{\varphi}\cdot\omega^2} \tag{9}$$

$$J = \frac{\overline{M}_{RL} + g \cdot m_R \cdot \overline{DG}_R \cdot \overline{\varphi}}{\overline{\varphi}\cdot\omega^2} \tag{10}$$

Im Wasser ergibt sich entsprechend:

Reine Querbewegung ($\varphi = \ddot{\varphi} = 0$):

$$m'' = -\frac{\overline{P}_Q \cdot \cos\varepsilon_{1Q}}{\overline{q}\cdot\omega^2} - m_Q \tag{11}$$

$$m'' \cdot h_q = -\frac{\overline{M}_Q \cdot \cos\varepsilon_{2Q}}{\overline{q}\cdot\omega^2} - m_Q \cdot \overline{DG}_Q \tag{12}$$

Reine Drehbewegung ($q = \ddot{q} = 0$):

$$J'' = \frac{A(\overline{MG}_R - \overline{DG}_R)\cdot\overline{\varphi} + g \cdot m_R \cdot \overline{DG}_R \cdot \overline{\varphi} - \overline{M}_R \cdot \cos\varepsilon_{2R}}{\overline{\varphi}\cdot\omega^2} - J \tag{13}$$

$$\frac{J''}{h_\varphi} = \frac{\overline{P}_R \cdot \cos\varepsilon_{1R}}{\overline{\varphi}\cdot\omega^2} - m'_R \cdot \overline{DG}'_R \tag{14}$$

Die Ergebnisse der reinen Drehbewegung in Luft zeigt Abb.7. Die größte Abweichung eines Meßpunktes von der durch die Punkte gezogenen Geraden beträgt ca. 3%. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinatenachse ergibt nach Gleichung (10) das statische Moment, also $M_{RL}(\omega = 0) = g.m_R.\overline{DG}_R$. Dieses Moment ist durch eine Wägung und eine Momentenrechnung kontrolliert worden.

Die Lage des Metazentrums und der Auftrieb ergaben sich aus dem Kurvenblatt des Modells (Abb.8).

Je eine typische Registrierung zeigt Abb.9 für die Querbewegung und Abb.10 für die Rollbewegung.

Die Untersuchungen erstrecken sich auf sieben Tiefgänge von $T = 0{,}6T_{CWL}$ bis $T = 1{,}35\ T_{CWL}$ und auf Frequenzparameter bis $\frac{\omega^2 B}{2g} = 1{,}3$ (Den Zusammenhang zwischen dem Frequenzparameter und der Rolleigenperiode der Großasuführung ist in Abb.11 dargestellt. Zur Überprüfung der Linearität wurde die Bewegungsamplitude variiert.

IV. Ergebnisse und deren Vergleich

1. Einzelergebnisse:

Alle Versuchsergebnisse sind nach dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz auf die Großausführung umgerechnet und in den Abb. 12 bis 57 zusammen mit den nach der zweidimensionalen Theorie von Grim berechneten Werten über dem Frequenzparameter aufgetragen. Die gemessenen hydrodynamischen Massen (Abb. 12 bis 18) sind bei den kleinen Frequenzparametern bis ca. 10% kleiner, als die Rechnung ergibt. Das kann darauf zurückgeführt werden, daß in der Rechnung Längsströmungen vernachlässigt werden. Der Unterschied muß mit wachsendem Frequenzparameter kleiner werden,

da bei den größeren Frequenzparametern nicht genügend Zeit für den Druckausgleich über die Enden des Modells bleibt.

Die Abb. 19 bis 36 zeigen das auf den jeweiligen Drehpunkt D_i bezogene durch die örtliche Beschleunigung dividierte Moment bei der Querbewegung $m''.h_q$ und die durch die Winkelbeschleunigung dividierte Querkraft bei der Rollbewegung J''/h_φ für die drei untersuchten Drehpunkte.

Die auf den jeweiligen Drehpunkt bezogenen hydrodynamischen Trägheitsmomente J" sind in den Abbildungen 37 bis 57 aufgetragen.

In allen Diagrammen sind die aus den Meßpunkten nach den Gleichungen (12) bis (14) berechneten Werte eingetragen. Daraus sind Mittelwertkurven bestimmt worden. Strakt man die gemessenen Kräfte und Momente aus und rechnet in (12) bis (14) mit den ausgestrakten Werten, so müssen sich die gleichen Mittelwertkurven ergeben. Beide Wege sind beschritten worden.

In allen Fällen sind die gemessenen Werte $m''.h_q$ und J''/h_φ größer als nach der zweidimensionalen Theorie. Das ist sicher auf die Schlingerkiele zurückzuführen, die in der Rechnung noch nicht berücksichtigt sind. Für das hydrodynamische Trägheitsmoment J" gilt das entsprechend. Die sich aus der Rechnung ergebende geringe Differenz zwischen $m''.h_q$ und J''/h_φ zeigen die Meßpunkte nicht im gleichen Maß.

Rechnet man die für die drei verschiedenen Drehpunkte ermittelten Werte $m''.h_q$, J''/h_φ und J" auf einen gemeinsamen Punkt um, so müssen alle drei Versuchsreihen das gleiche Ergebnis liefern.

Für diese Umrechnung ergibt sich nun Folgendes:
Nach (5) und (6) ist Kraft und Moment bezogen auf den Punkt D_1 (die Indizierung Q und R kann nun natürlich entfallen):

$$P_1 = (m+m'')\ddot{q} + m.\overline{D_1G}\cdot\ddot{\varphi} + \frac{J_1''}{h_\varphi}\cdot\ddot{\varphi} \qquad (5a)$$

$$M_1 = (J_1+J_1'')\cdot\ddot{\varphi} + A.\overline{MG}\cdot\varphi + m.\overline{D_1G}\ddot{q}_1 + m''.h_{q_1}.\ddot{q}_1 \qquad (6a)$$

Mit den in Abb.1 festgelegten Vorzeichen ist weiter:

$$q_1 = q_2 + \overline{D_2D_1}\cdot\varphi = q_2 - \overline{D_1D_2}\cdot\varphi$$

$$\overline{D_1G} = \overline{D_2G} + \overline{D_1D_2} = \overline{D_2G} - \overline{D_2D_1}$$

$$h_{q_1} = h_{q_2} + \overline{D_1D_2} = h_{q_2} - \overline{D_2D_1}$$

Der erste Buchstabe einer Streckenangabe bezeichnet den betrachteten Punkt; das Vorzeichen ergibt sich durch die Lage des durch den zweiten Buchstaben bezeichneten Punktes relativ zum ersten. $\overline{D_1D_2}$ ist also eine positive Größe, wenn D_1 oberhalb D_2 liegt; $\overline{D_2D_1}$ hingegen ist dann negativ.

$$P_2 = (m+m'')\ddot{q}_2 + m.\overline{D_2G}\cdot\ddot{\varphi} + \left(\frac{J_1''}{h_{\varphi_1}} + m''\overline{D_2D_1}\right)\cdot\ddot{\varphi} \qquad (5b)$$

$$M_2 = M_1 + P_1.\overline{D_2D_1} = \left(J_1 + 2m.\overline{D_2G}.D_2D_1 - m,\overline{D_2D_1}^2\right)\cdot\ddot{\varphi} +$$

$$+ A.\overline{MG}.\varphi + m.\overline{D_2G}.\ddot{q}_2 + \left[J_1'' + \left(\frac{J_1''}{h_{\varphi_1}} + m''h_{q_1} + m''.\overline{D_2D_1}\right)\overline{D_2D_1}\right]\ddot{\varphi} + m''.h_{q_2}.\ddot{q}_2 \qquad (6b)$$

So erhält man für die Umrechnung:

$$m''.h_{q_2} = m''h_{q_1} + m''\overline{D_2D_1} \qquad (12a)$$

$$J_2'' = J_1'' + \left(\frac{J_1''}{h_{\varphi_1}} + m''h_{q_1} + m''\overline{D_2D_1}\right)\overline{D_2D_1} \qquad (13a)$$

$$\frac{J_2''}{h_{\varphi_2}} = \frac{J_1''}{h_{\varphi_1}} + m''.\overline{D_2D_1} \qquad (14a)$$

Die Ergebnisse dieser Umrechnungen auf den Punkt D_2 zeigen die Abb. 58 bis 61 für $m''.h_q$, die Abb. 62 bis 64 für J''/h_φ und die Abb. 65 bis 68 für J'' aufgetragen über dem Frequenzparameter. Dieser Umrechnung wurdendie durch die Meßpunkte gestrakten Kurven zugrundegelegt.

Für den Trägheitskoeefizienten des Momentes infolge der Querbewegung $m''.h_q$ ergibt die Umrechnung eine recht gute Übereinstimmung zwischen den auf Punkt D_2 und den auf den D_3 bezogenen Werten. Die aus den auf Punkt D_1 bezogenen Größen umgerechneten Werte weichen bis zu 15% ab. Diese Abweichung erscheint beträchtlich, ist aber erklärlich, wenn man berücksichtigt, daß die auf Punkt D_1 bezogenen Werte von der Genauigkeit her die unzuverlässigsten sind, da das Verhältnis der Summanden in (12) zueinander wesentlich ungünstiger ist als für die auf D_2 und D_3 bezogenen Werte. Die durch die Differenzbildung großer Zahlen bedingten Unsicherheiten kommen dadurch mehr zum Tragen. Dies sollen die Abb. 69 bis 71 veranschaulichen, in denen die sich aus der Messung ergebenden Summanden in (12) im Modellmaßstab aufgetragen sind.

Insgesamt gesehen darf man sagen, daß die reine Querbewegung sowohl in bezug auf das Moment als auch bezüglich der Querkraft (aus der sich ja nach (11) die hydrodynamische Masse ergibt) im Rahmen der gemachten Einschränkungen recht gute Ergebnisse liefert.

Schweiriger ist die Untersuchung der reinen Drehbewegung. Die Berechnung des Trägheitskoeffizienten der Kraft aus der Drehbewegung J''/h_φ nach (14a) (Abb.62-64) liefert divergente bzw. streuende Kurven, was zum Teil auf das ungünstige Verhältnis der Summanden in (14a) zueinander und darauf zurückgeführt werden kann, daß die bei dem vorliegenden Maßstab auftretenden Kräfte einfach zu klein sind, um mit genügender Genauigkeit bestimmt zu werden. Die verläßlichsten Werte sind hier die auf Punkt D_1 bezogenen.

Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für das hydrodynamische Trägheitsmoment J" nach (13a). Das liegt nicht allein daran, daß die Summe der Schwankungen von $m''h_q$ und J''/h_φ hier mit eingeht. Vielmehr können die hydrodynamischen Trägheitsmomente J''_1, J''_2 und J''_3 mit Fehlern behaftet sein, da sich Unkorrektheiten bei der Versuchsdurchführung hier sehr negativ auswirken. Um wieder das Verhältnis der Summanden in (13) zueinander zu zeigen, sind diese in den Abb. 72 bis 74 aufgetragen. Daraus kann man schließen, daß das auf den Punkt D_3 bezogene hydrodynamische Trägheitsmoment das zuverlässigste ist; bei dessen Umrechnung auf Punkt D_2 geht jedoch $J''_3/h_{\varphi 3}$ ein, das großen Schwankungen unterliegt.

2. Resultierendes Trägheitsmoment:

Aus Gleichung (4) ergibt sich das resultierende (kleinste) Trägheitsmoment J_{res} um den wirklichen Drehpunkt der freien Schwingung D_{res}. Es ist für konstanten Tiefgang abhängig vom Massenträgheitsmoment des Schiffes $J_\odot$ und der metazentrischen Höhe $\overline{MG}$.

Für eine metazentrische Höhe von $\overline{MG}$ = 0,70 m ist in den Abb. 75 und 76 für verschiedene Frequenzparameter die durch den hydrodynamischen Druck bedingte Erhöhung des Trägheitsmomentes $J_{res} - J_\odot$ über dem Tiefgang aufgetragen. Die verschiedenen Punkte bedeuten die bei dem jeweiligen Drehpunkt erzielten Ergebnisse, die ausgezogene Linie die gerechneten Werte. Die Punkte streuen sehr.

Die Abb.77 bis 79 zeigen die Entfernungen vom Punkt D_2 zum resultierenden Drehpunkt $\overline{D_2D}_{res}$ für eine metazentrische Höhe und verschiedene Frequenzparameter als Funktion des Tiefgangs. Diese Werte schwanken natürlich im gleichen Maß wie J''/h_φ .

Eingezeichnet ist noch die Größe $\overline{D_2G}$, der Abstand von D_2 zu dem Punkte, um den sich das Schiff drehen würde, wenn kein hydrodynamischer Einfluß vorhanden wäre.

Die interessantesten Ergebnisse zeigen schließlich die Abb. 80 bis 87. Hier sind unter Variierung des Massenträgheitsmomentes, der metazentrischen Höhe und des Frequenzparameters die sich ergebenden resultierenden Trägheitsmomente über dem Tiefgang dargestellt.

Die Abb. 80 bis 82 veranschaulichen für einen Massenträgheitsradius $i_\odot = 0{,}35B$ den Einfluß der metazentrischen Höhe bei einem Frequenzparameter von $\frac{\omega^2 \cdot B}{2g} = 0{,}2$. Zwischen Abb. 82 und Abb. 83 ist der Frequenzparameter variiert.

Die Abb. 84 bis 87 zeigen die gleichen Größen unter Zugrundelegung eines Massenträgheitsradius von $i_\odot = 0{,}40B$.

Diese Diagramme weisen auch eine Schwankung der Meßpunkte bis 10% auf, bestätigen jedoch, daß der Einfluß des hydrodynamischen Drucks auf das resultierende Trägheitsmoment und damit auf die Rolleigenperiode des Schiffes auf tiefem Wasser nicht sehr groß ist.

V. Schluß

Es wurde über Versuche berichtet, die zur Bestimmung des hydrodynamischen Einflusses auf das Trägheitsmoment beim rollenden Schiff durchgeführt wurden. Trotz großer Anstrengungen konnten leider die Einzelgrößen nicht mit der gewünschten Genauigkeit gemessen werden. Das hier gesteckte Ziel war aber, den Einfluß des hydrodynamischen Drucks auf das resultierende Trägheitsmoment zu untersuchen. In bezug darauf konnte gezeigt werden, daß die Abweichungen der Messung von der zweidimensionalen

Rechnung weniger als 10% betragen, für die praktische Anwendung die Rechnung also ausreichende Resultate liefert, zumal sie noch durch eine Korrektur für die Dreidimensionalität erweitert werden kann.

Obwohl der Verfasser selbst mit der Genauigkeit der experimentellen Ergebnisse nicht zufrieden ist, ist doch ein Urteil über die Größe des hydrodynamischen Trgäheitsmomentes möglich. Der Bericht wird daher zunächst erstattet. Es ist jedoch beabsichtigt, einen Teil der Messungen zu wiederholen und dabei zu versuchen, genauere Ergebnisse zu erzielen.

Dank gebührt Herrn Dorn, der bei Versuchsdurchführung und -auswertung vor der sehr umfangreichen und mühevollen Arbeit nicht kapitulierte, sondern wesentlich zur Beendigung des Vorhabens beitrug.

VI. Symbole

A	Auftrieb
B	Schiffsbreite
J	Massenträgheitsmoment des Schiffes
$J_{\odot}$	auf Schwerpunkt bezogenes Massenträgheitsmoment
J"	hydrodynamisches Trägheitsmoment
M	Moment um jeweiligen Bezugspunkt
P	Querkraft
T	Tiefgang
g	Erdbeschleunigung
h_q	Hebel des hydrodynamischen Momentes infolge der Querbewegung
h_φ	Abstand des Angriffspunktes der hydrodynamischen Querkraft infolge der Drehbewegung vom jeweiligen Bezugspunkt
$i_{\odot}$	Trägheitsradius bezogen auf Schwerpunkt
m	Masse des Schiffes
m"	hydrodynamische Masse
q	Ausschlag der Querbewegung
t	Zeit
ε	Phasenverschiebung zwischen Bewegung und Kraft bez. Moment
ε_{TP}	gerätebedingte Phasenverschiebung im Tiefpaß
φ	Ausschlag der Drehbewegung
ω	Kreisfrequenz

Punktbezeichnungen:

D	Drehpunkt
G	Gewichtsschwerpunkt
M	Metazentrum
O	Schnittpunkt Wasserlinie-Spantsymmetrieebene

Indices:

Q	Querbewegung
R	Drehbewegung

VII. Literatur

[1] Grim, O.:
Berechnung der durch Schwingungen eines Schiffskörpers erzeugten hydrodynamischen Kräfte.
Jahrb. STG Band 47, S. 277 ff, 1953

[2] Grim, O.:
Die hydrodynamischen Kräfte beim Rollversuch.
Schiffstechnik 3, S. 147 ff, 1955

[3] Grim, O. und H.Keil:
Der Einfluß der hydrodynamischen Größen bei Rollversuch.
Schiff und Hafen, 19. Jahrg. Heft 2, S. 82 ff, 1967

[4] Keil, H. und H. Thiemann:
Ein Oszillator zur Ermittlung hydrodynamischer Massen und Dämmpfungswerte.
IfS-Bericht No.120, 1963

[5] Tamura, K.:
The Calculation of the Hydrodynamical Forces in Horizontal Direction and the Moments Acting on the Two Dimensional Body.
HSVA-Bericht No. 1235, Hamburg 1961.

VIII. Abbildungen

$\frac{\bar{M}_{RL}}{\bar{\varphi}}$ [cmkp]

500

400

300

Drehpunkt 1

Drehpunkt 2

Drehpunkt 3

200

100

0

-100

$-g \cdot m_{R2} \cdot \overline{D_2 G_{R2}}$

$J_2 \cdot \omega^2$

$-g \cdot m_{R1} \cdot \overline{D_1 G_{R1}}$

$J_1 \cdot \omega^2$

$-g \cdot m_{R3} \cdot \overline{D_3 G_{R3}}$

$J_3 \cdot \omega^2$

0,5

1,0

$\frac{\omega^2 B}{2g}$

Luftversuch

Abb. 7

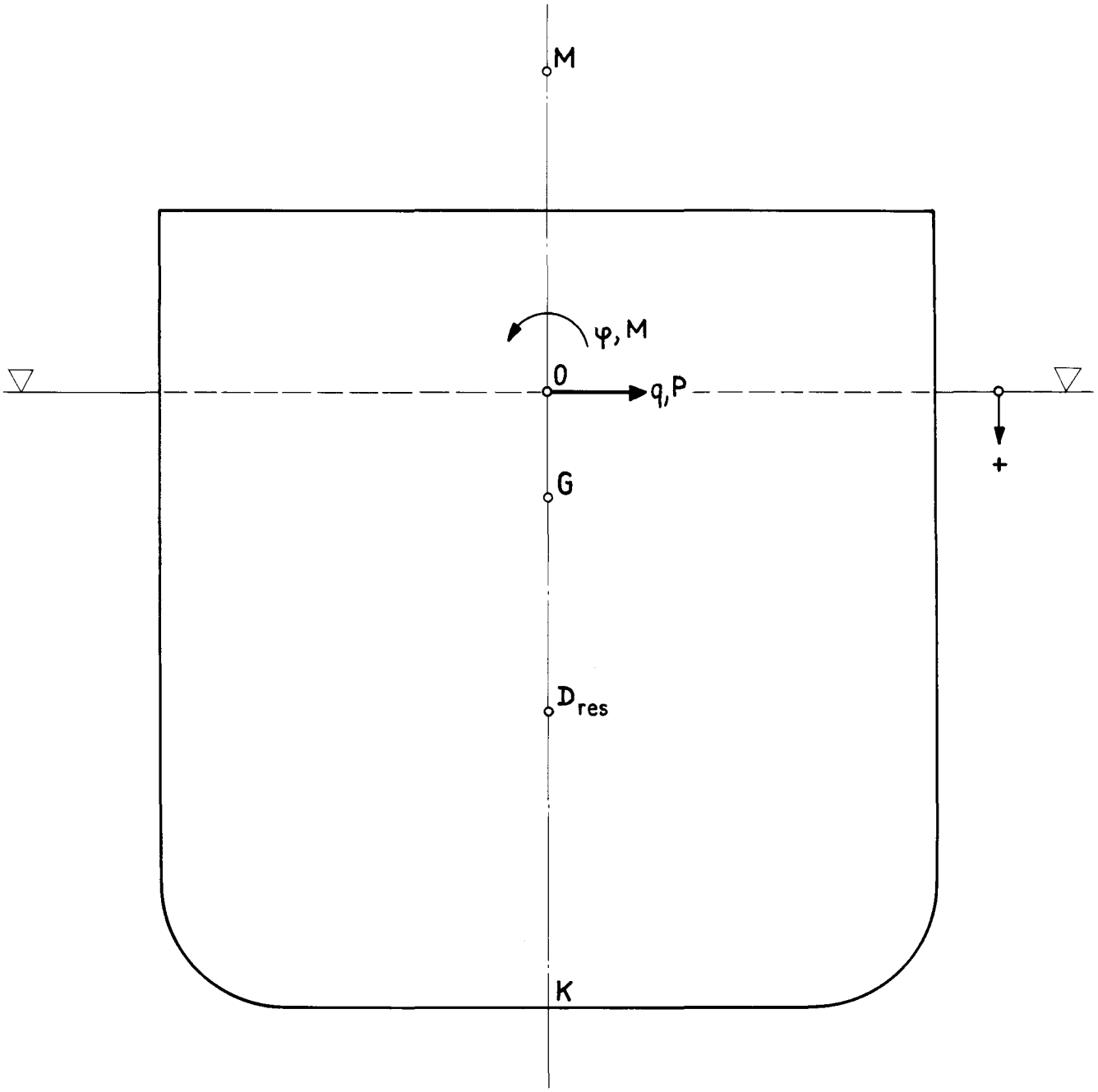


Abb. 1

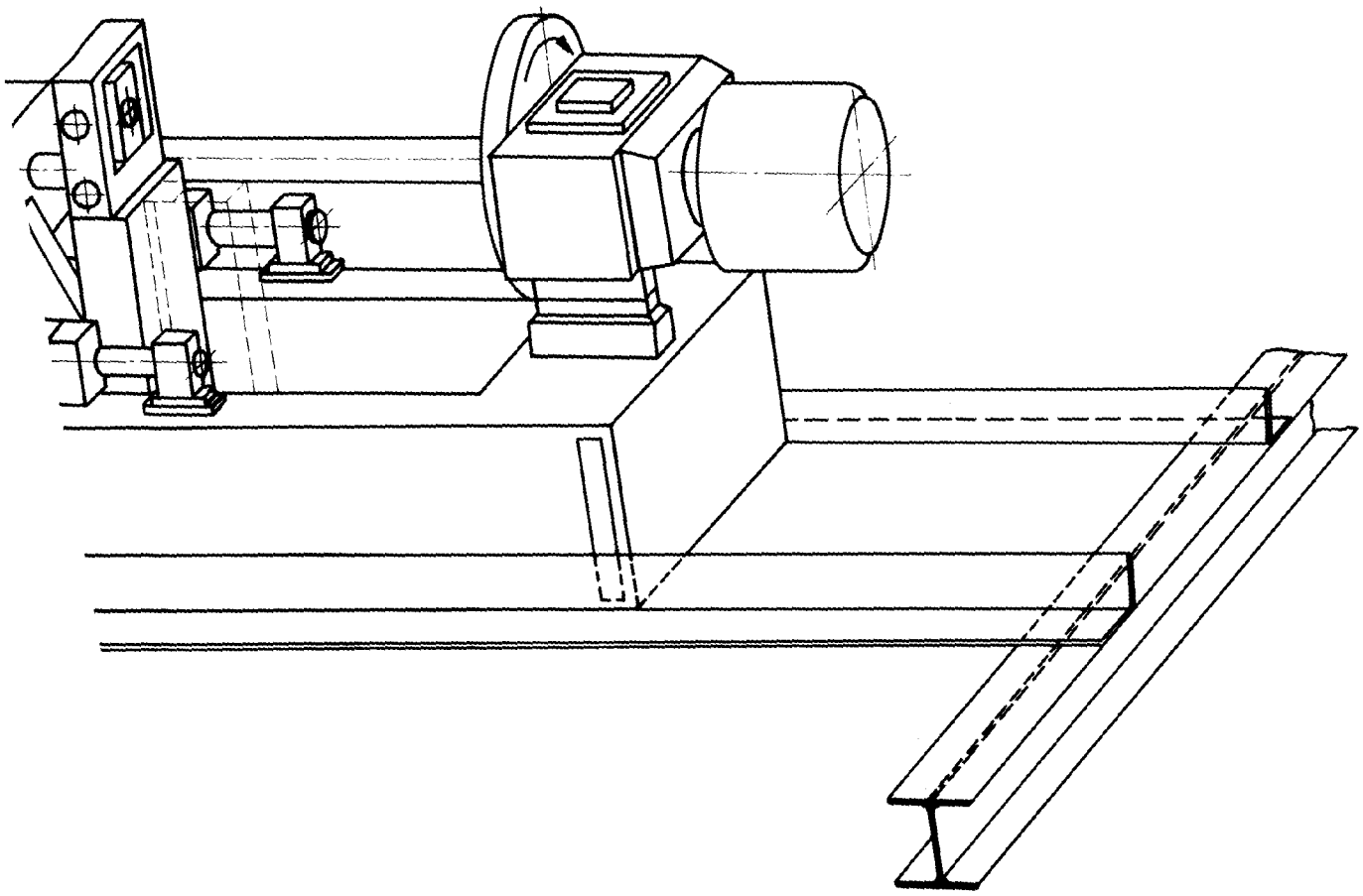
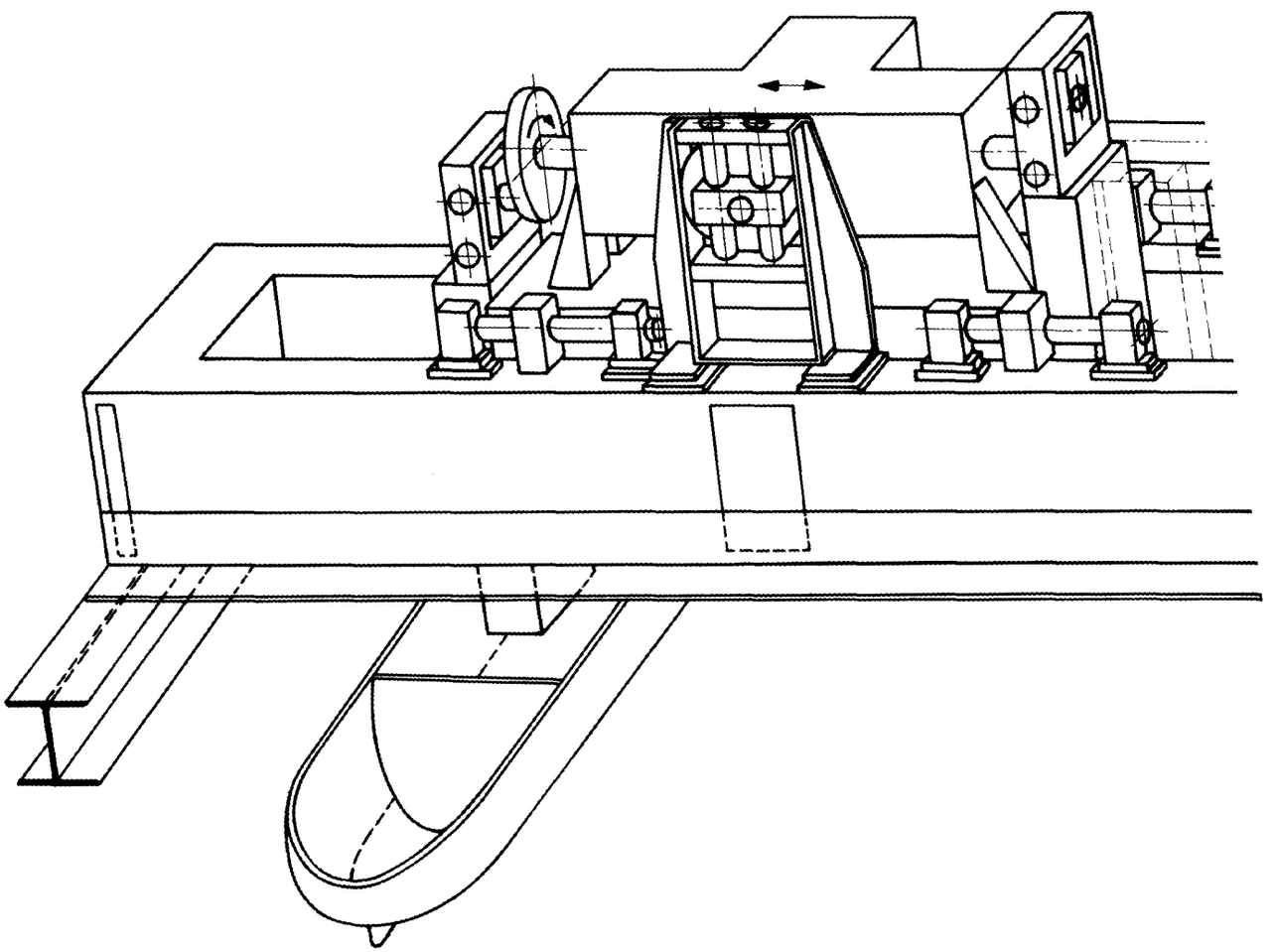


Abb. 2



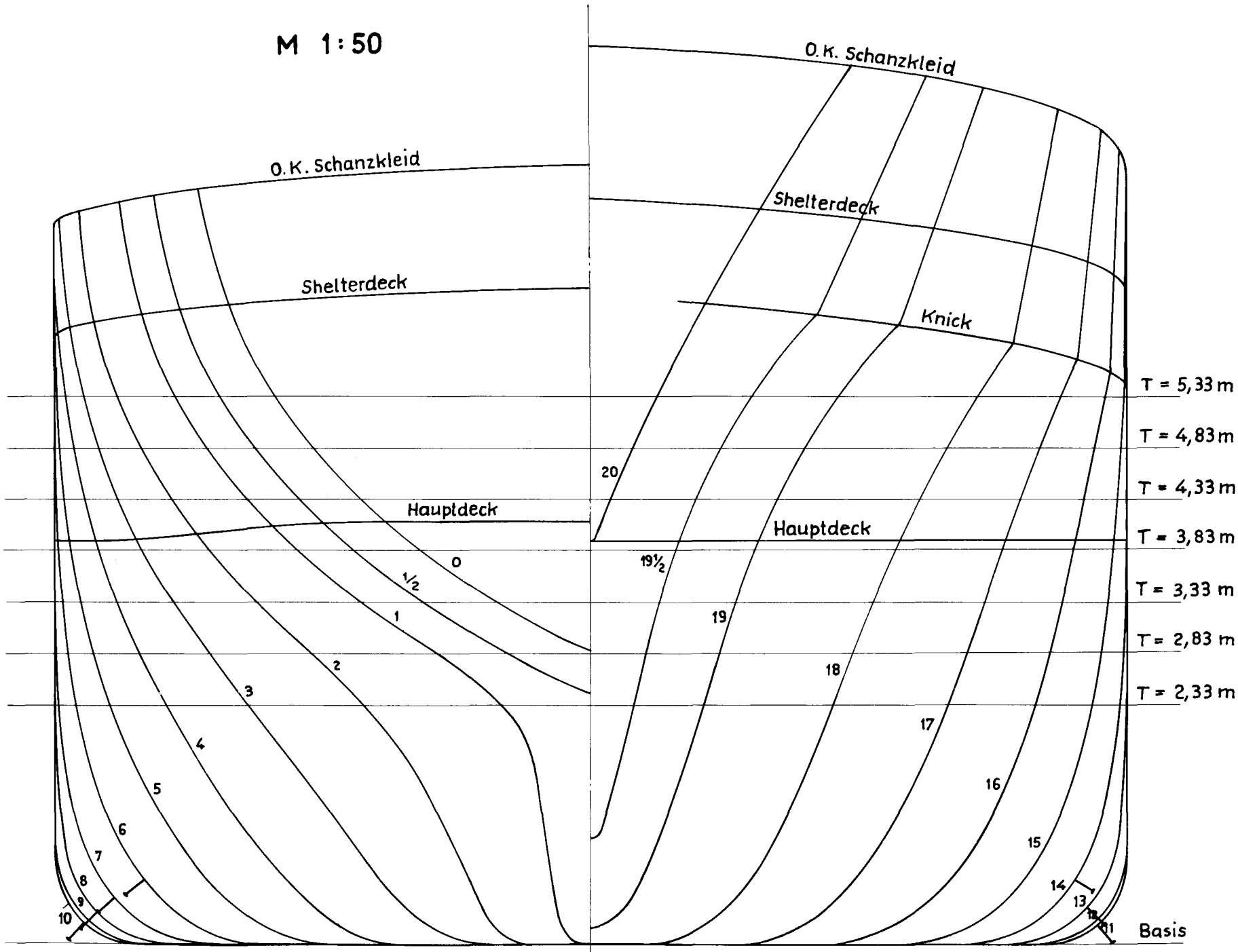

M 1:50
O.K. Schanzkleid
Shelterdeck
Hauptdeck
O.K. Schanzkleid
Shelterdeck
Knick
Hauptdeck
0
1/2
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
20
19½
19
18
17
16
15
14
13
12
11
T = 5,33 m
T = 4,83 m
T = 4,33 m
T = 3,83 m
T = 3,33 m
T = 2,83 m
T = 2,33 m
Basis

Abb. 5

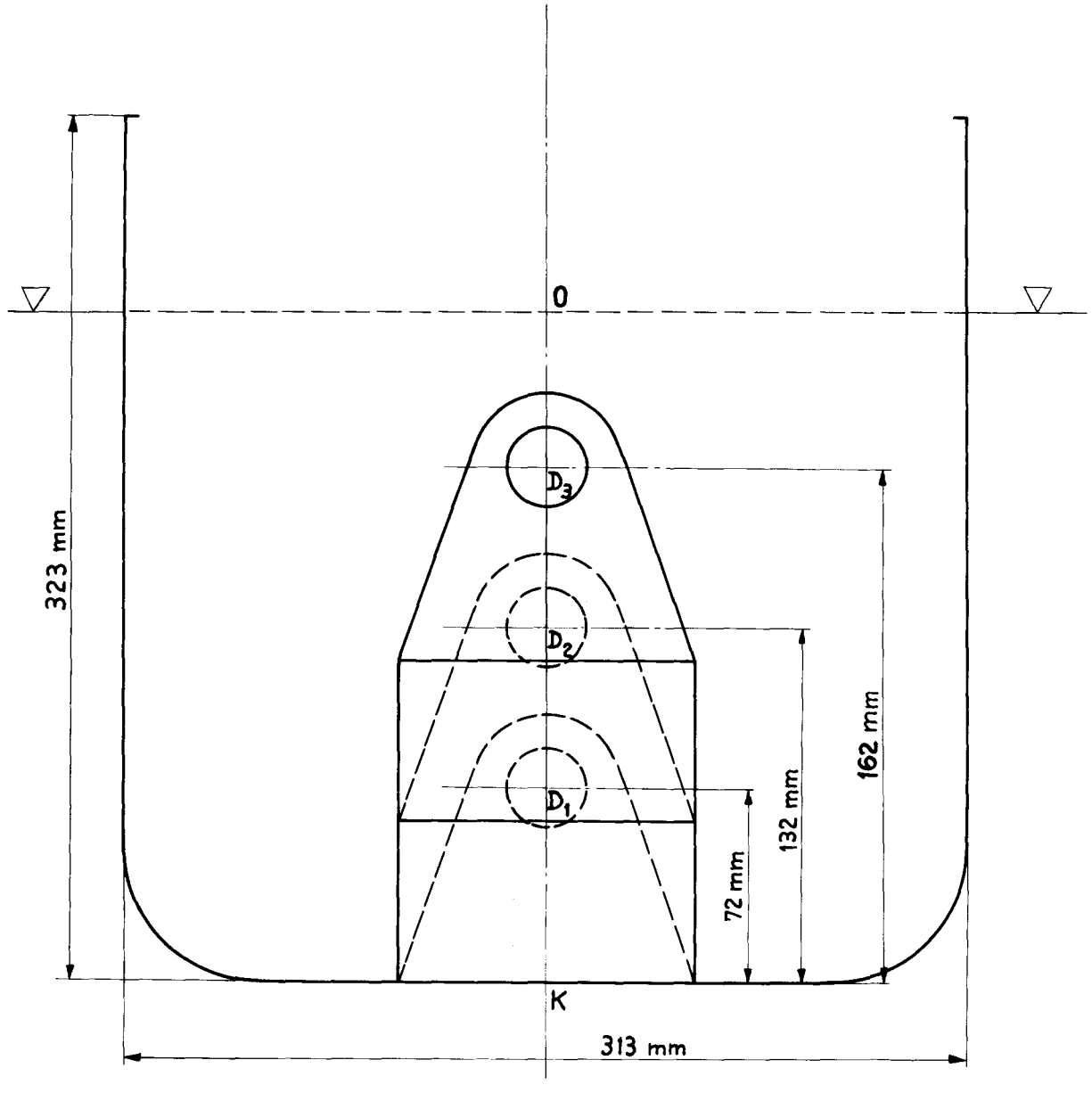


Abb. 6

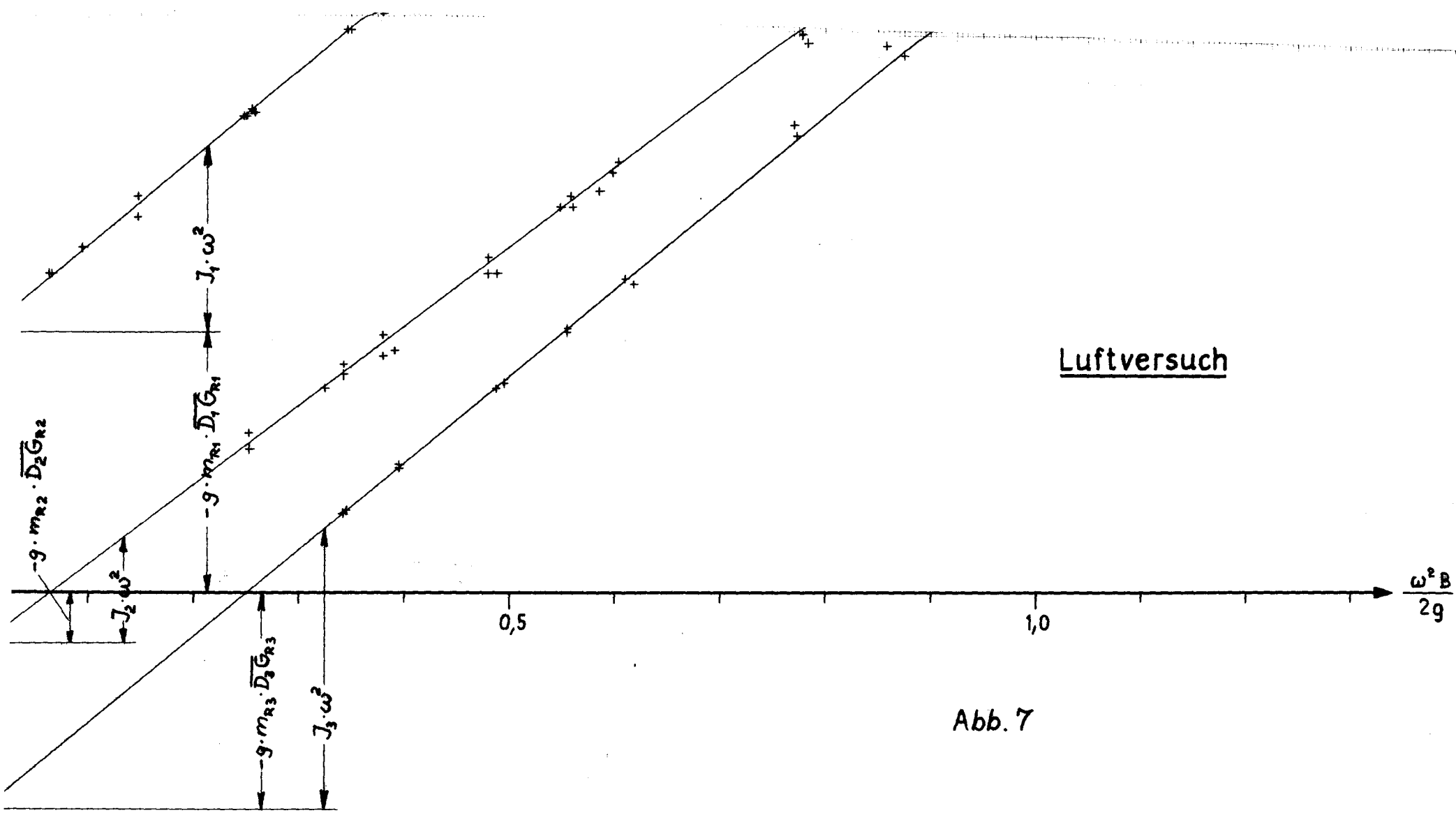

Luftversuch
$J_1 \cdot \omega^2$
$-g \cdot m_{R1} \cdot \overline{D_1 G_{R1}}$
$-g \cdot m_{R2} \cdot \overline{D_2 G_{R2}}$
$-J_2 \cdot \omega^2$
$-g \cdot m_{R3} \cdot \overline{D_3 G_{R3}}$
$J_3 \cdot \omega^2$
0,5
1,0
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

Abb. 7

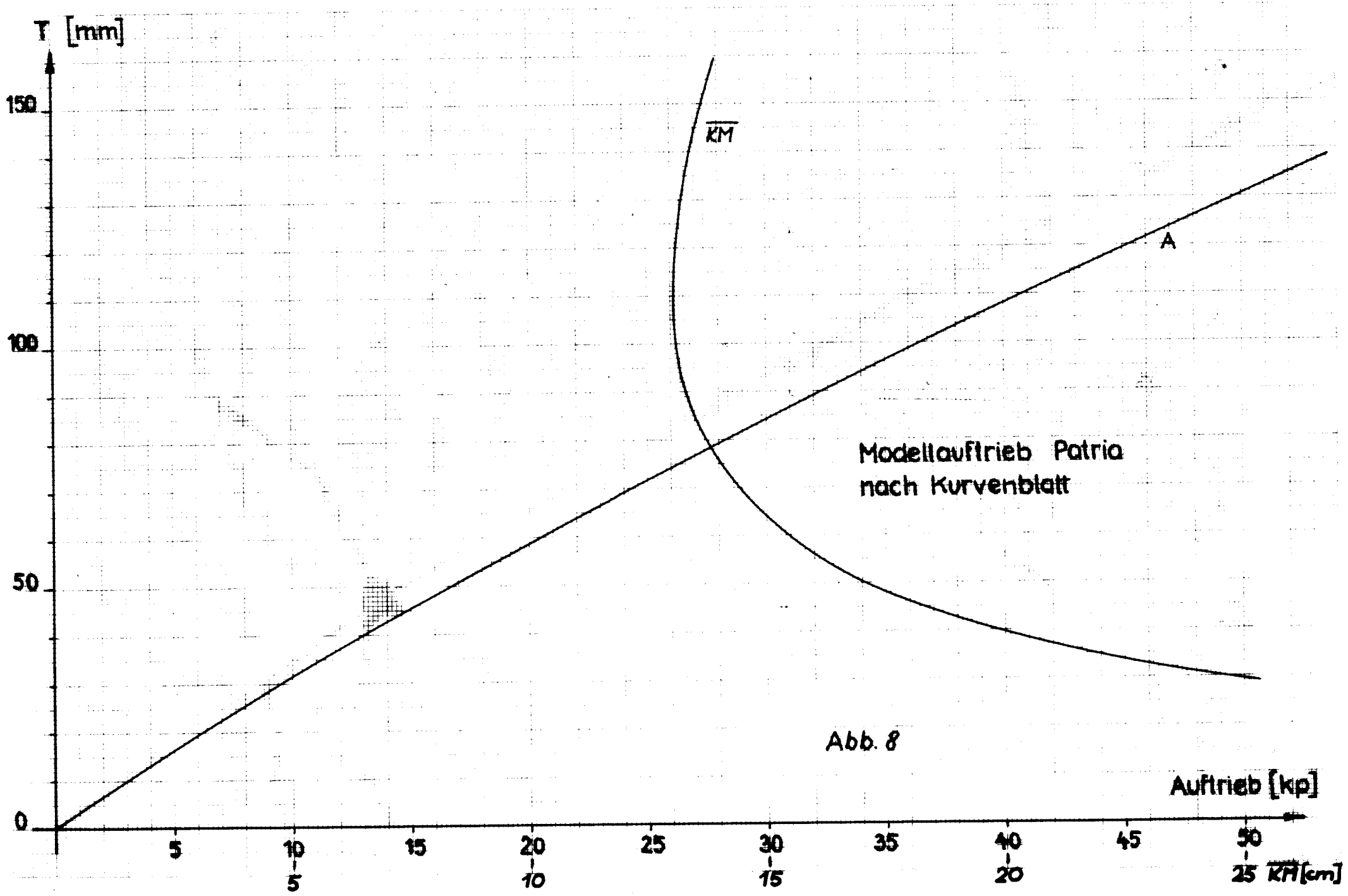

T [mm]
150
100
50
0
$\overline{KM}$
A
Modellauftrieb Patria
nach Kurvenblatt
Auftrieb [kp]
5
10
5
15
20
10
25
30
15
35
40
20
45
50
25
$\overline{KM}$ [cm]

Abb. 8

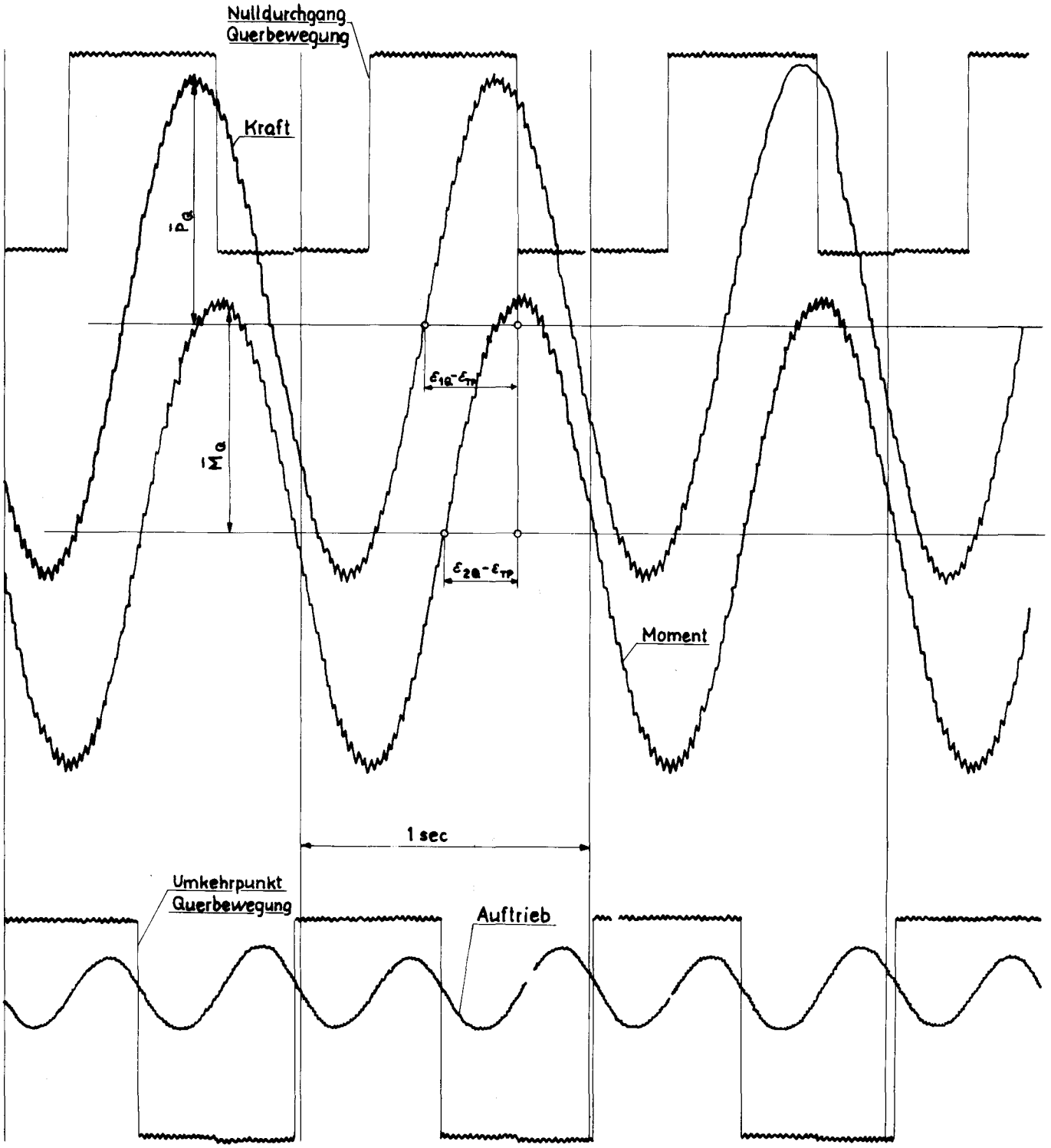

Nulldurchgang
Querbewegung
Kraft
$\bar{P}_a$
$\bar{M}_a$
$\varepsilon_{1a}-\varepsilon_{TP}$
$\varepsilon_{2a}-\varepsilon_{TP}$
Moment
1 sec
Umkehrpunkt
Querbewegung
Auftrieb

Abb. 9

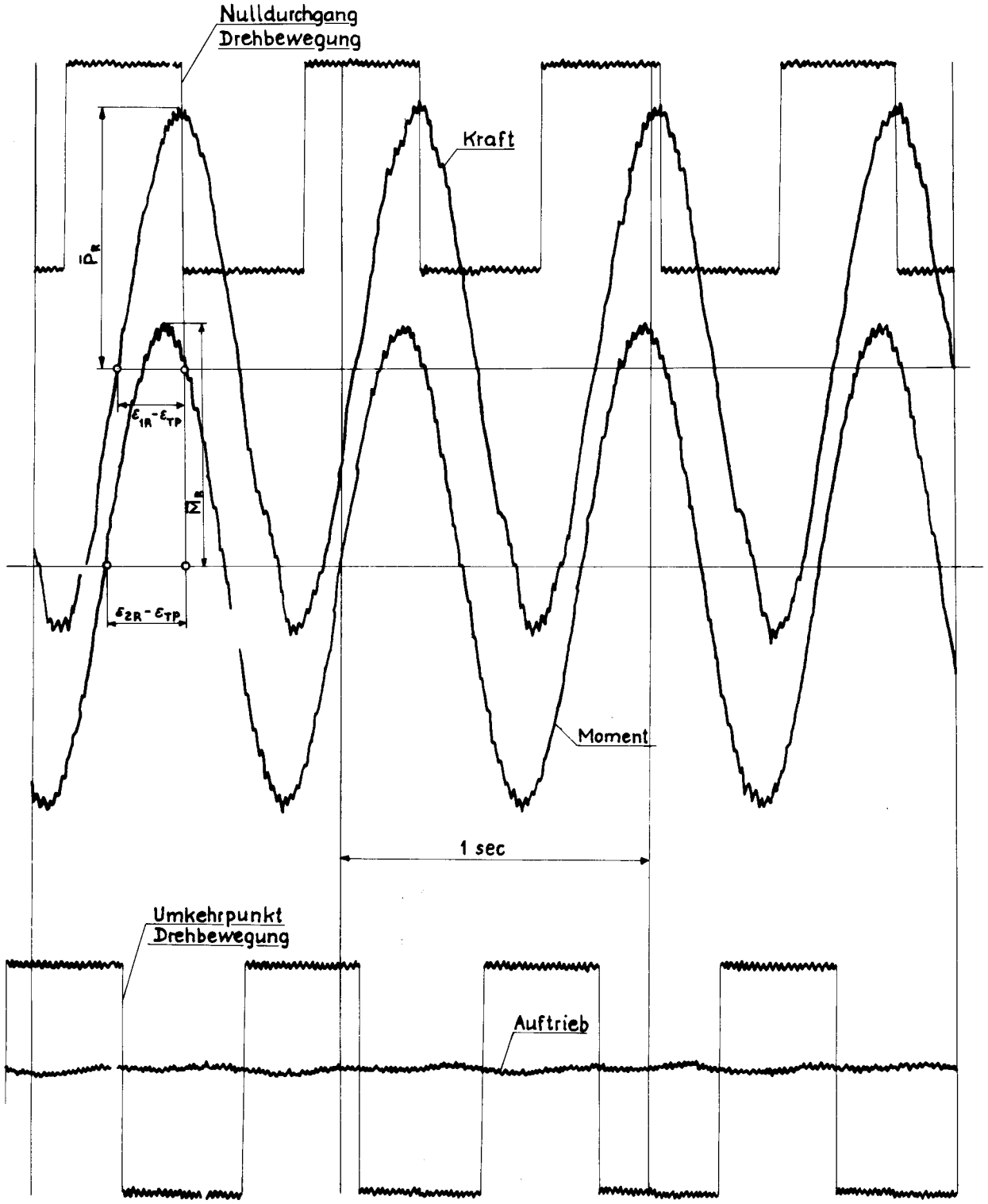

Nulldurchgang
Drehbewegung
Kraft
$1Q_R$
$\varepsilon_{1R} - \varepsilon_{TP}$
M_R
$\varepsilon_{2R} - \varepsilon_{TP}$
Moment
1 sec
Umkehrpunkt
Drehbewegung
Auftrieb

Abb. 10

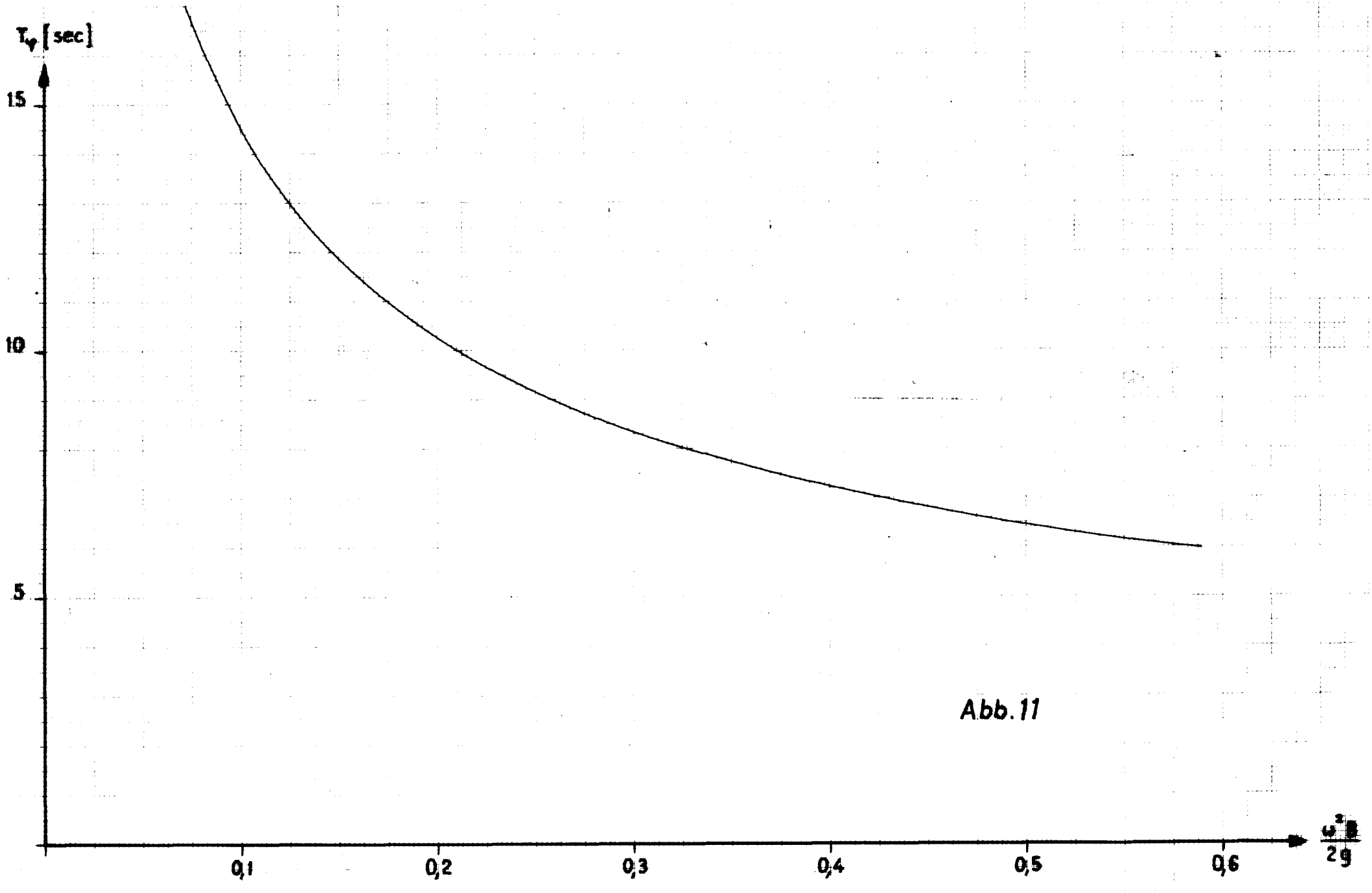
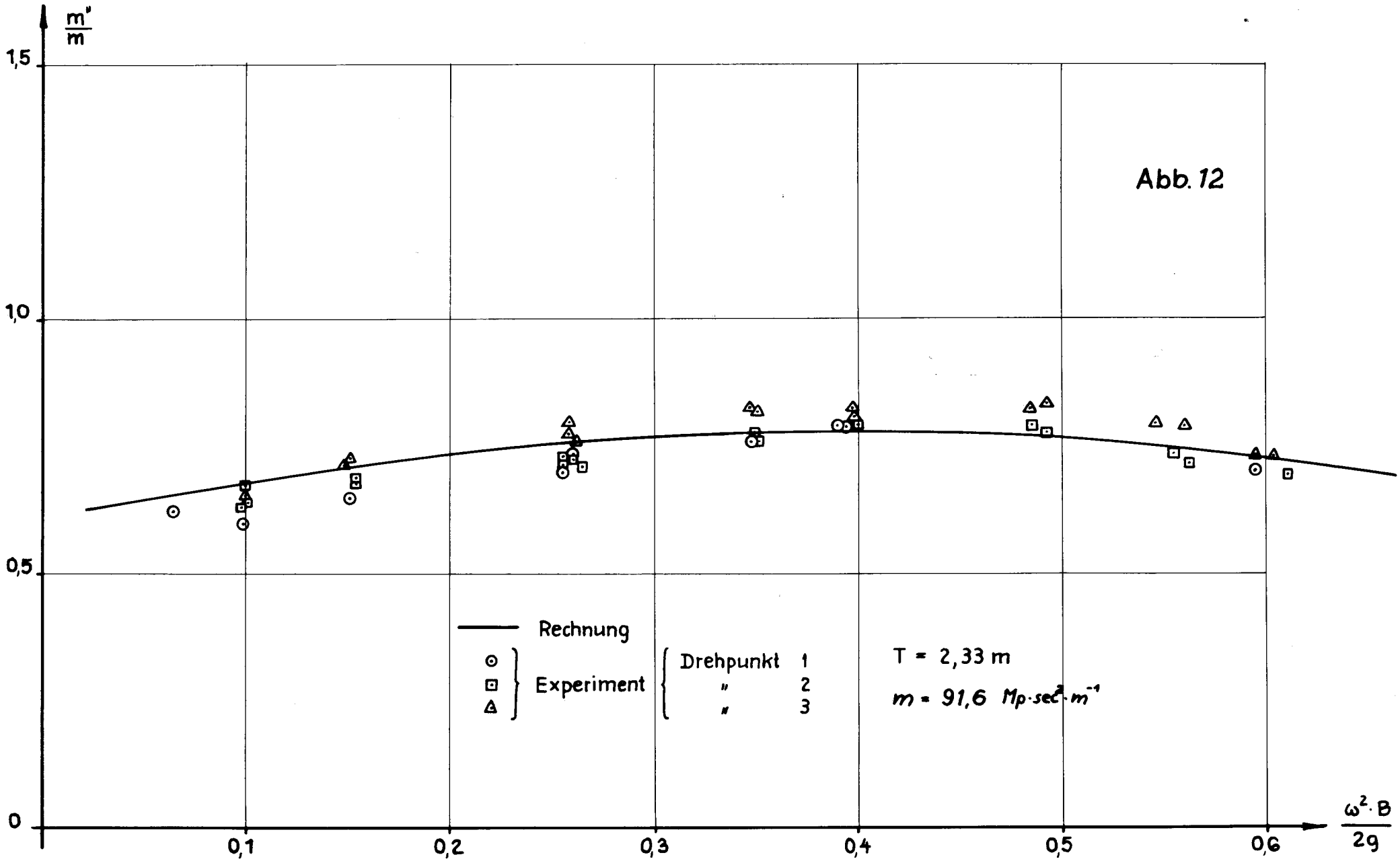
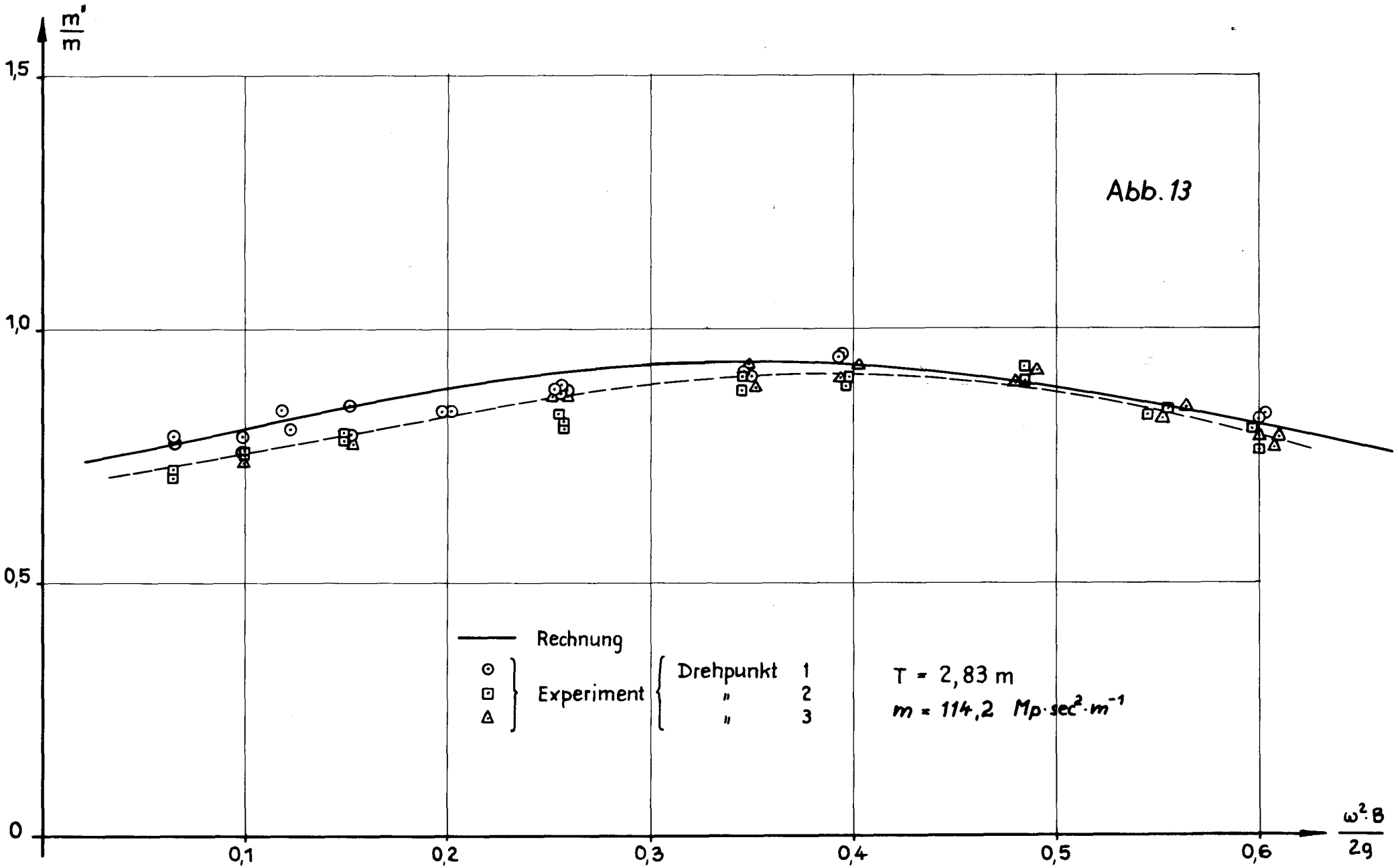
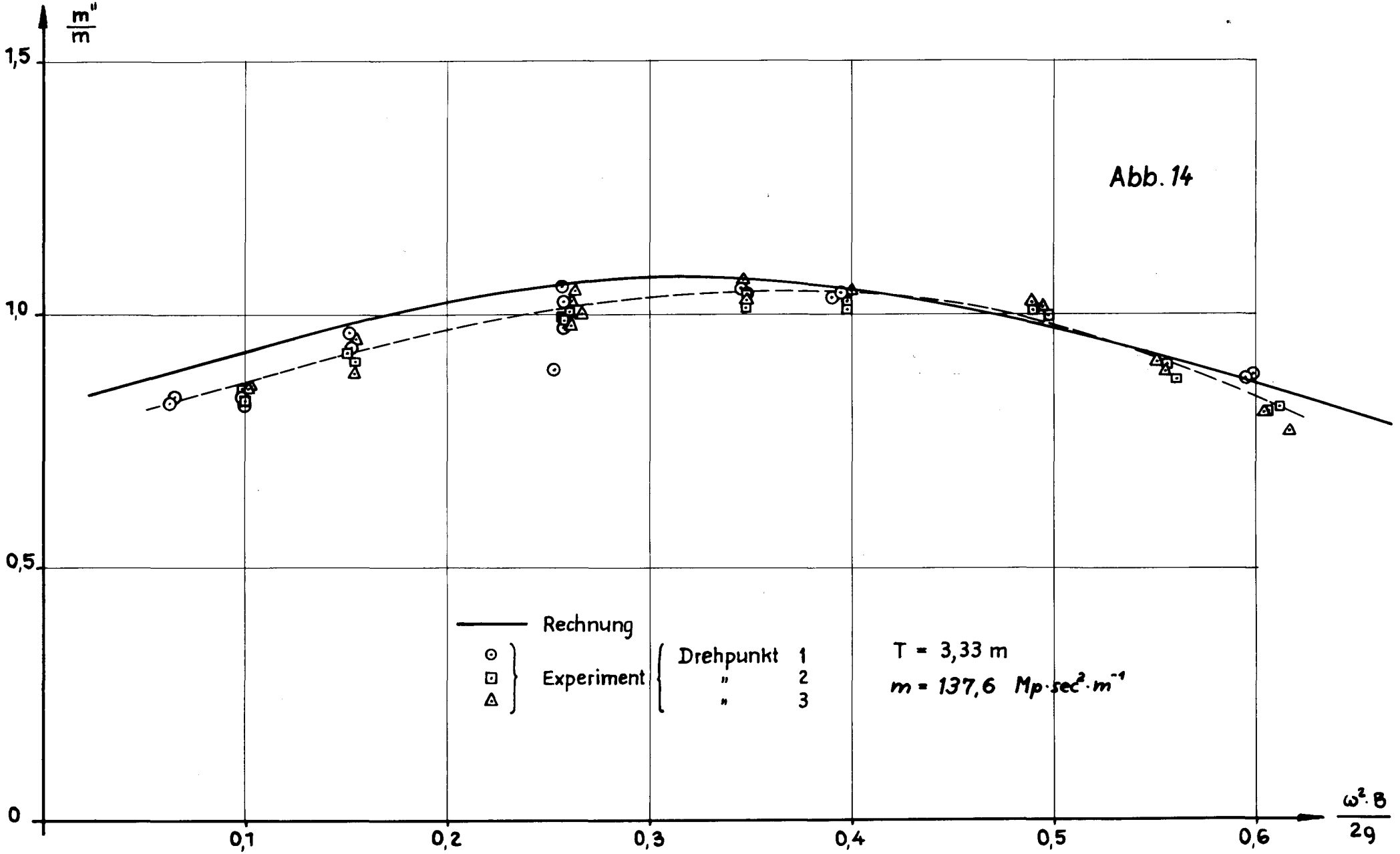
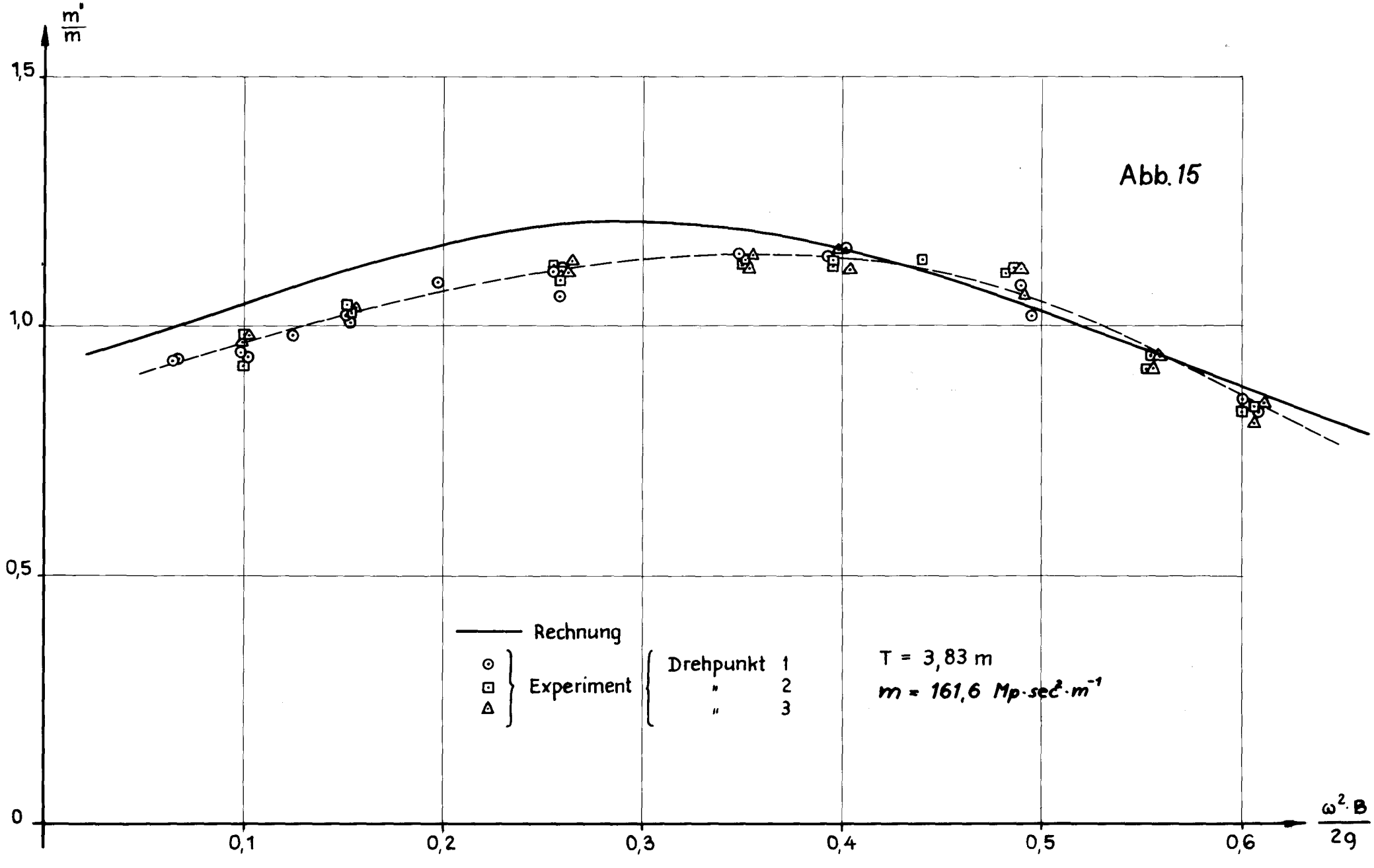


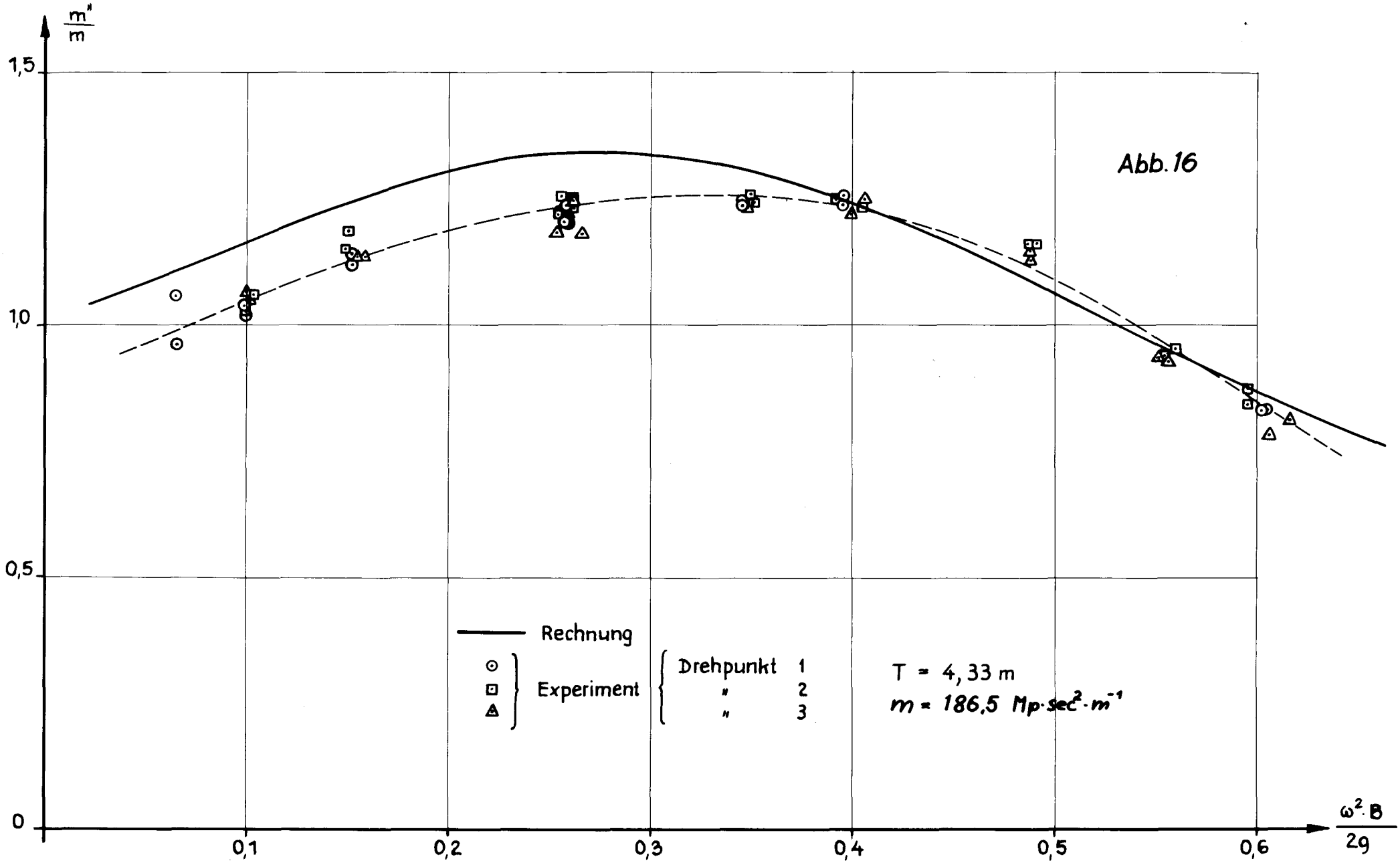
Abb. 11

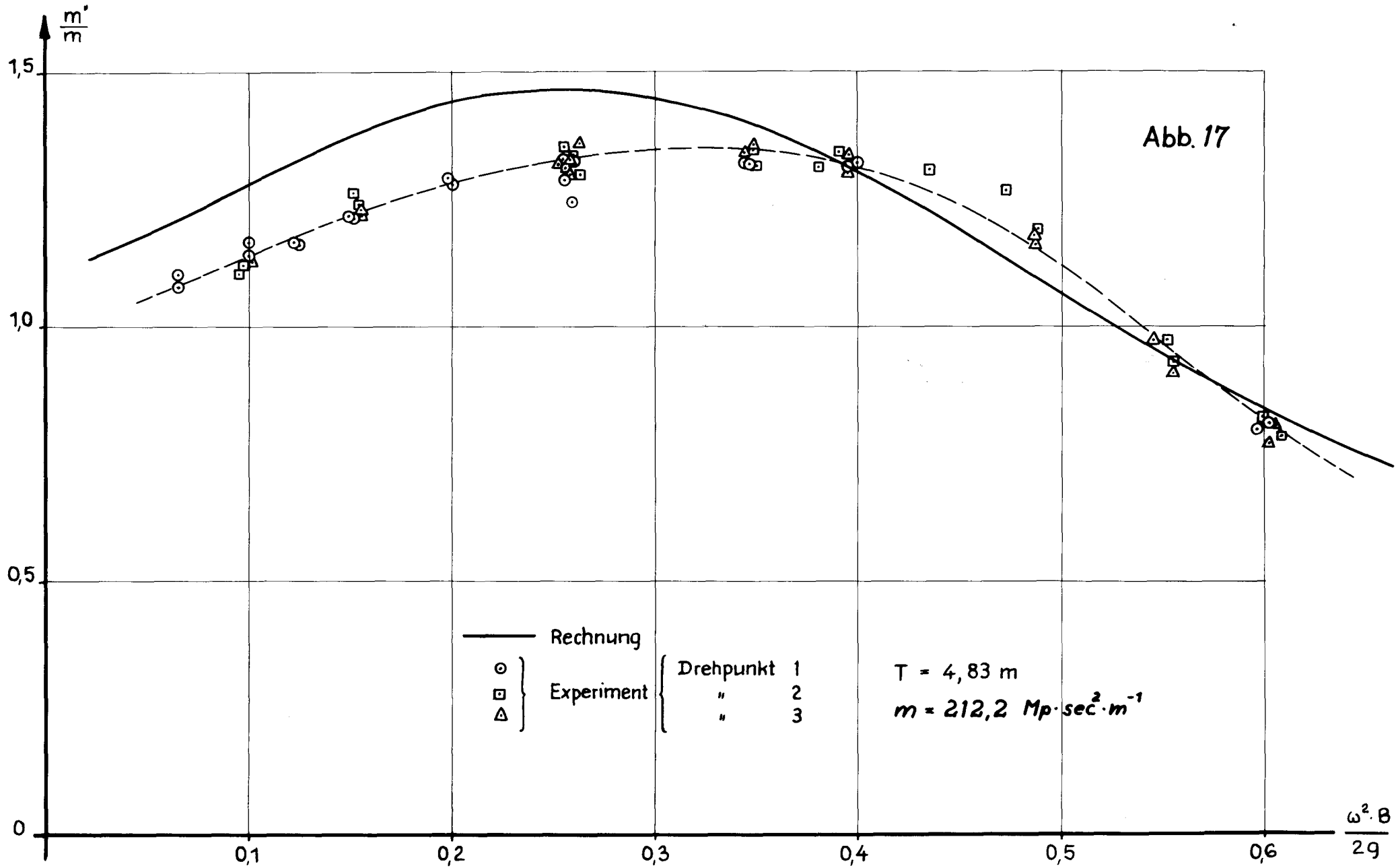

m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 12
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 2,33 m
m = 91,6 Mp·sec²·m⁻¹

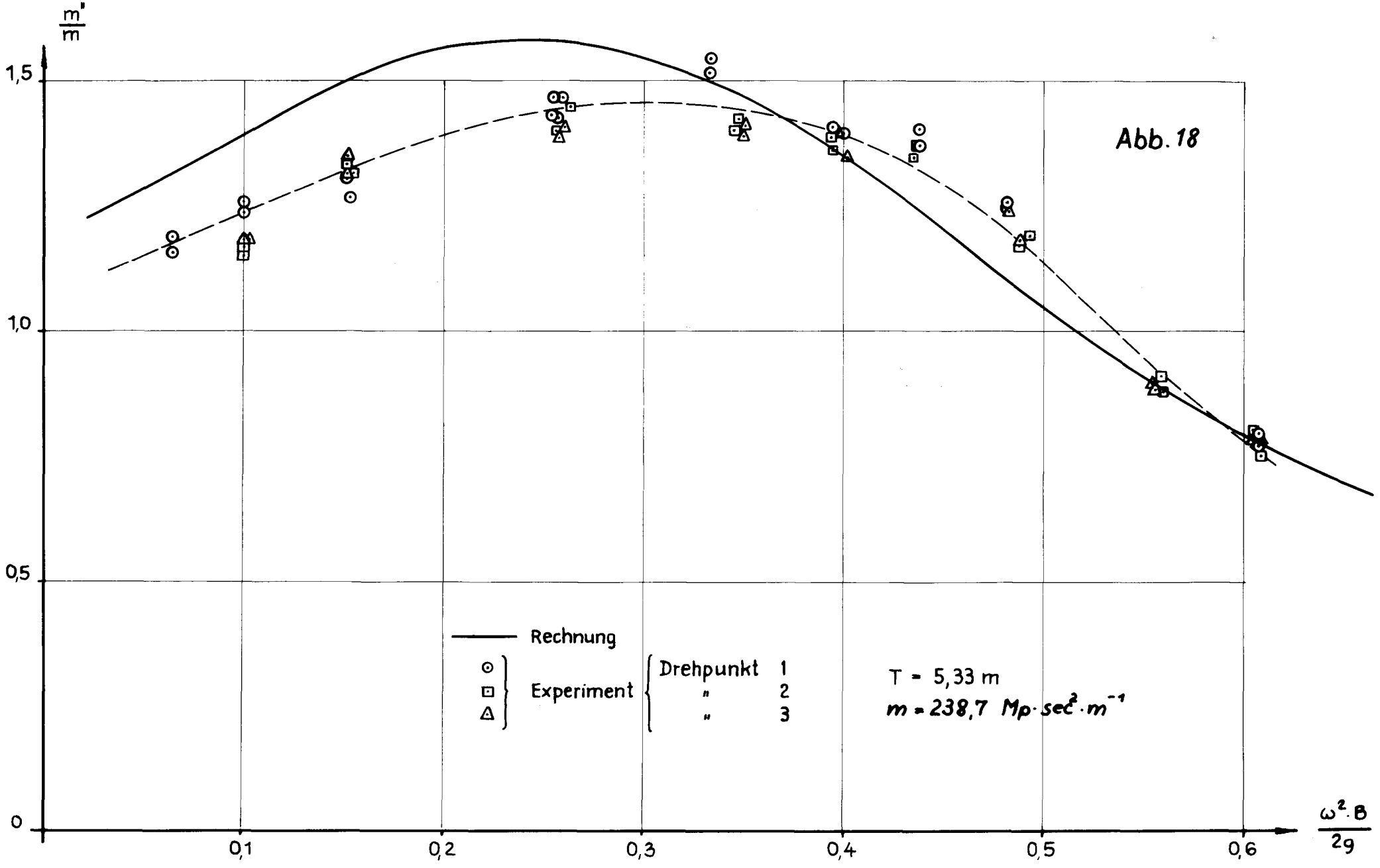

m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 13
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 2,83 m
m = 114,2 Mp·sec²·m⁻¹

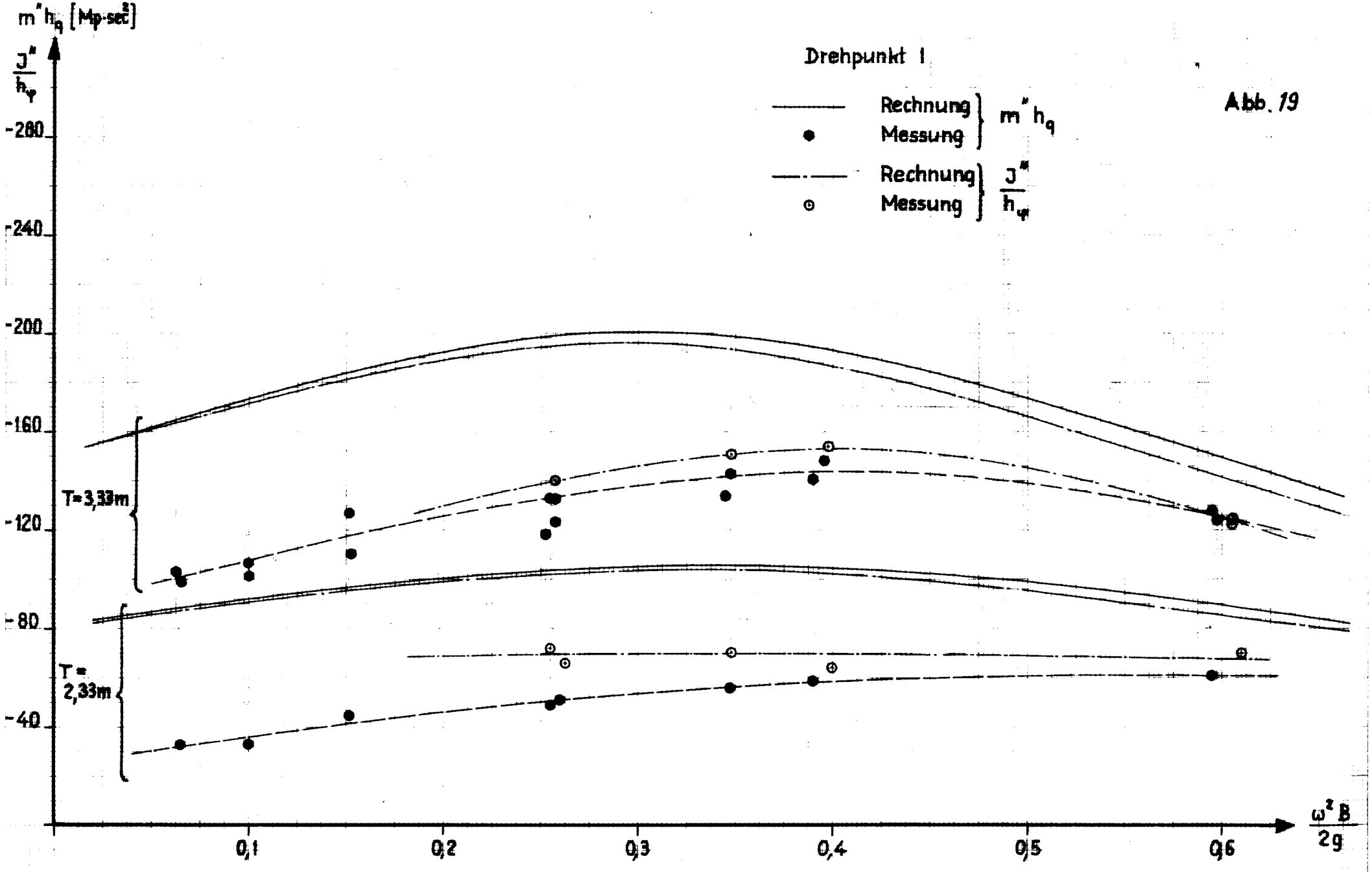

m''/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 14
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 3,33 m
m = 137,6 Mp·sec²·m⁻¹

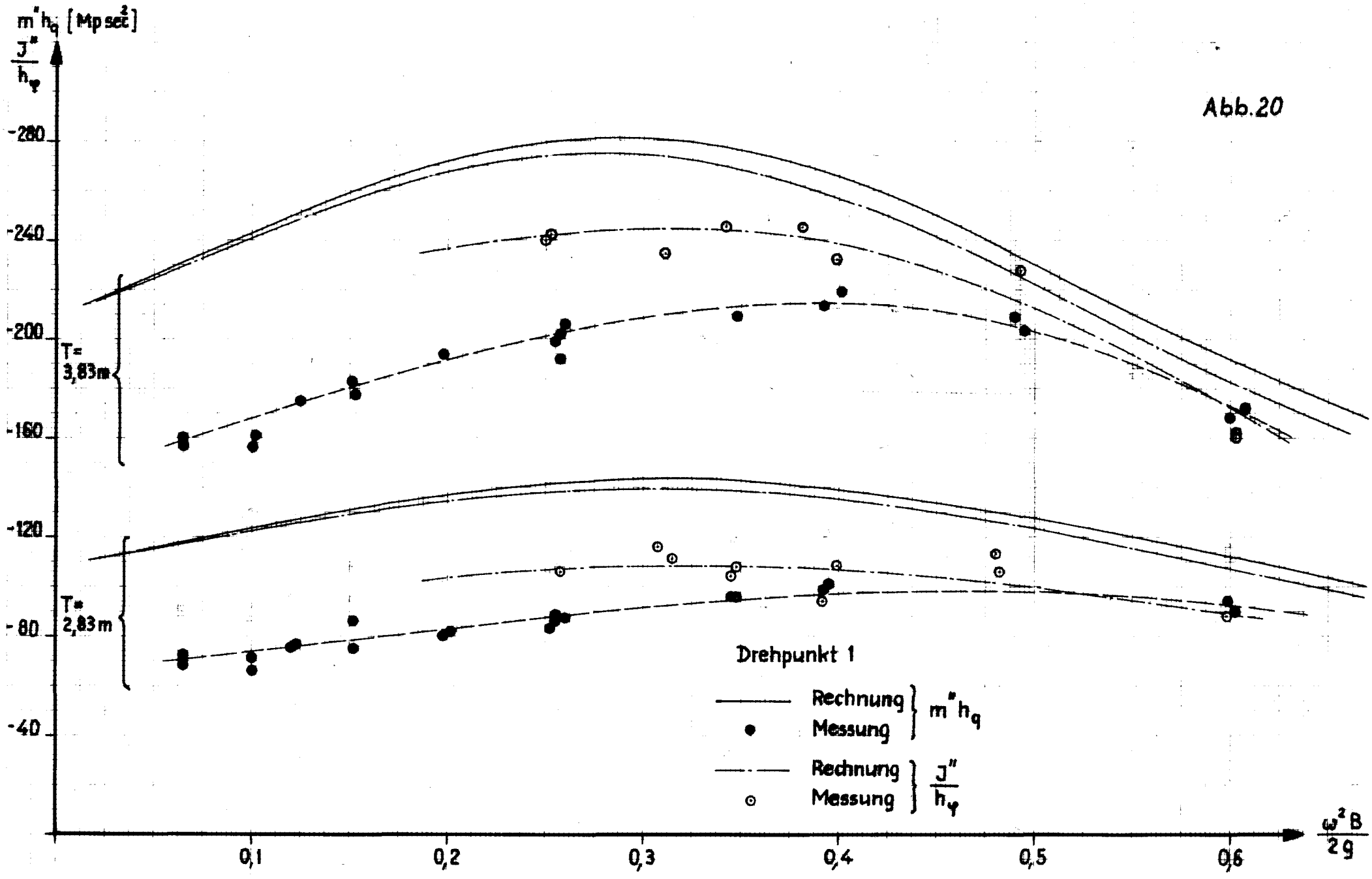

m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 15
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 3,83 m
m = 161,6 Mp·sec²·m⁻¹

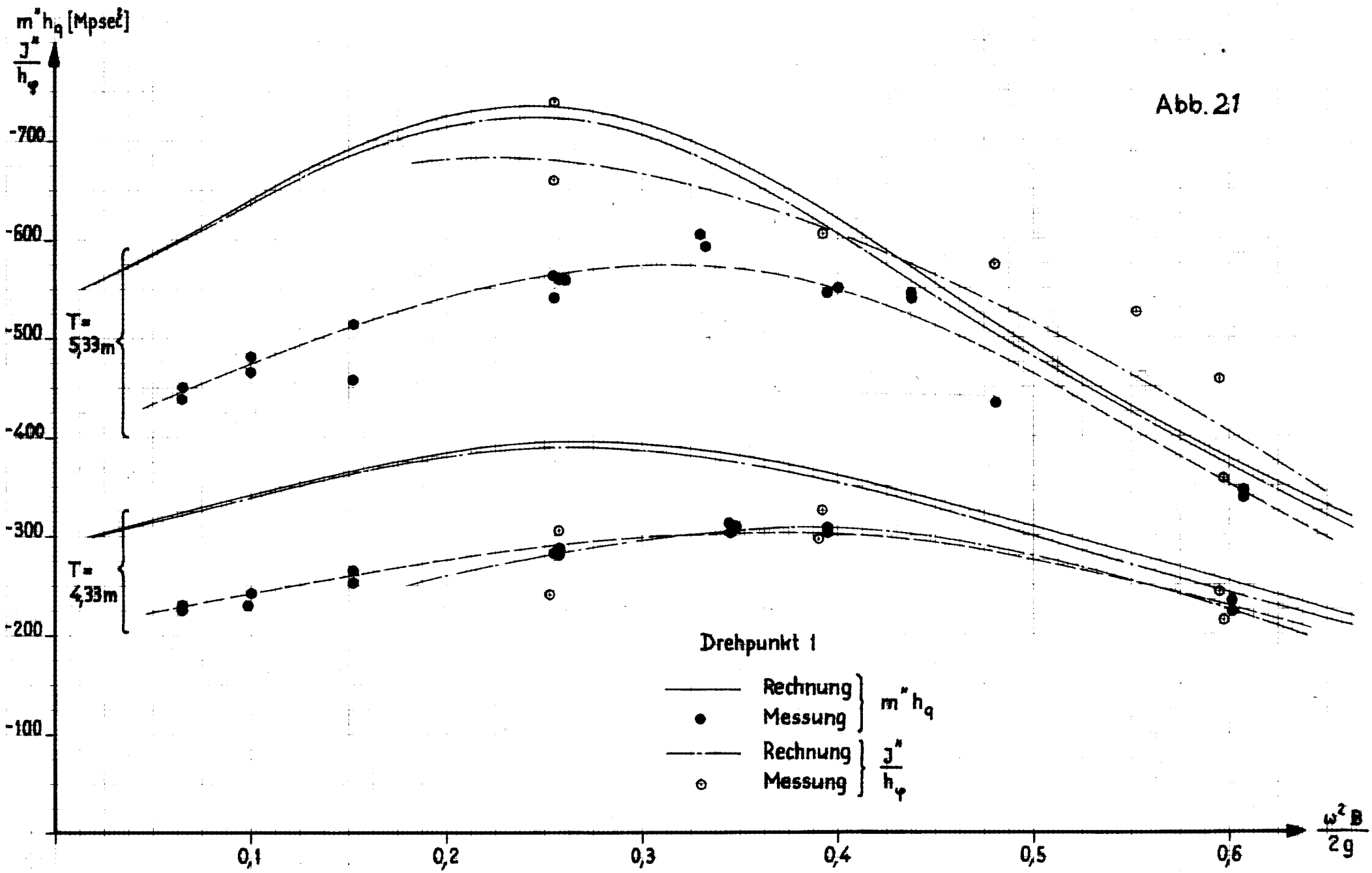

m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 16
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 4,33 m
m = 186,5 Mp·sec²·m⁻¹


m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 17
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 4,83 m
m = 212,2 Mp·sec²·m⁻¹


m'/m
1,5
1,0
0,5
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²·B/2g
Abb. 18
Rechnung
Experiment
Drehpunkt 1
" 2
" 3
T = 5,33 m
m = 238,7 Mp·sec²·m⁻¹


m* h_q [Mp·sec²]
J*/h_φ
-280
-240
-200
-160
-120
-80
-40
T=3,33m
T=2,33m
Drehpunkt I
Rechnung
Messung
m* h_q
Rechnung
Messung
J*/h_φ
Abb. 19
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g


m*h_q [Mp sec²]
J"/h_φ
Abb.20
-280
-240
-200
-160
-120
-80
-40
T= 3,83m
T= 2,83m
Drehpunkt 1
Rechnung
Messung
m*h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g


m*hq [Mpsec²]
J*/hφ
Abb. 21
-700
-600
-500
-400
-300
-200
-100
T= 5,33m
T= 4,33m
Drehpunkt 1
Rechnung
Messung
m*hq
Rechnung
Messung
J*/hφ
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g

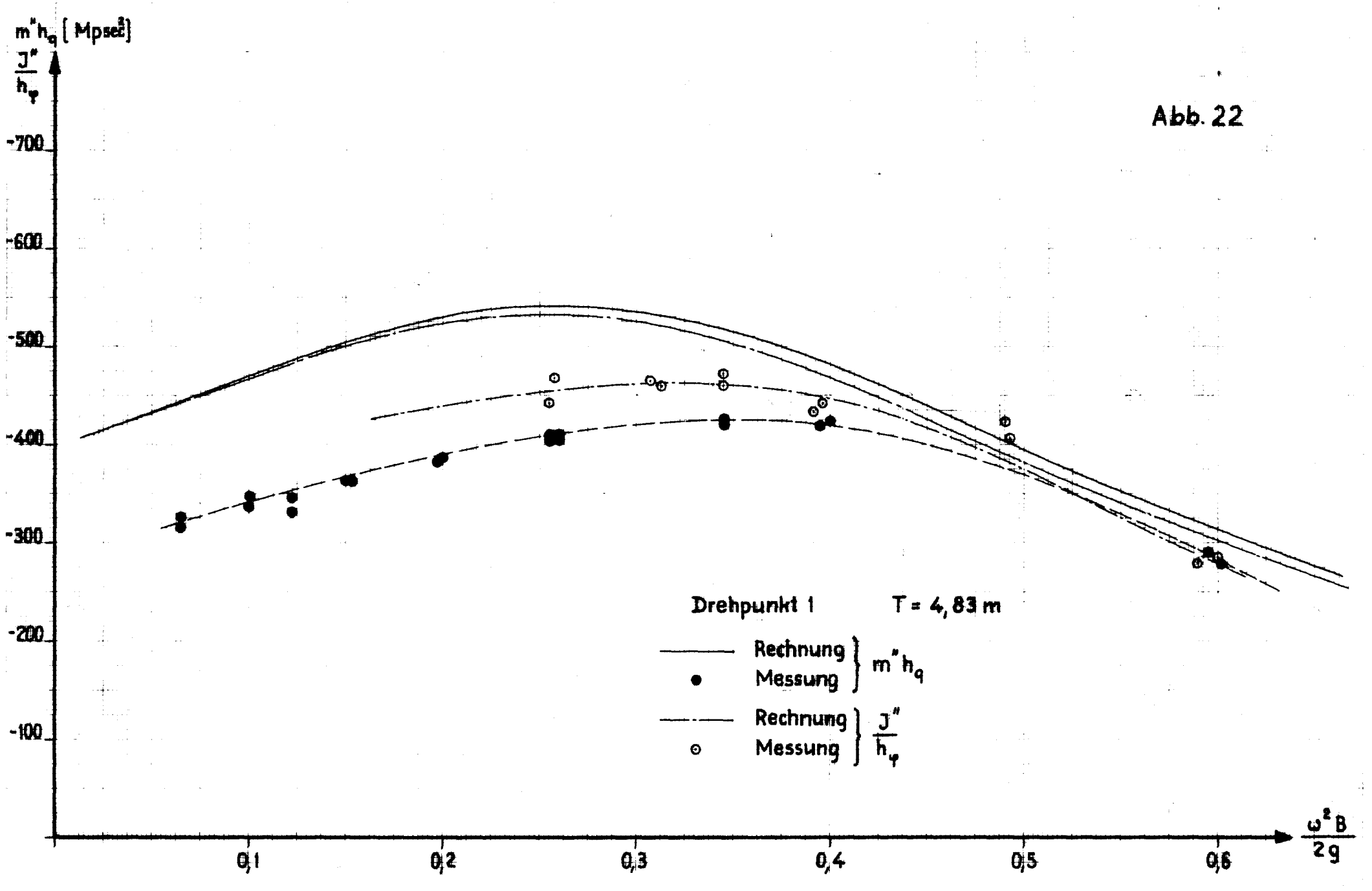
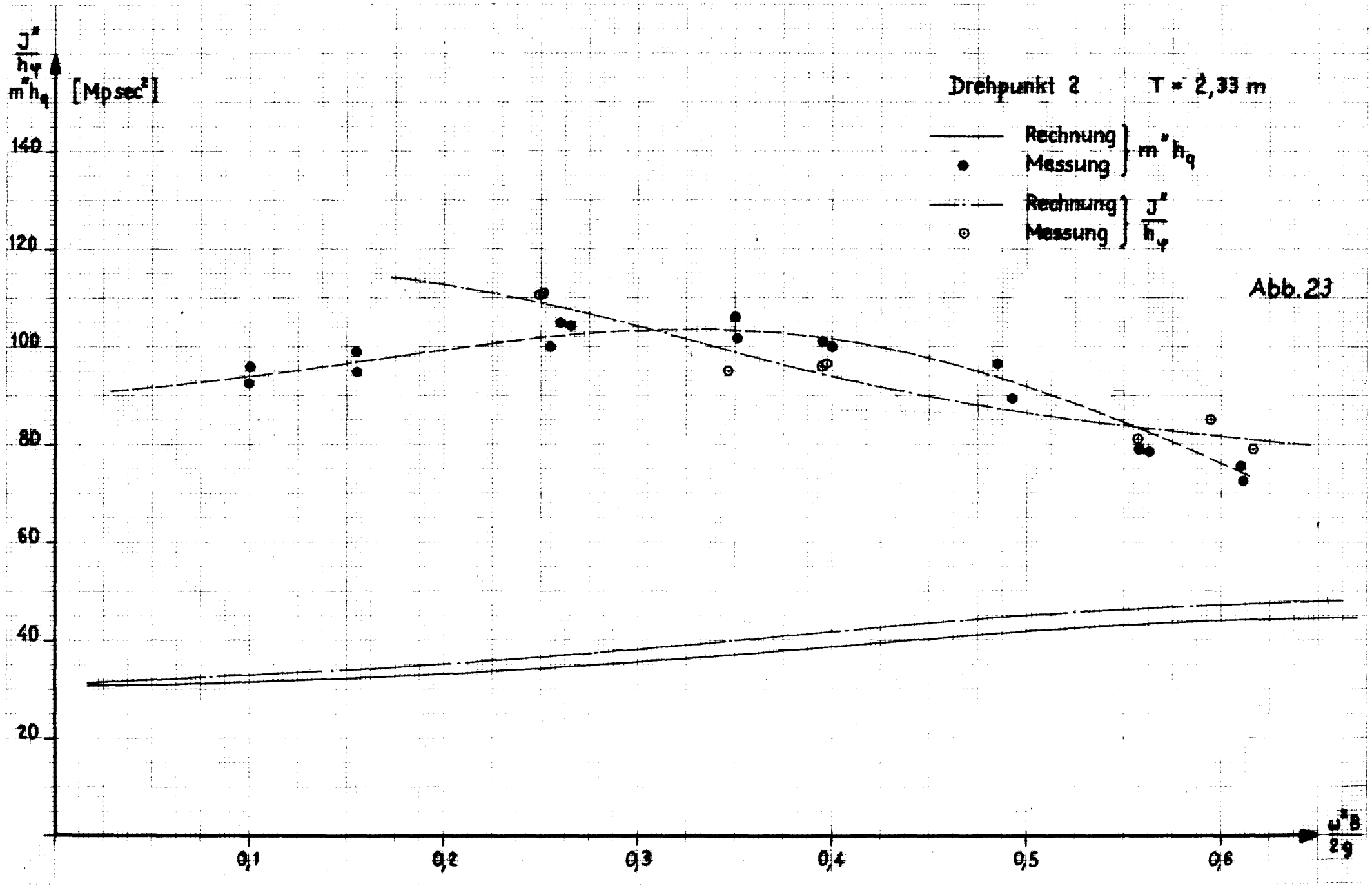
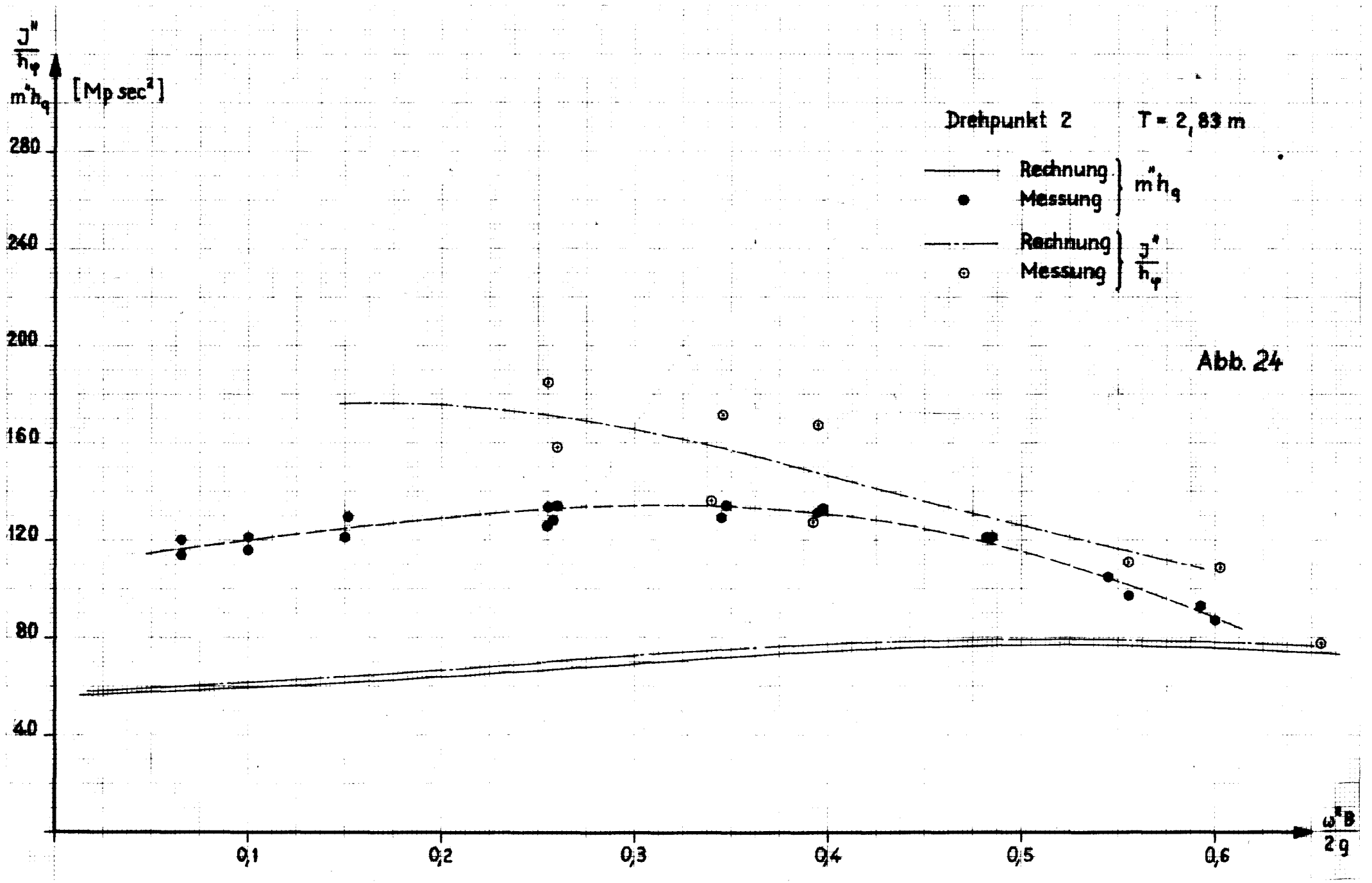
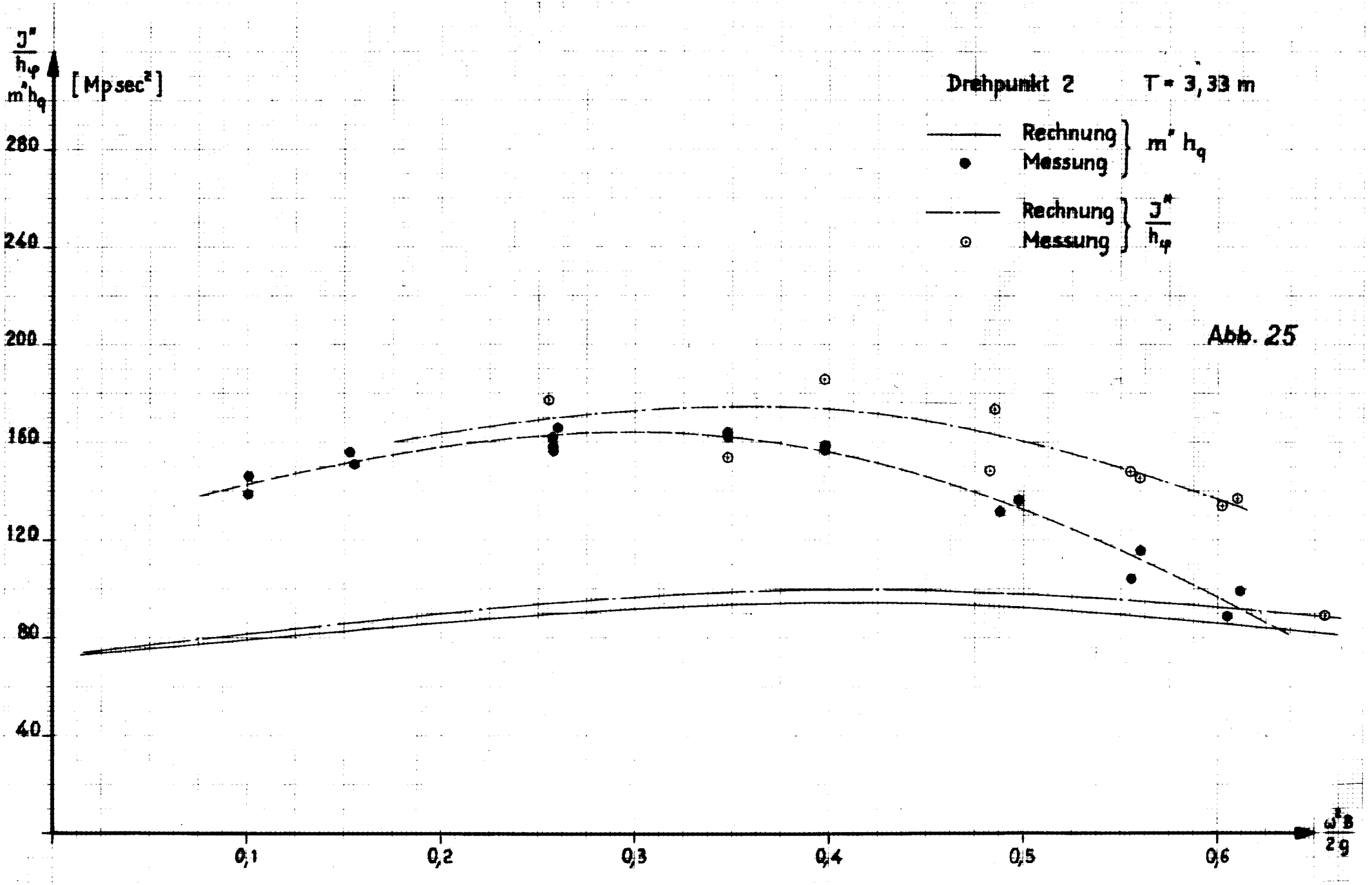
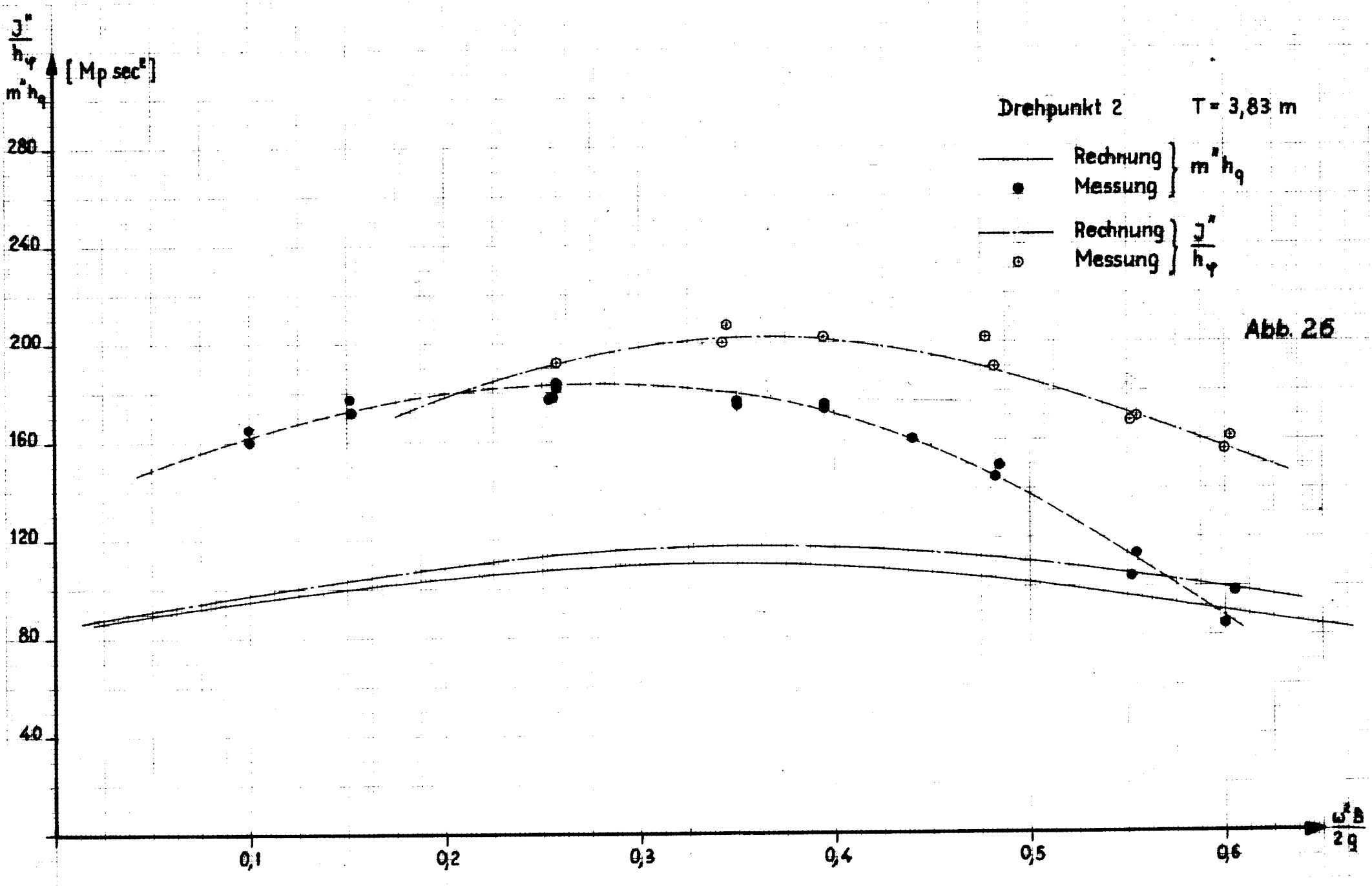

m"h_q [Mpsec²]
J"/h_φ
-700
-600
-500
-400
-300
-200
-100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g
Drehpunkt 1
T = 4,83 m
Rechnung
Messung
m"h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ

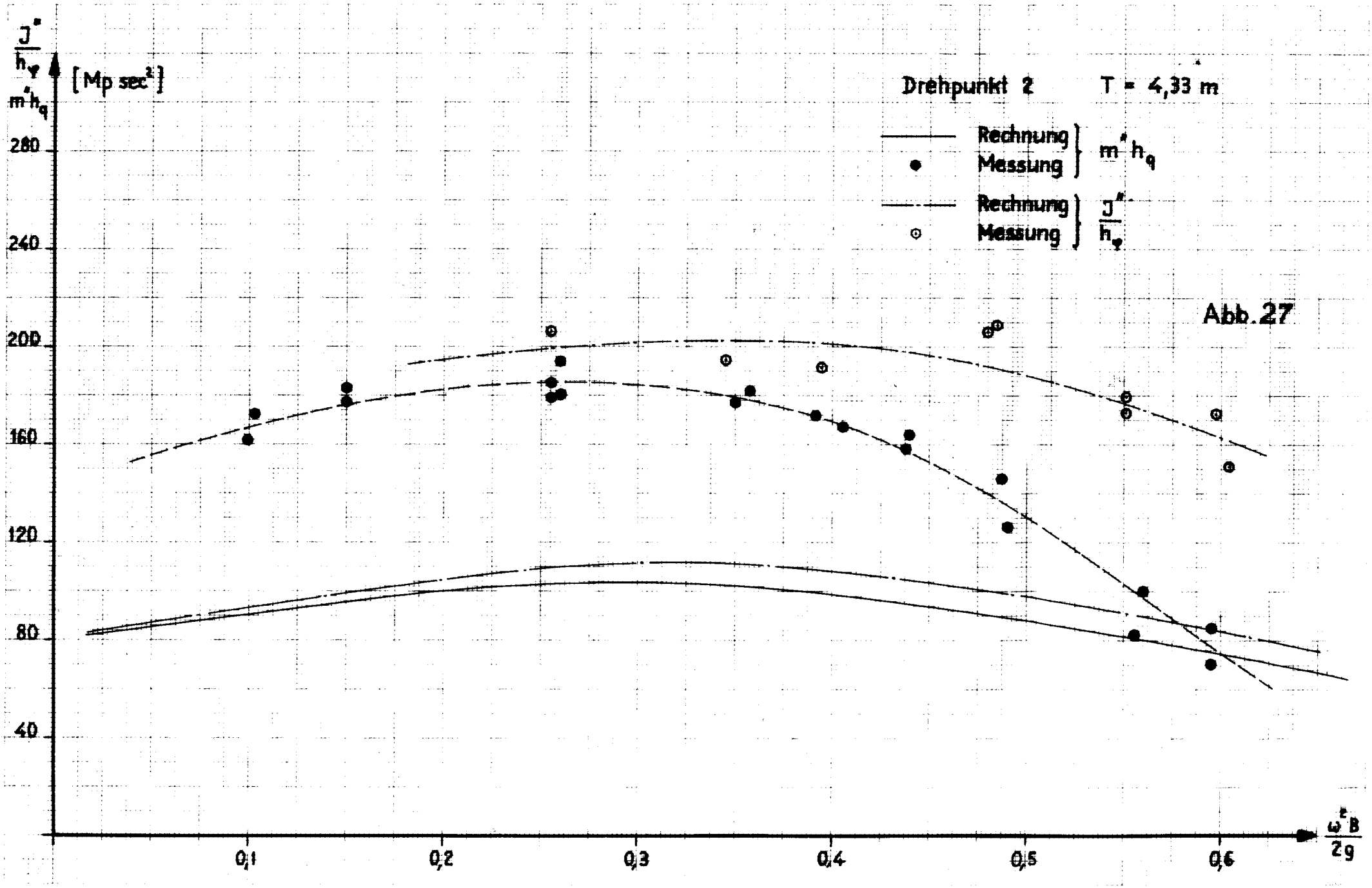
Abb. 22

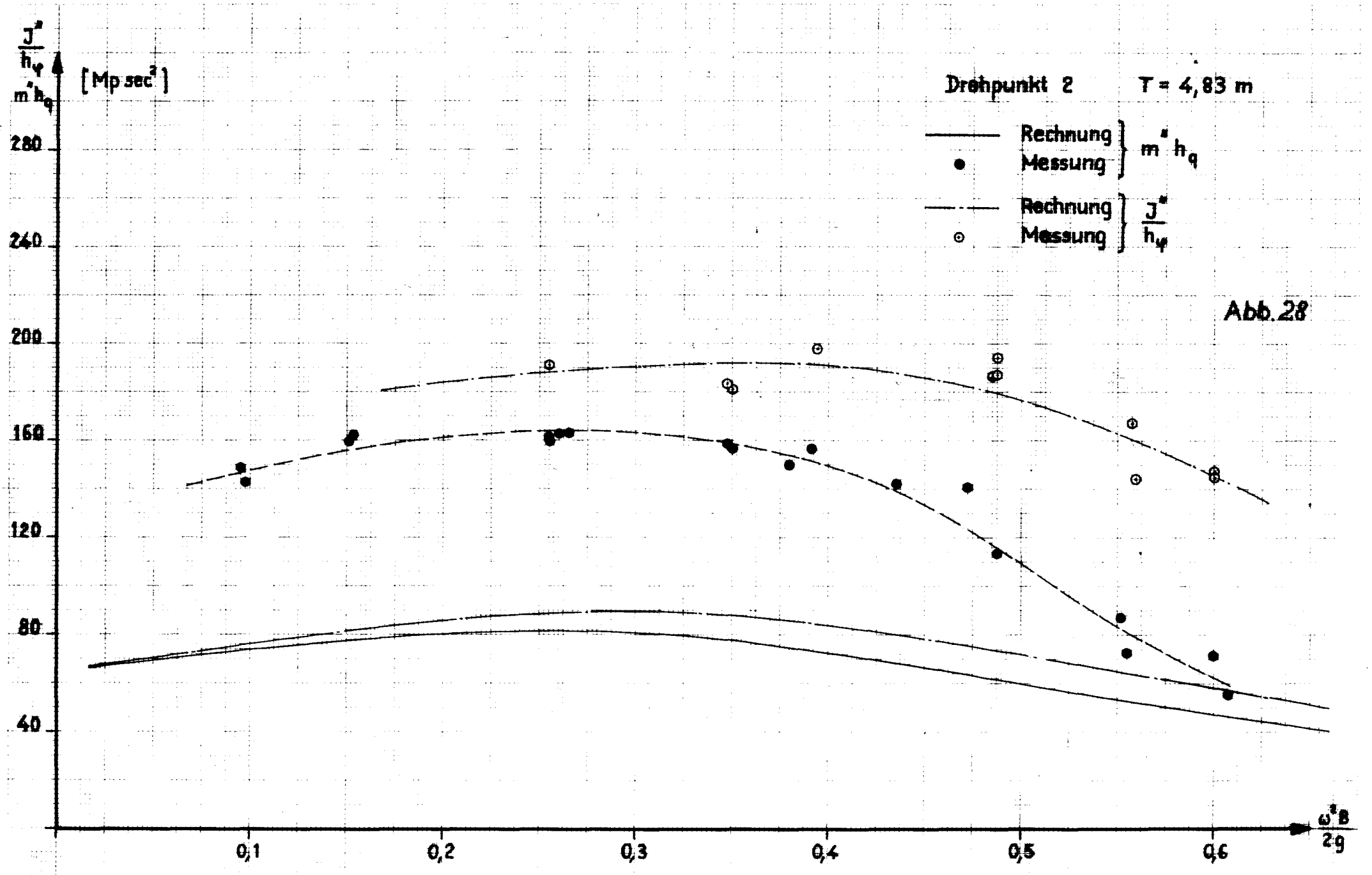

$\frac{J^*}{h_\varphi}$
$m^* h_q$ [Mp sec²]
140
120
100
80
60
40
20
Drehpunkt 2
T = 2,33 m
Rechnung
Messung
$m^* h_q$
Rechnung
Messung
$\frac{J^*}{h_\varphi}$
Abb. 23
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

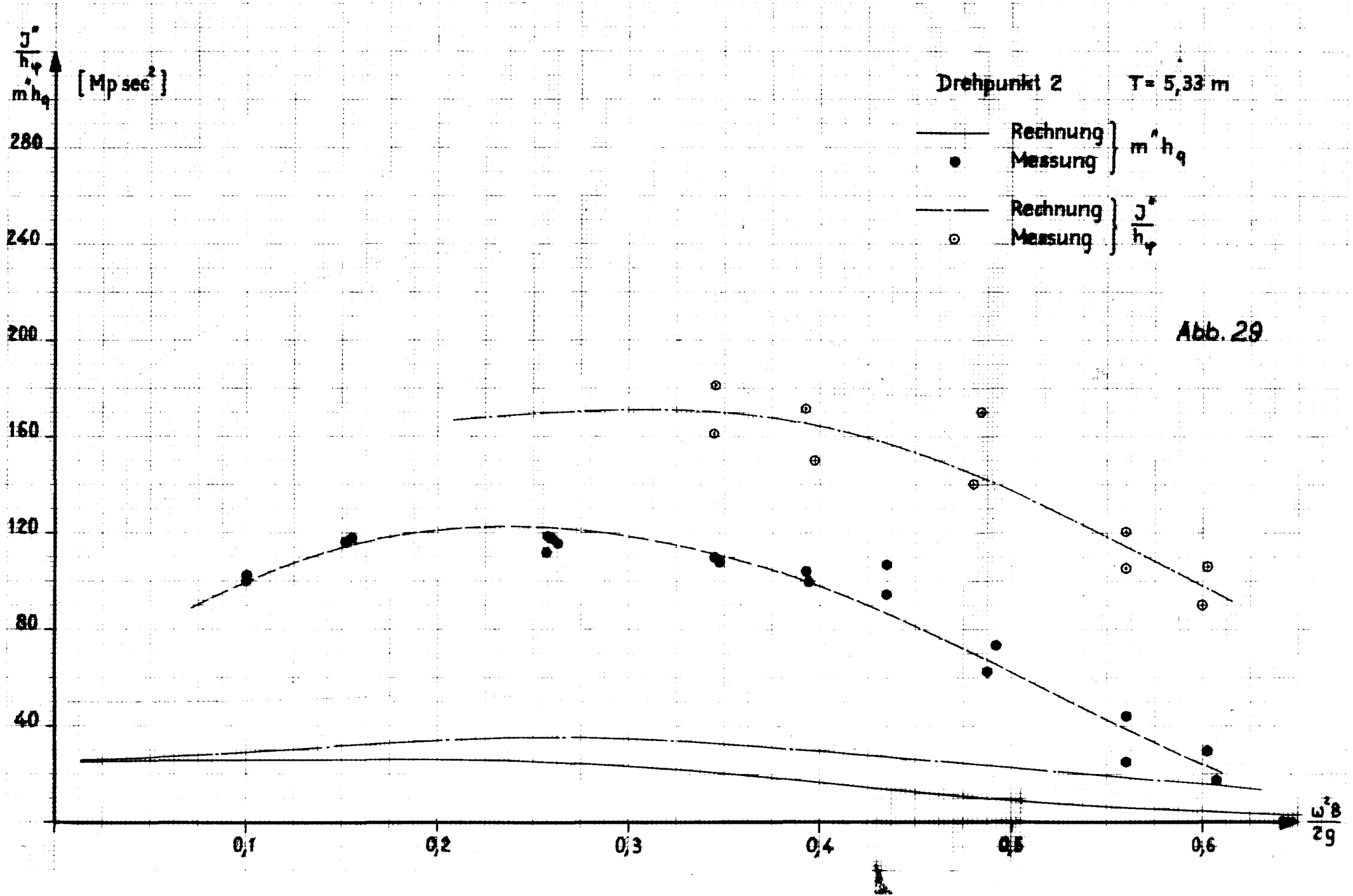

J"/h_φ
m"h_q
[Mp sec²]
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g
Drehpunkt 2
T = 2,83 m
Rechnung
Messung
m"h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ
Abb. 24

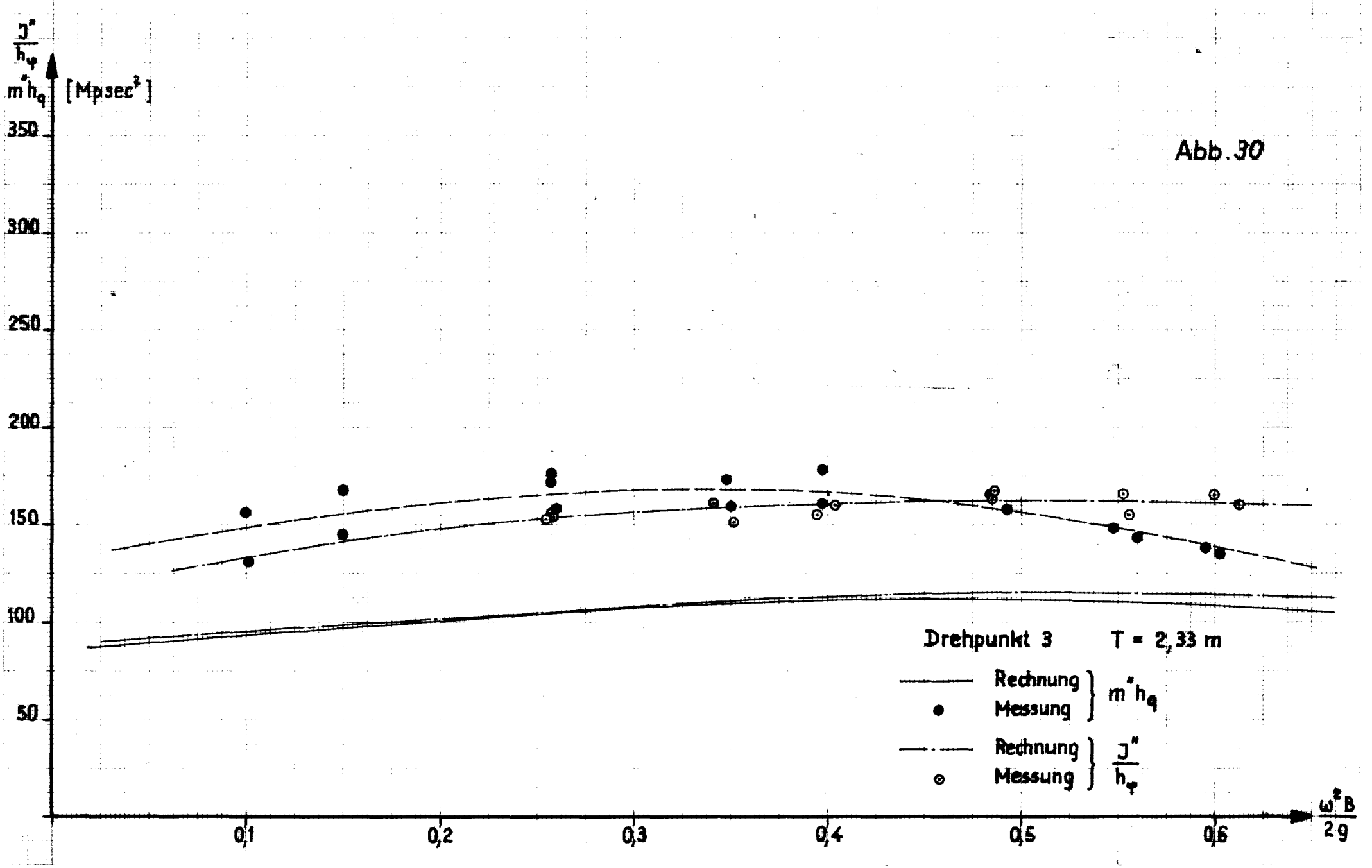

J*/hφ
m*hq
[Mpsec²]
Drehpunkt 2
T = 3,33 m
Rechnung
Messung
m* hq
Rechnung
Messung
J*/hφ
Abb. 25
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g


J"/h_φ
m"h_q
[Mp sec²]
Drehpunkt 2
T = 3,83 m
Rechnung
Messung
m"h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ
Abb. 26
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g


$\frac{J^*}{h_\varphi}$
[Mp sec²]
$m^* h_q$
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
Drehpunkt 2
T = 4,33 m
Rechnung
Messung
$m^* h_q$
Rechnung
Messung
$\frac{J^*}{h_\varphi}$
Abb. 27


$\frac{J^*}{h_\varphi}$
$m^* h_q$
[Mp sec²]
Drehpunkt 2
T = 4,83 m
Rechnung
Messung
$m^* h_q$
Rechnung
Messung
$\frac{J^*}{h_\varphi}$
Abb. 28
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$


J*/h_φ
m*h_q
[Mp sec²]
Drehpunkt 2
T= 5,33 m
Rechnung
Messung
m*h_q
Rechnung
Messung
J*/h_φ
Abb. 29
280
240
200
160
120
80
40
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g


J"/h_φ
m"h_q [Mpsec²]
350
300
250
200
150
100
50
Abb. 30
Drehpunkt 3
T = 2,33 m
Rechnung
Messung
m"h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g

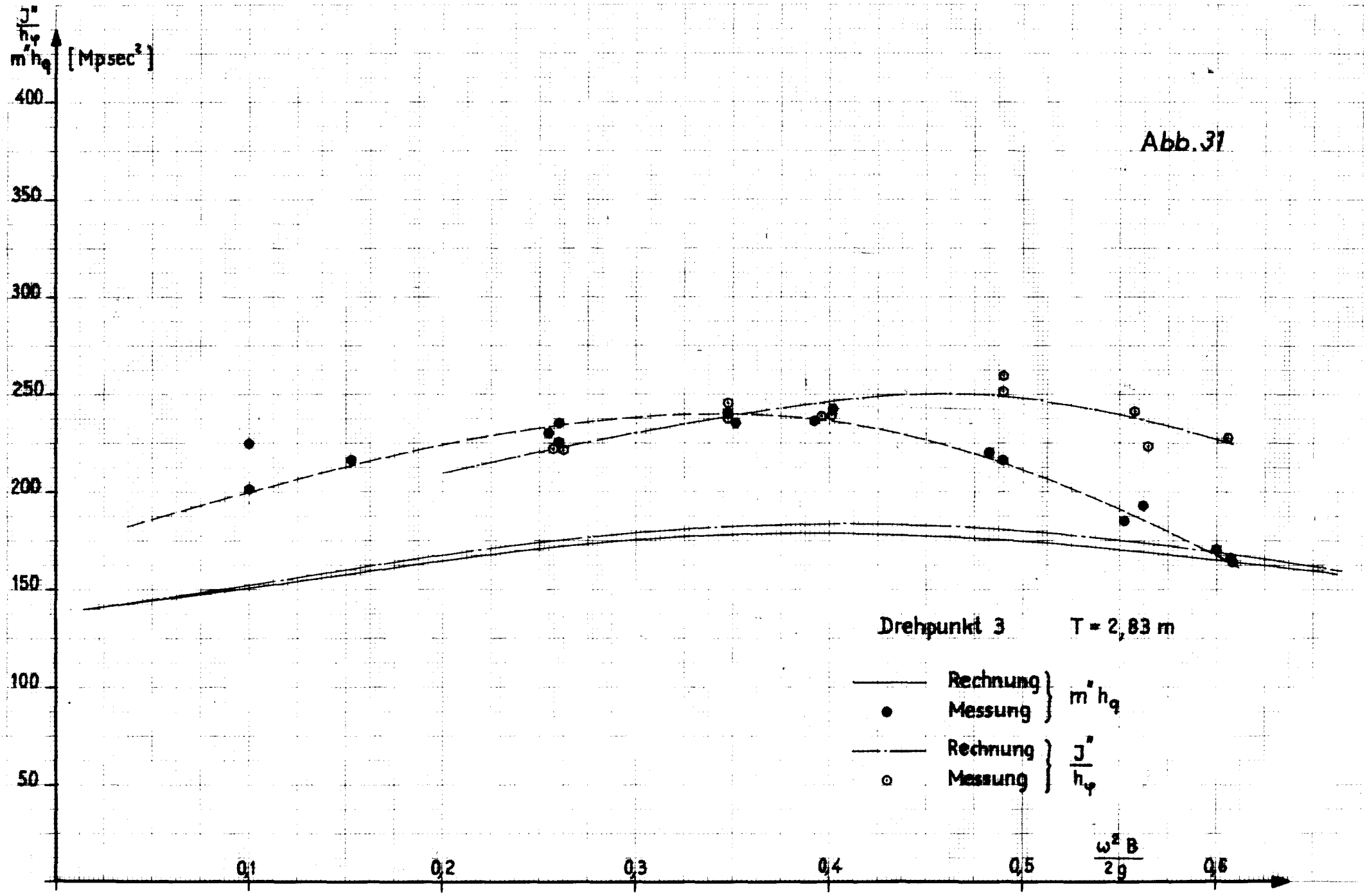
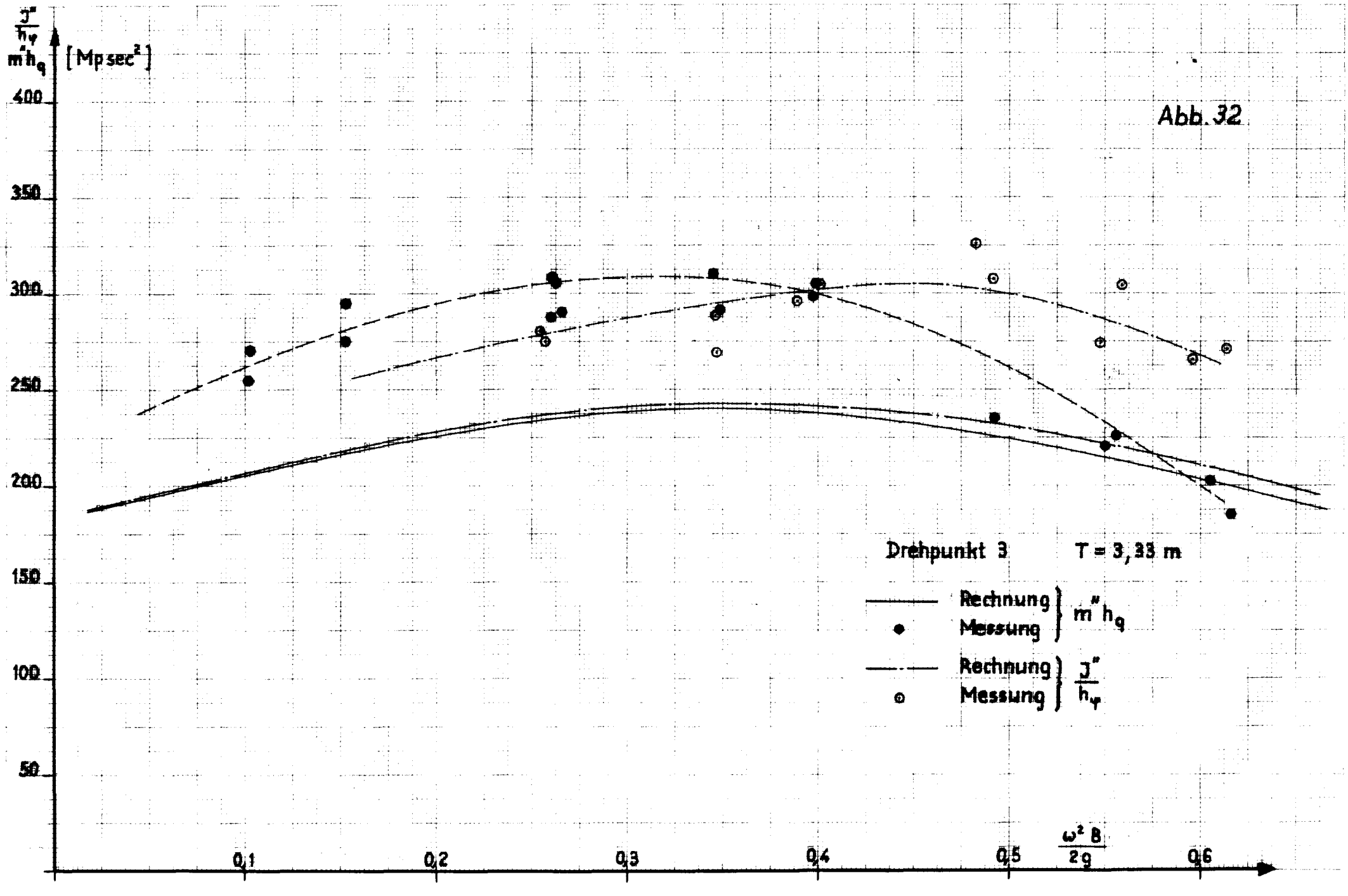
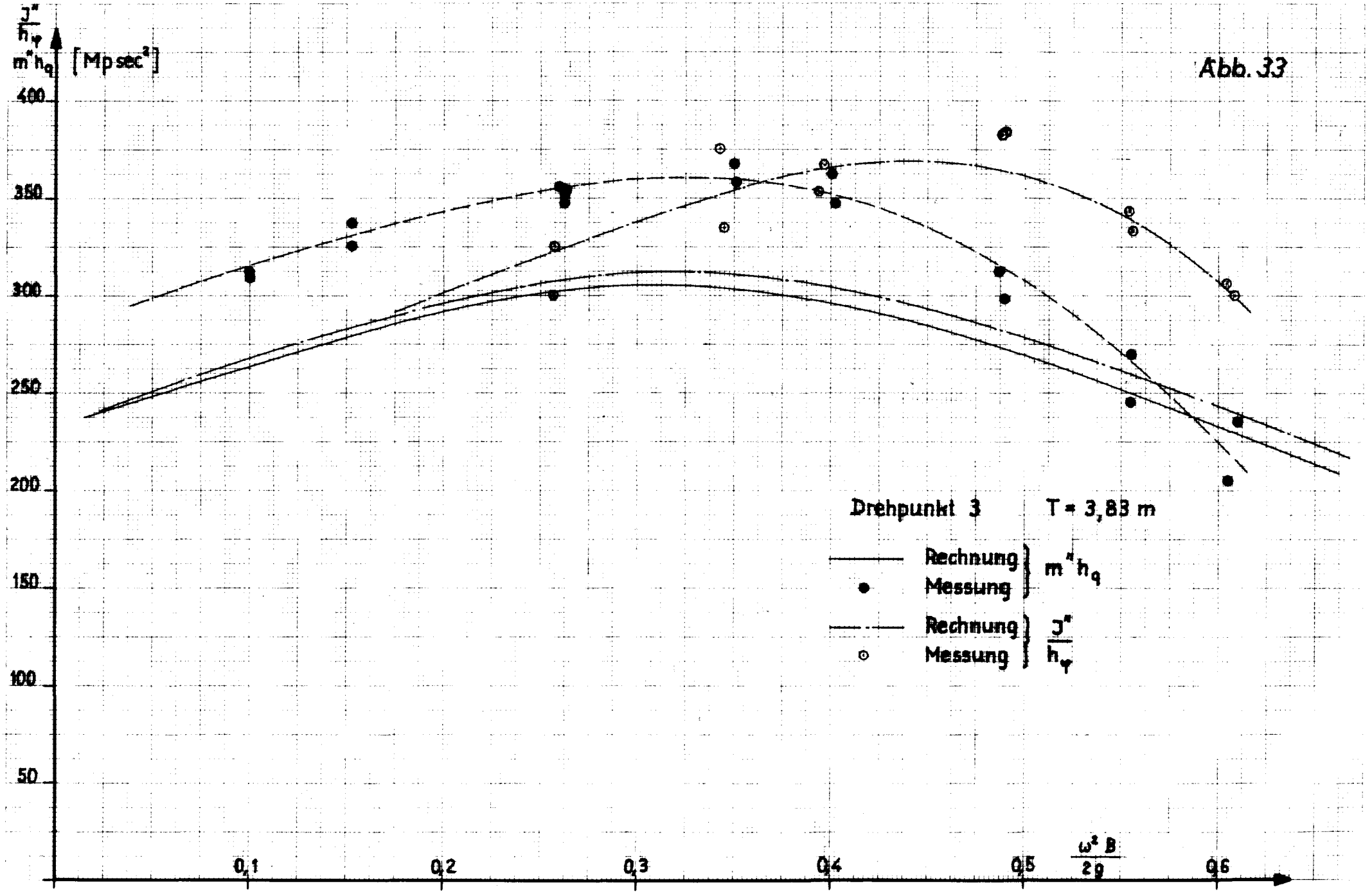


Abb. 31
$m^* h_q$ [Mpsec²]
$\frac{J^*}{h_\varphi}$
400
350
300
250
200
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
Drehpunkt 3
T = 2,83 m
Rechnung
Messung
$m^* h_q$
Rechnung
Messung
$\frac{J^*}{h_\varphi}$


$\frac{J''}{h_\varphi}$
$m''h_q$ [Mp sec²]
400
350
300
250
200
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
0,6
Abb. 32
Drehpunkt 3
T = 3,33 m
Rechnung
Messung
$m''h_q$
Rechnung
Messung
$\frac{J''}{h_\varphi}$


J*/h_φ
m*h_q [Mpsec²]
Abb. 33
400
350
300
250
200
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω² B / 2g
Drehpunkt 3
T = 3,83 m
Rechnung
Messung
m*h_q
Rechnung
Messung
J*/h_φ

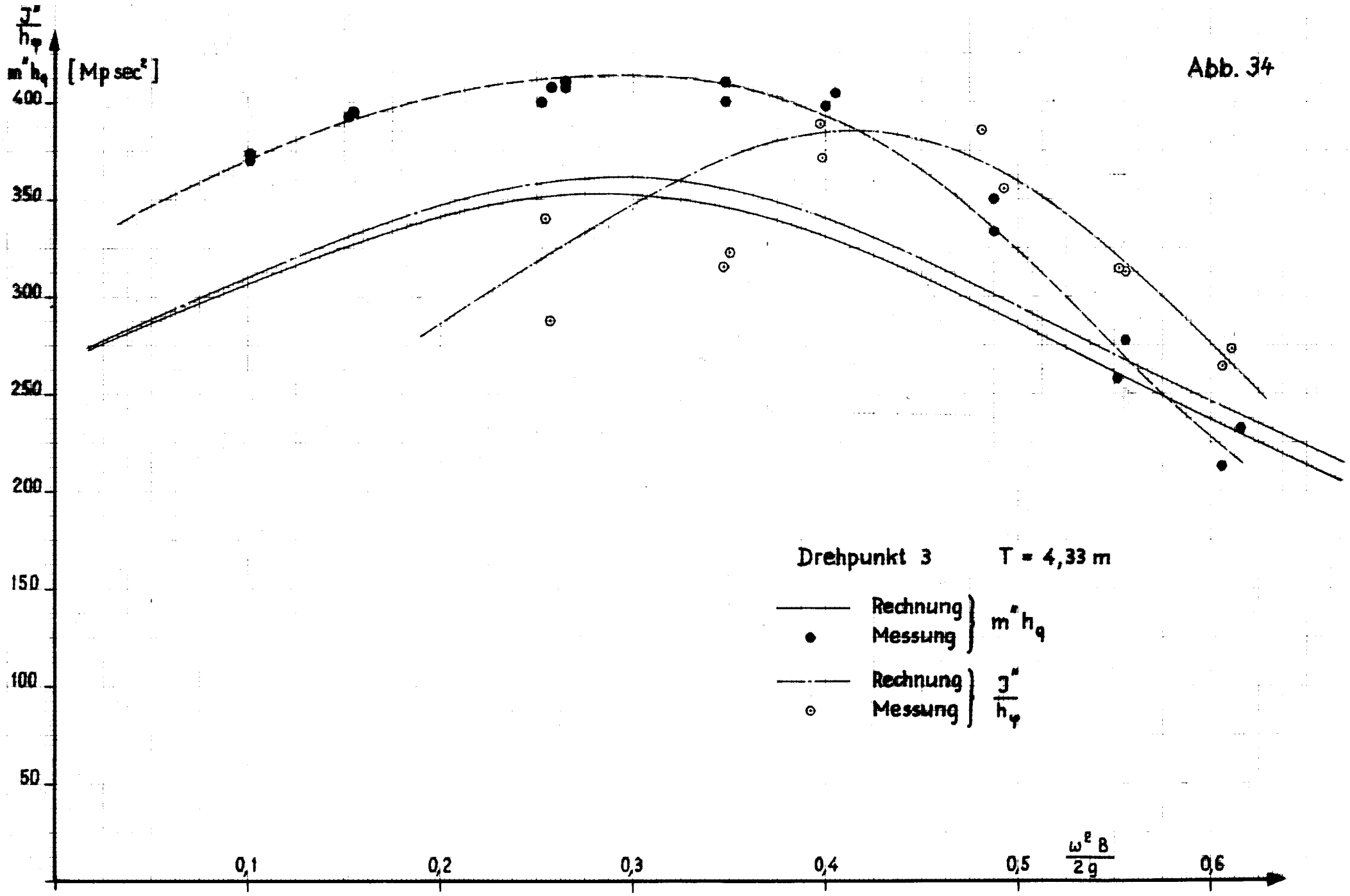
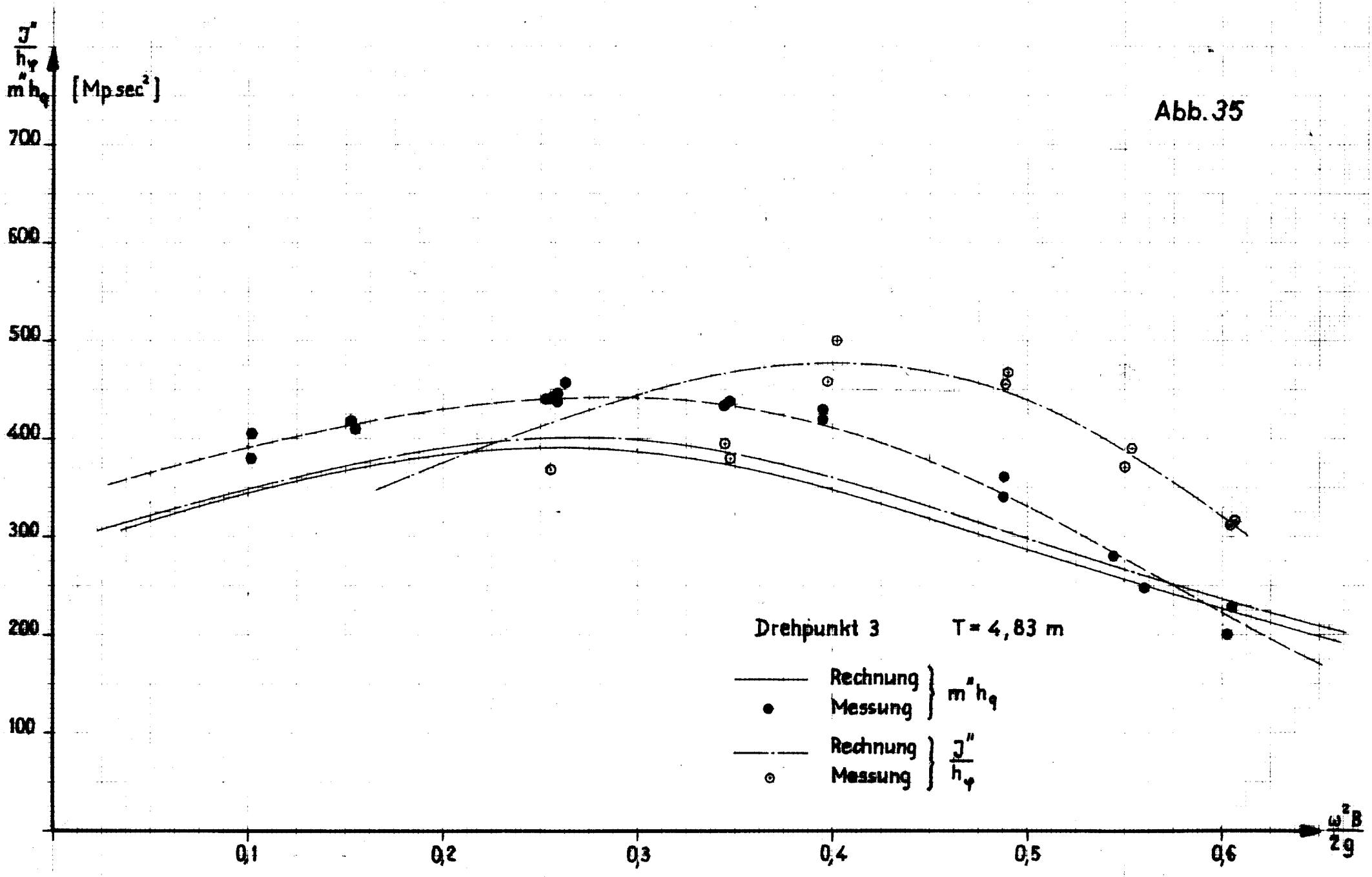

J"/h_φ
m"h_q [Mp sec²]
400
350
300
250
200
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
ω² B / 2g
0,6
Drehpunkt 3
T = 4,33 m
Rechnung
Messung
m"h_q
Rechnung
Messung
J"/h_φ

Abb. 34


$\frac{J''}{h_\varphi}$
$m''h_\varphi$ [Mp sec²]
Abb. 35
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
Drehpunkt 3
T = 4,83 m
Rechnung
Messung
$m''h_\varphi$
Rechnung
Messung
$\frac{J''}{h_\varphi}$

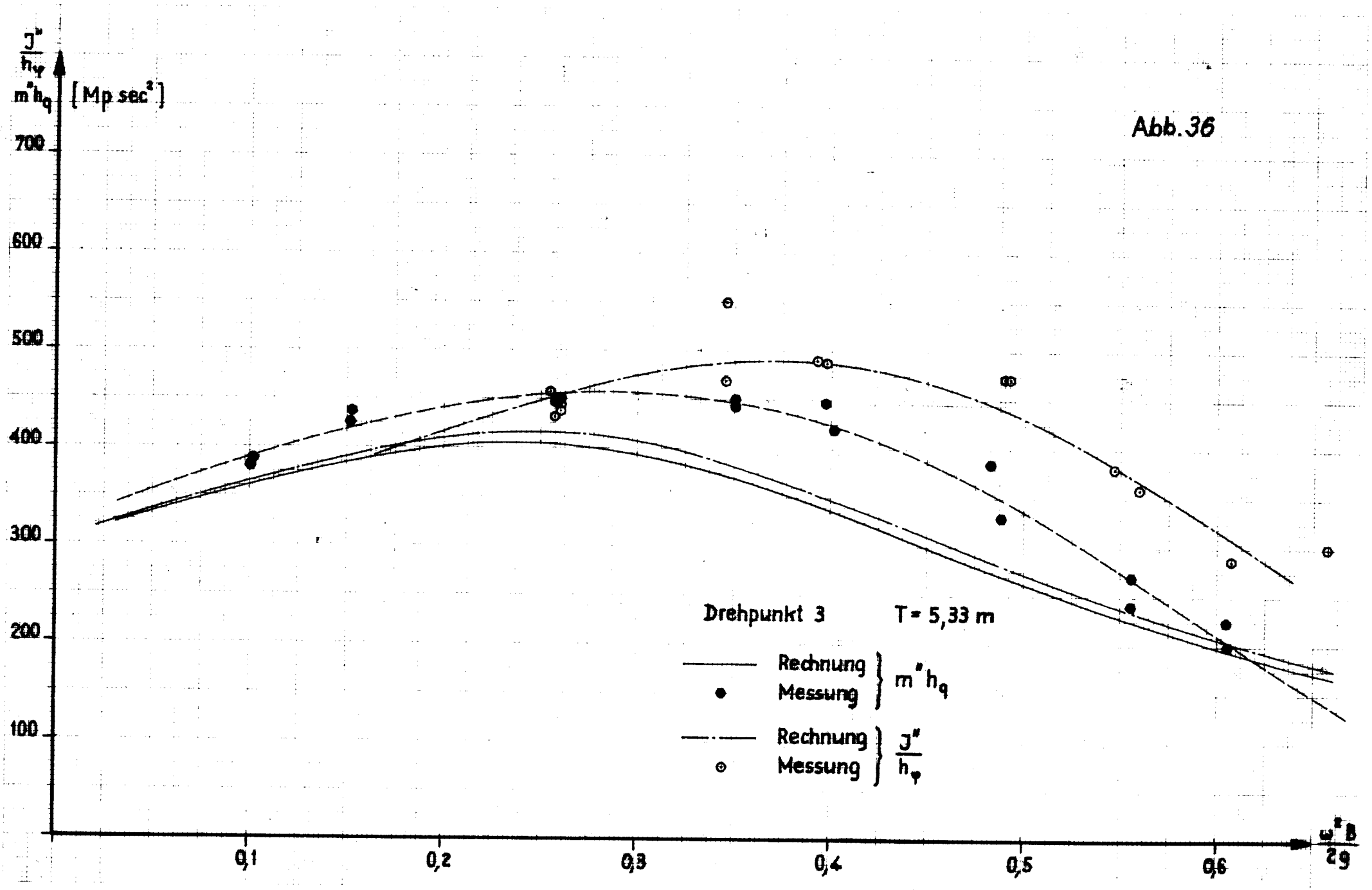
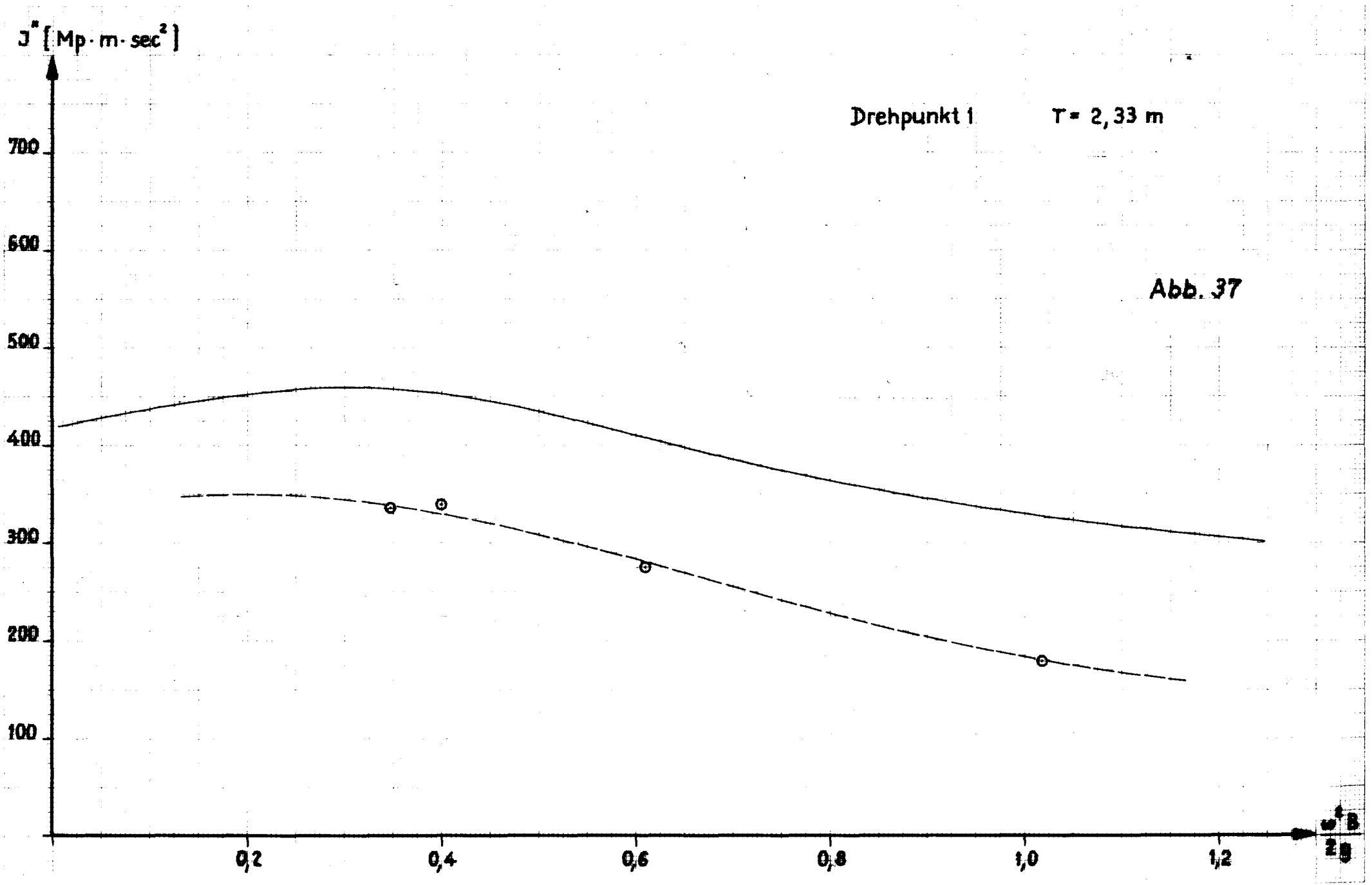
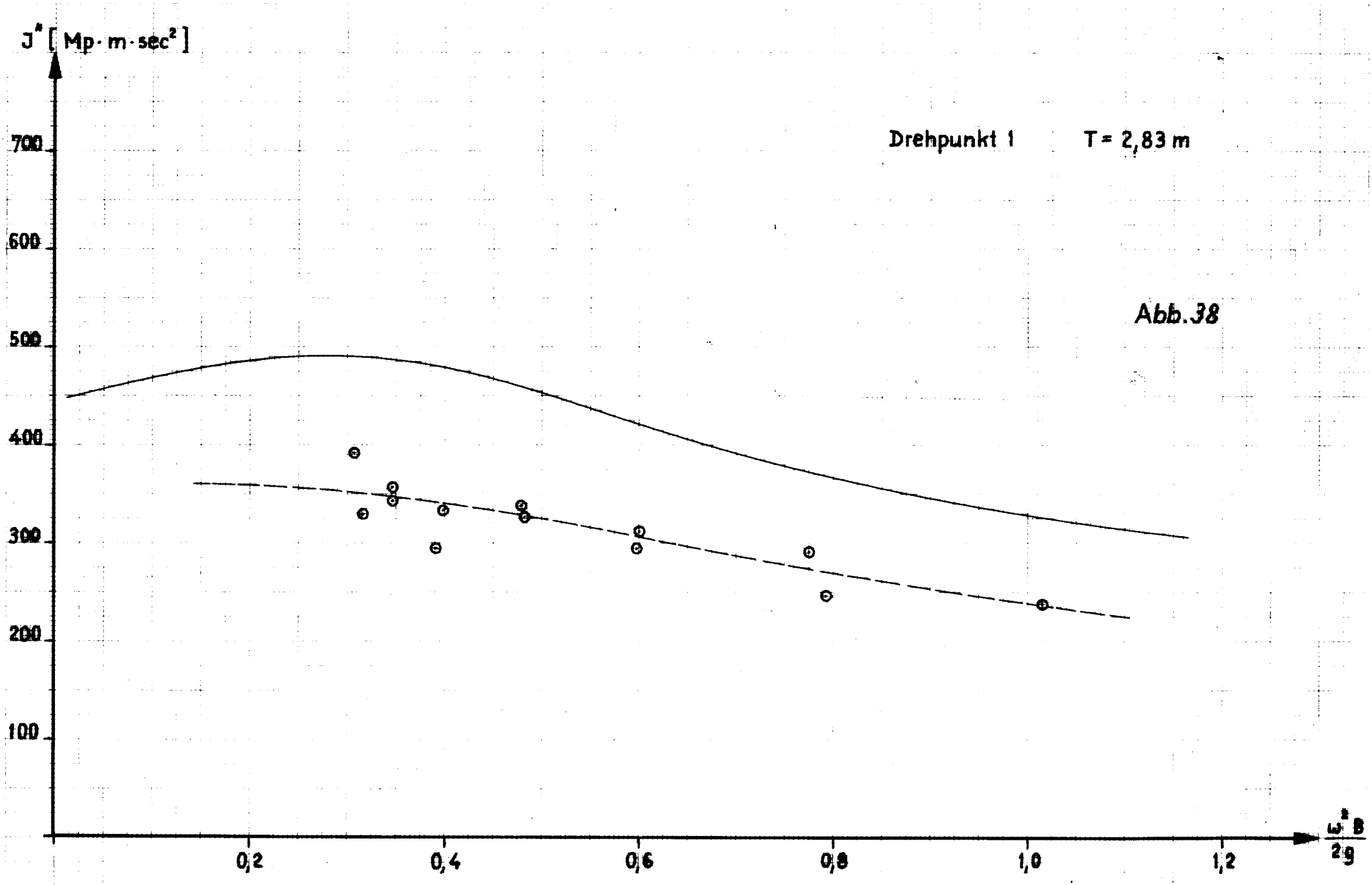

J"/hφ
m"hq [Mp sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g
Drehpunkt 3
T = 5,33 m
Rechnung
Messung
m"hq
Rechnung
Messung
J"/hφ

Abb. 36


J* [Mp · m · sec²]
Drehpunkt 1
T = 2,33 m
Abb. 37
700
600
500
400
300
200
100
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2


J* [Mp · m · sec²]
700
600
500
400
300
200
100
Drehpunkt 1
T = 2,83 m
Abb. 38
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
ω² B / 2g

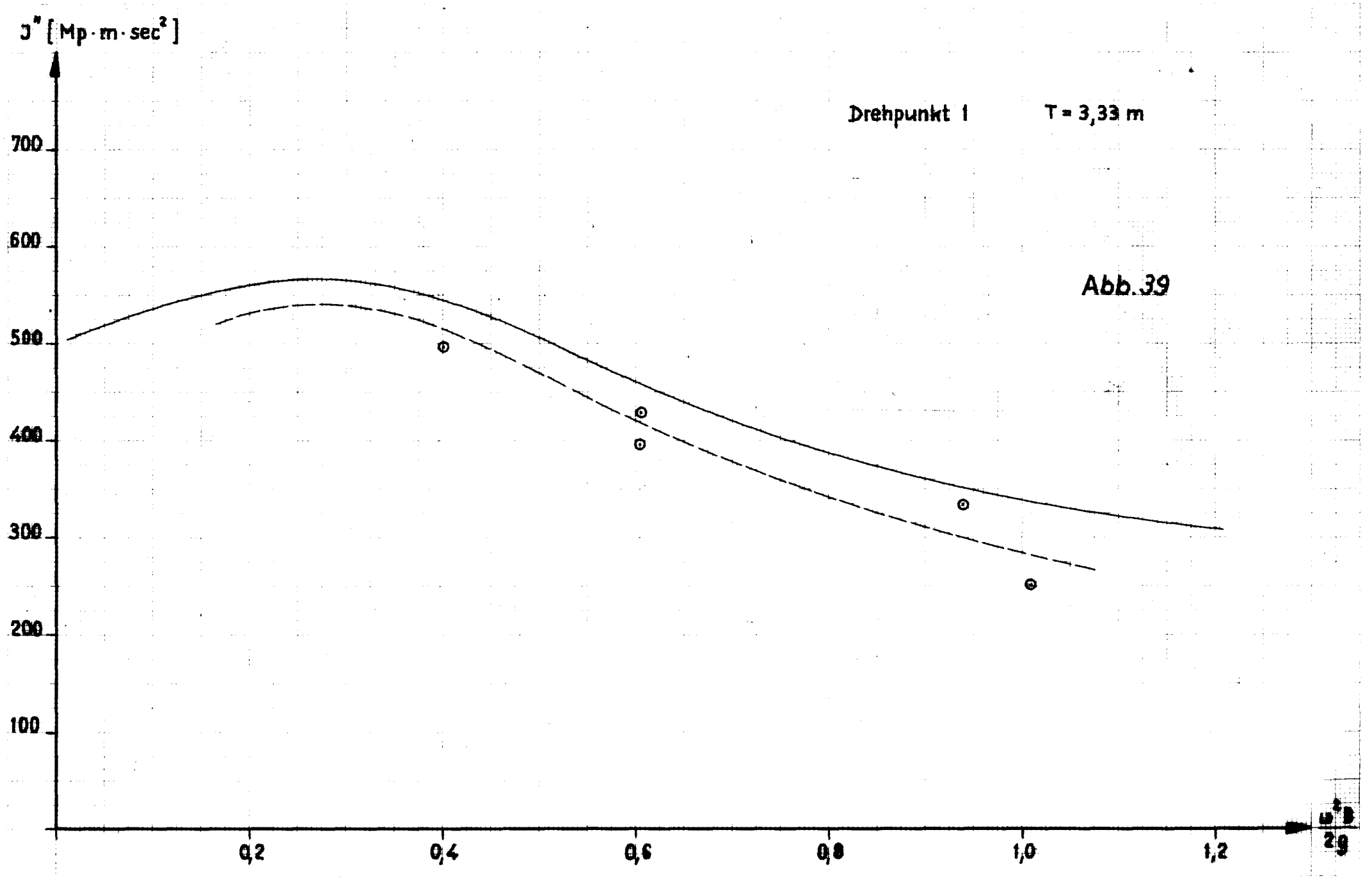
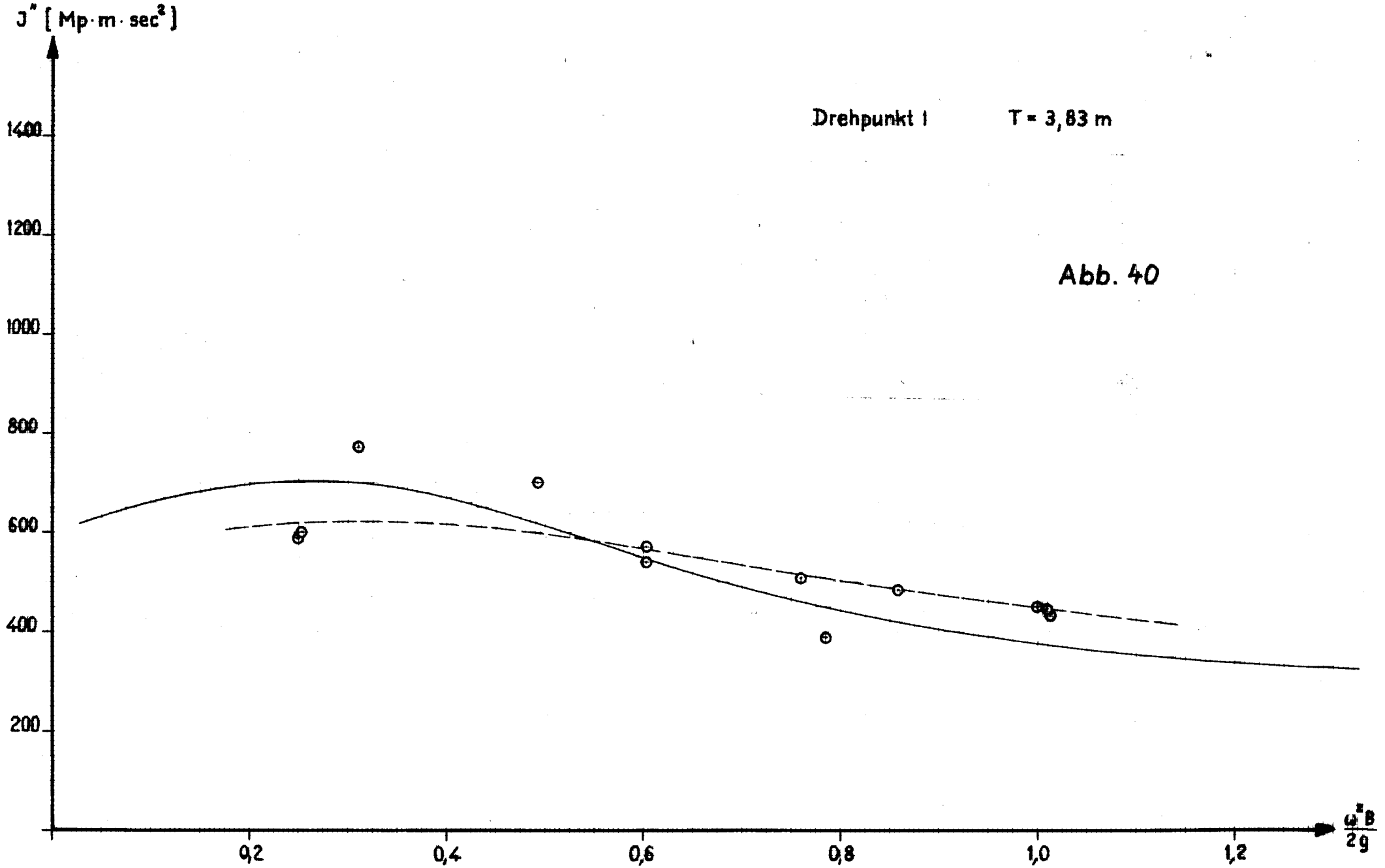
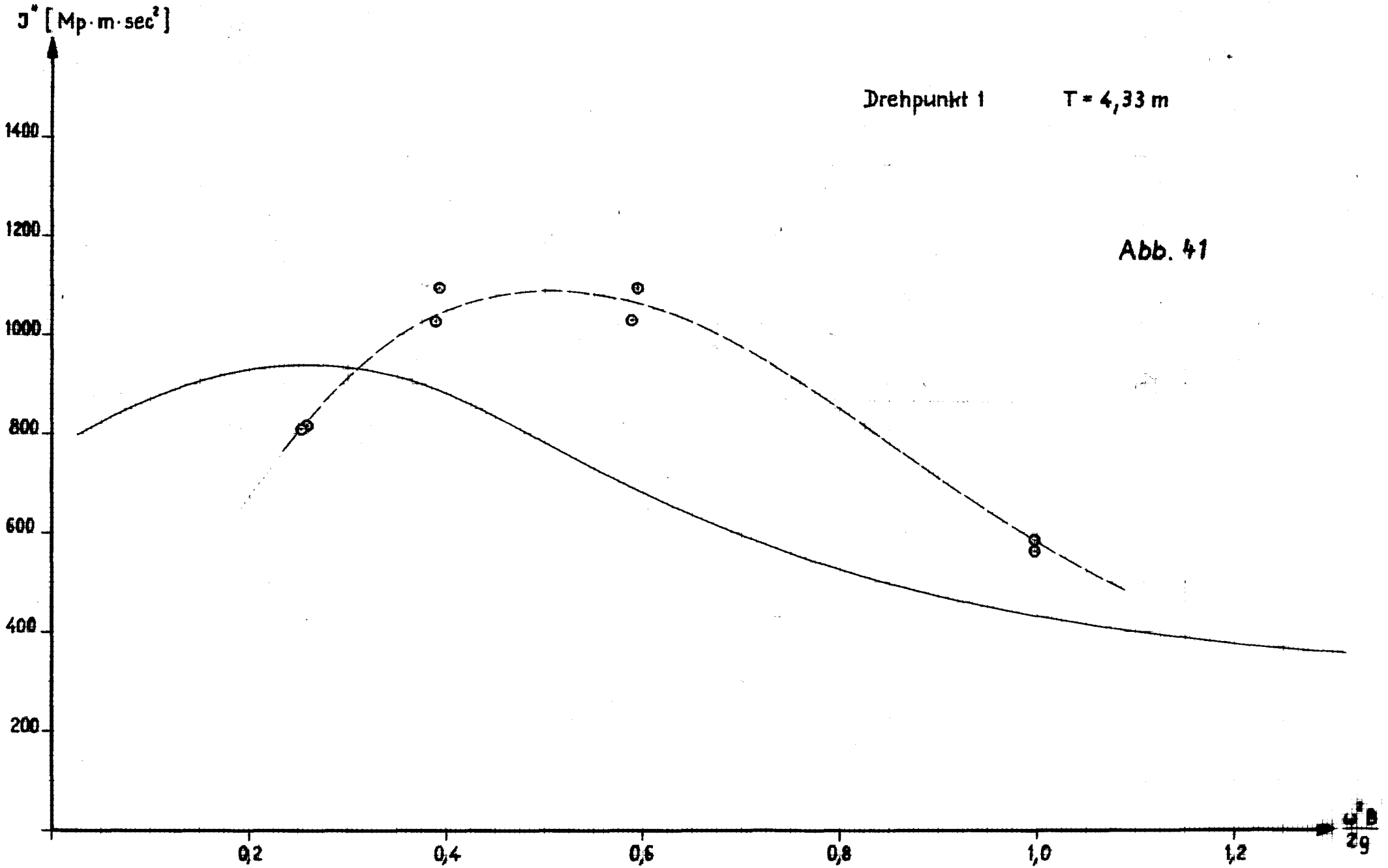
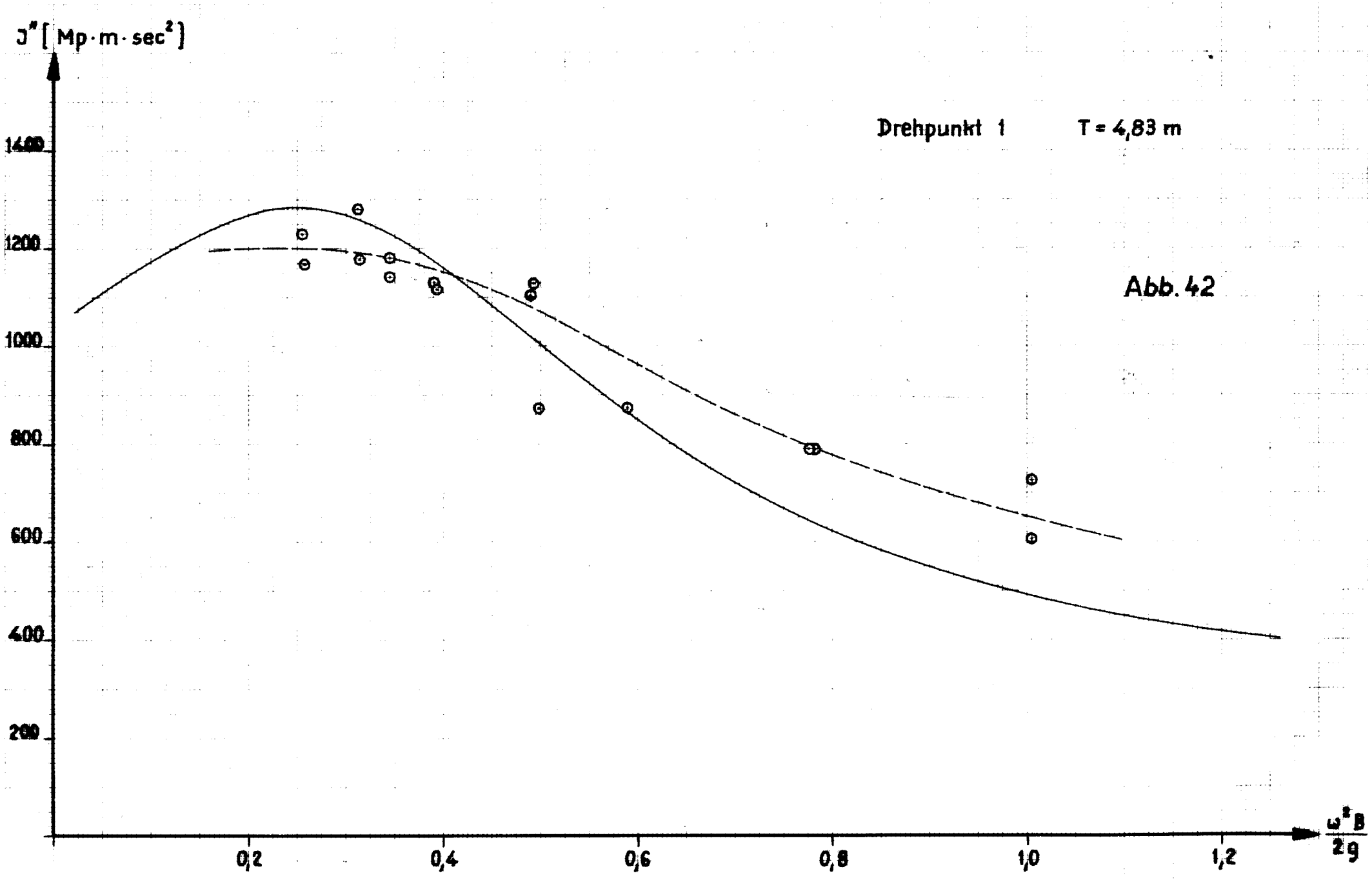

J" [Mp · m · sec²]
Drehpunkt 1
T = 3,33 m
700
600
500
400
300
200
100
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2

Abb. 39


J'' [Mp · m · sec²]
Drehpunkt I
T = 3,83 m
Abb. 40
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
ω²B / 2g


J* [Mp·m·sec²]
Drehpunkt 1
T = 4,33 m
Abb. 41
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
v²B/2g


J'' [Mp · m · sec²]
Drehpunkt 1
T = 4,83 m
Abb. 42
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
ω²B / 2g

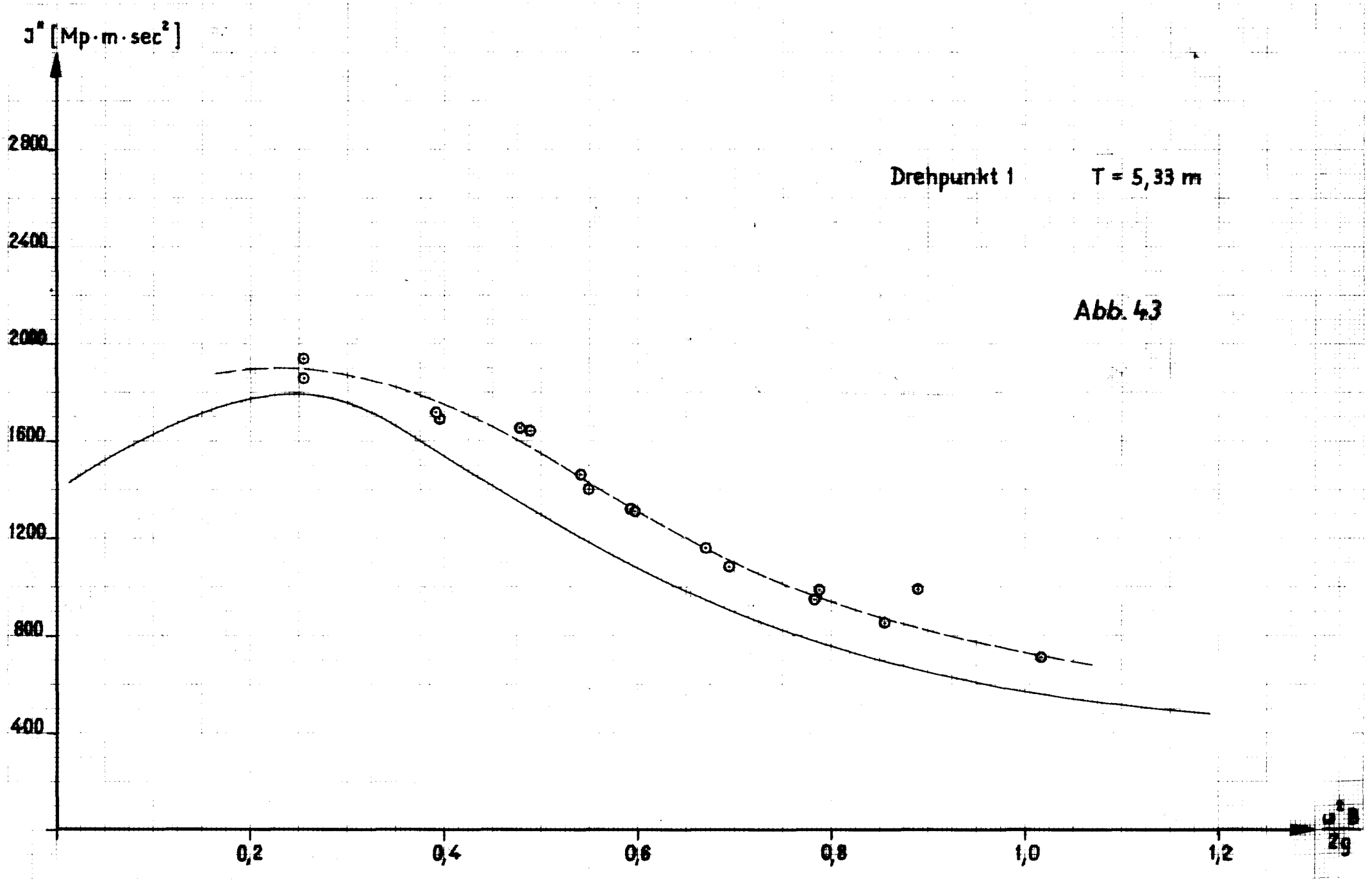
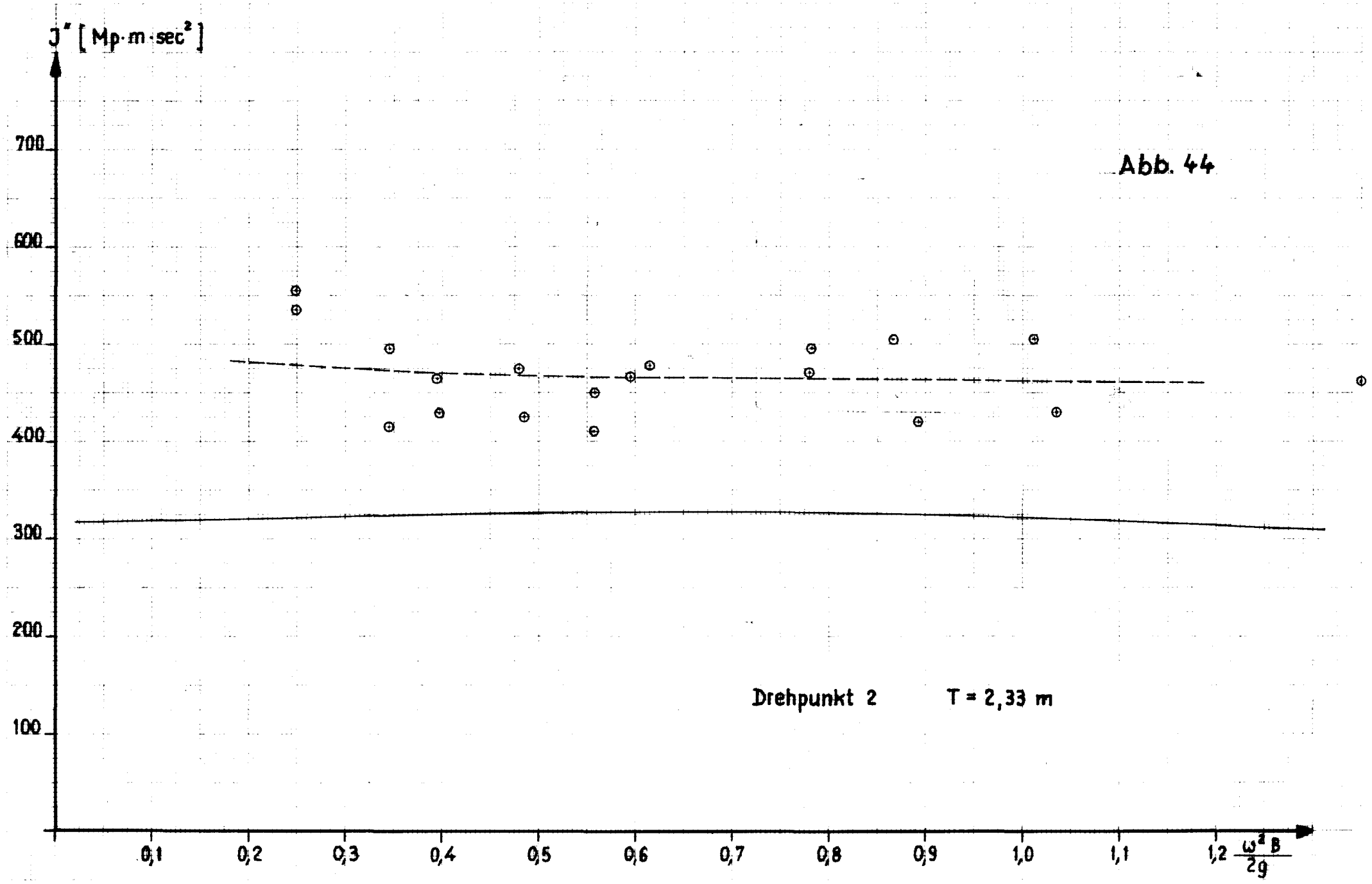

J* [Mp·m·sec²]
2800
2400
2000
1600
1200
800
400
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
Drehpunkt 1
T = 5,33 m

Abb. 43


J'' [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 44
Drehpunkt 2
T = 2,33 m

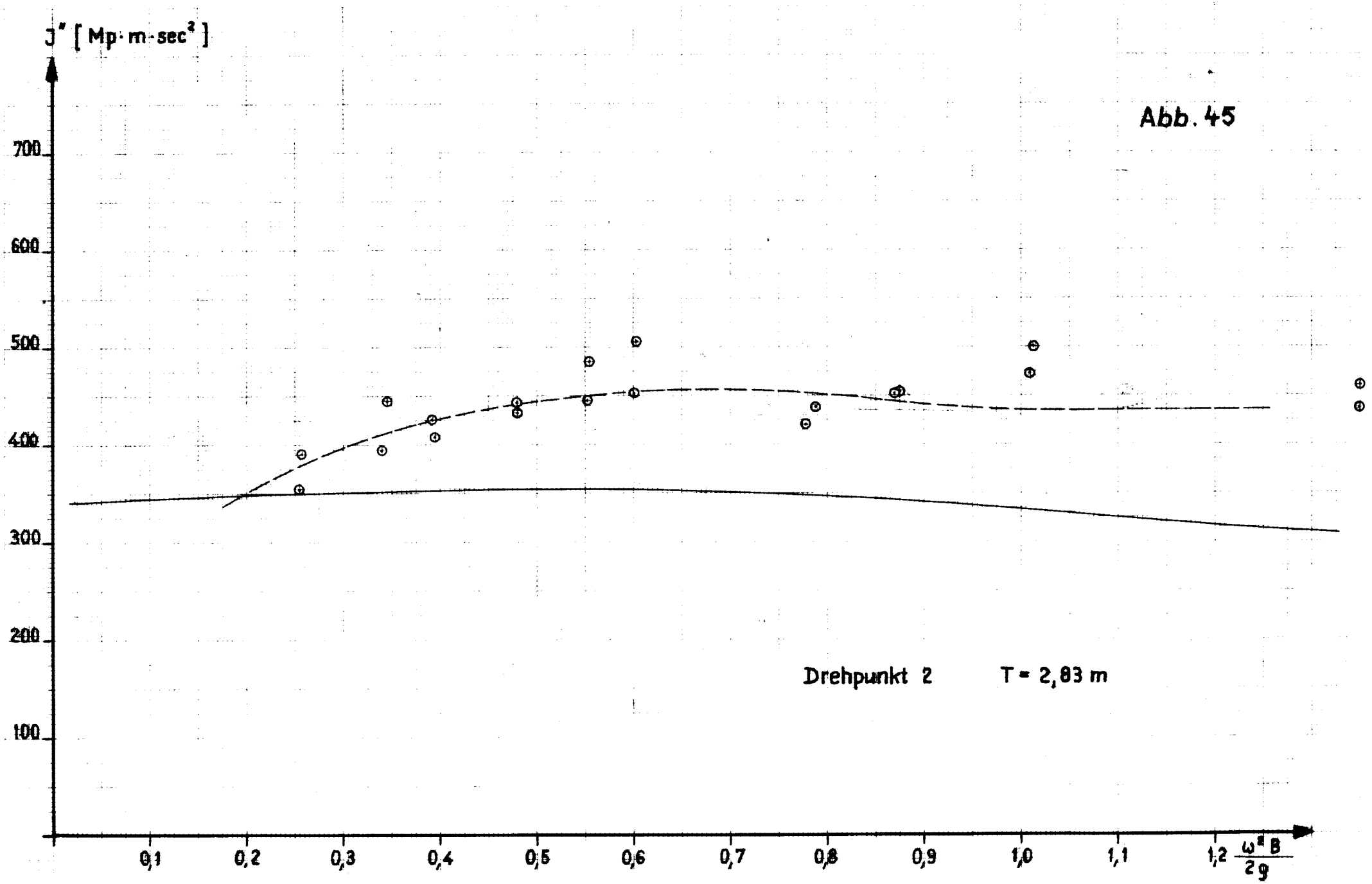
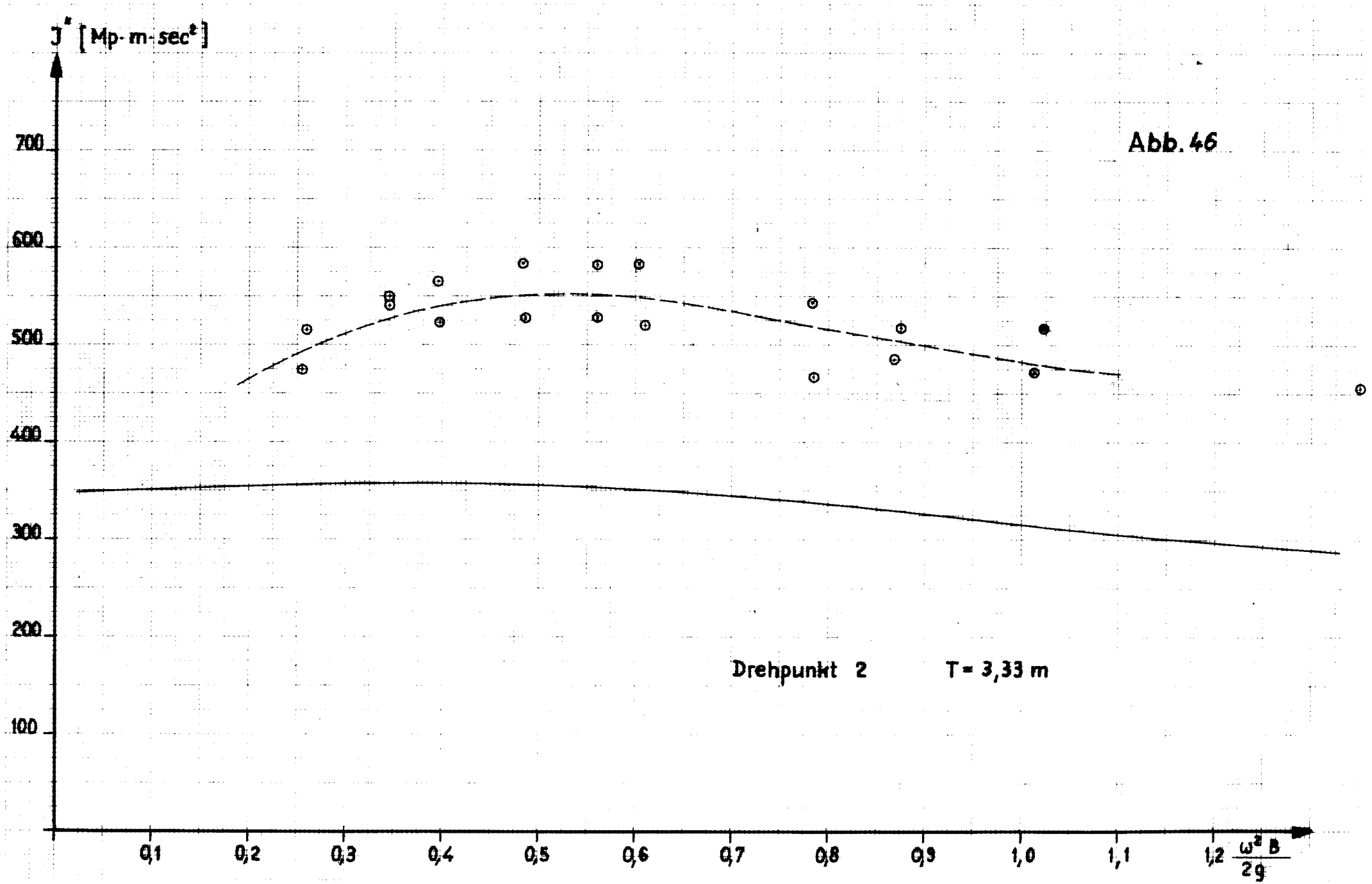
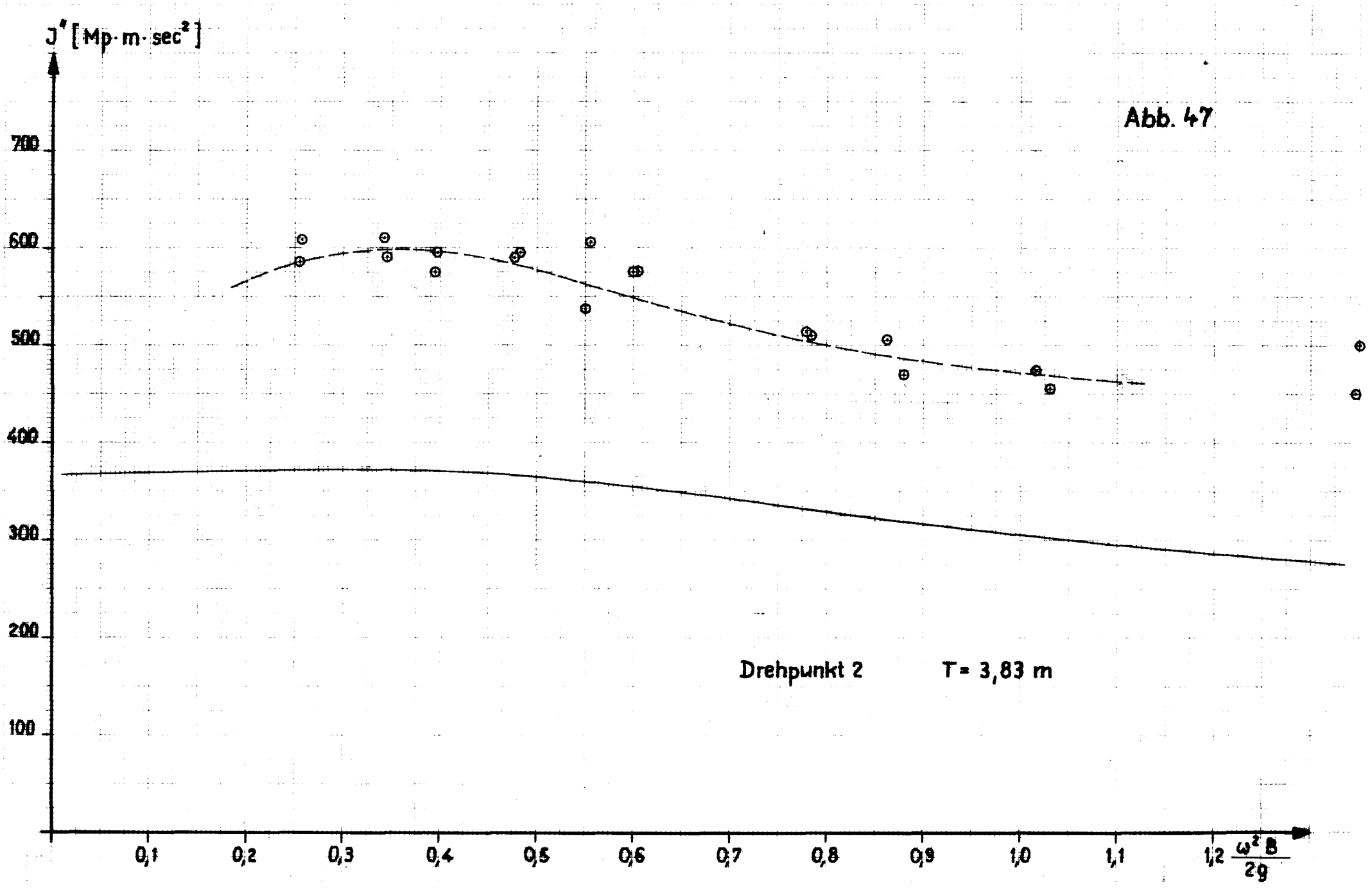
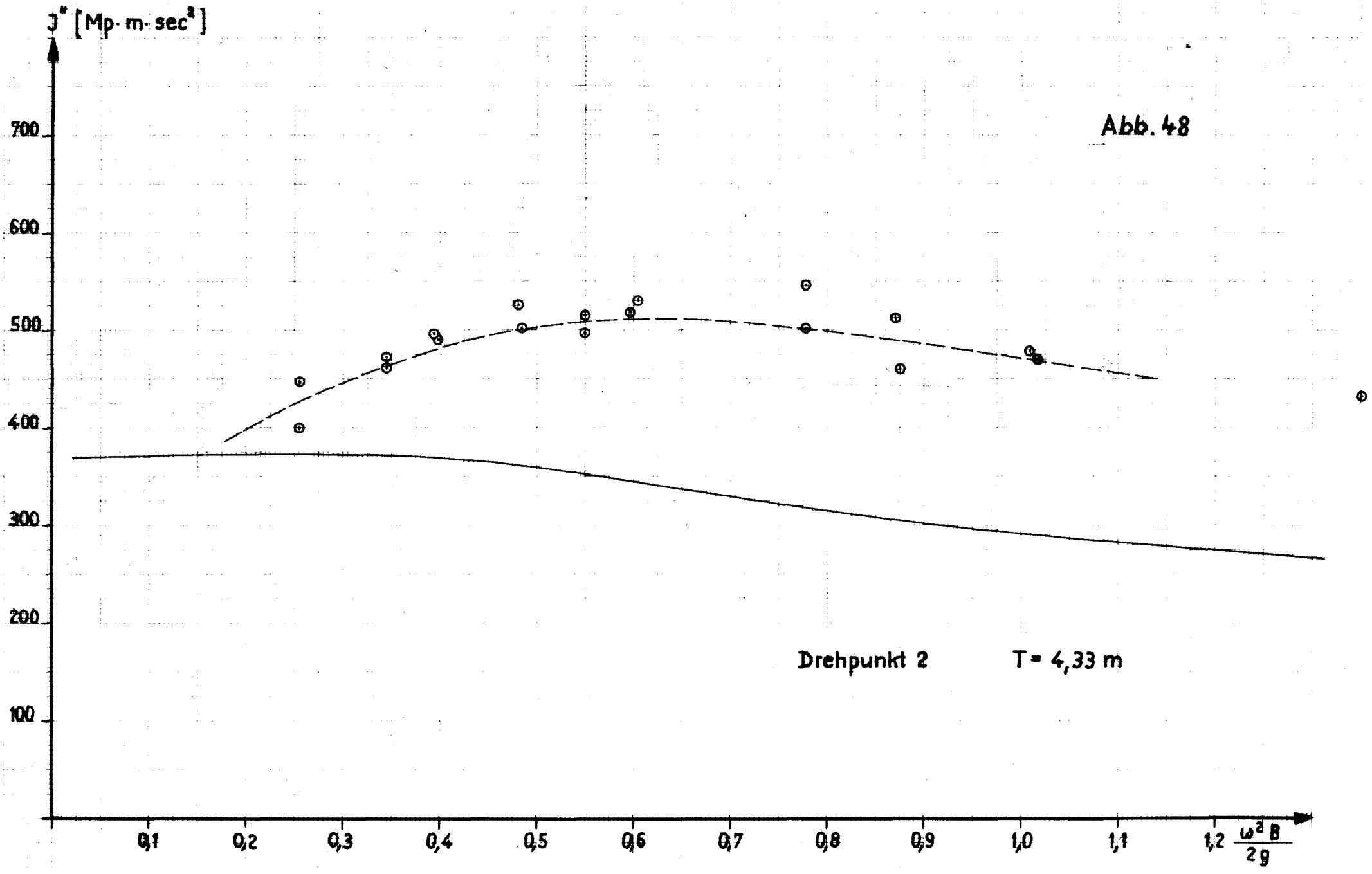
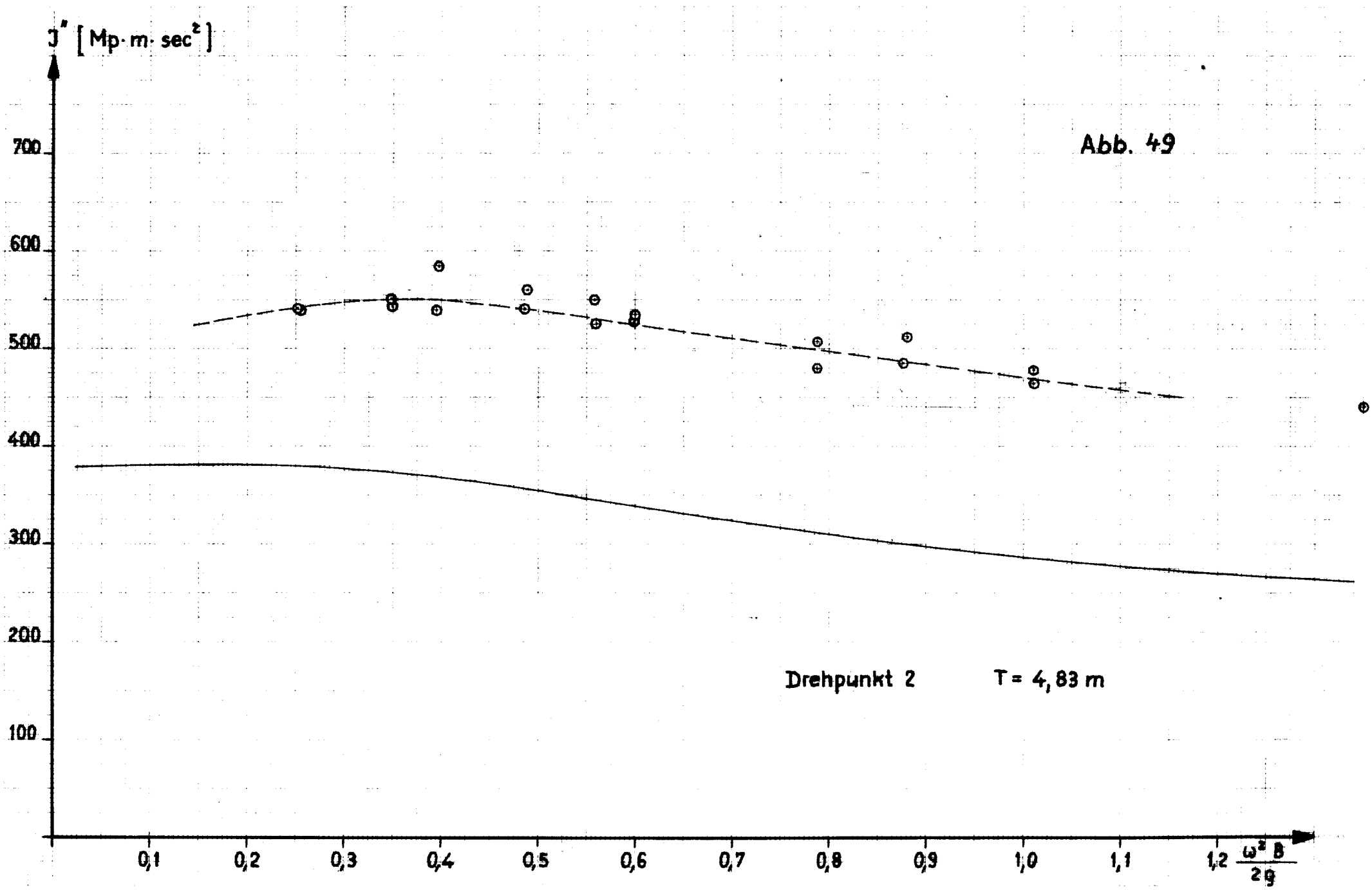

J'' [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Drehpunkt 2
T = 2,83 m

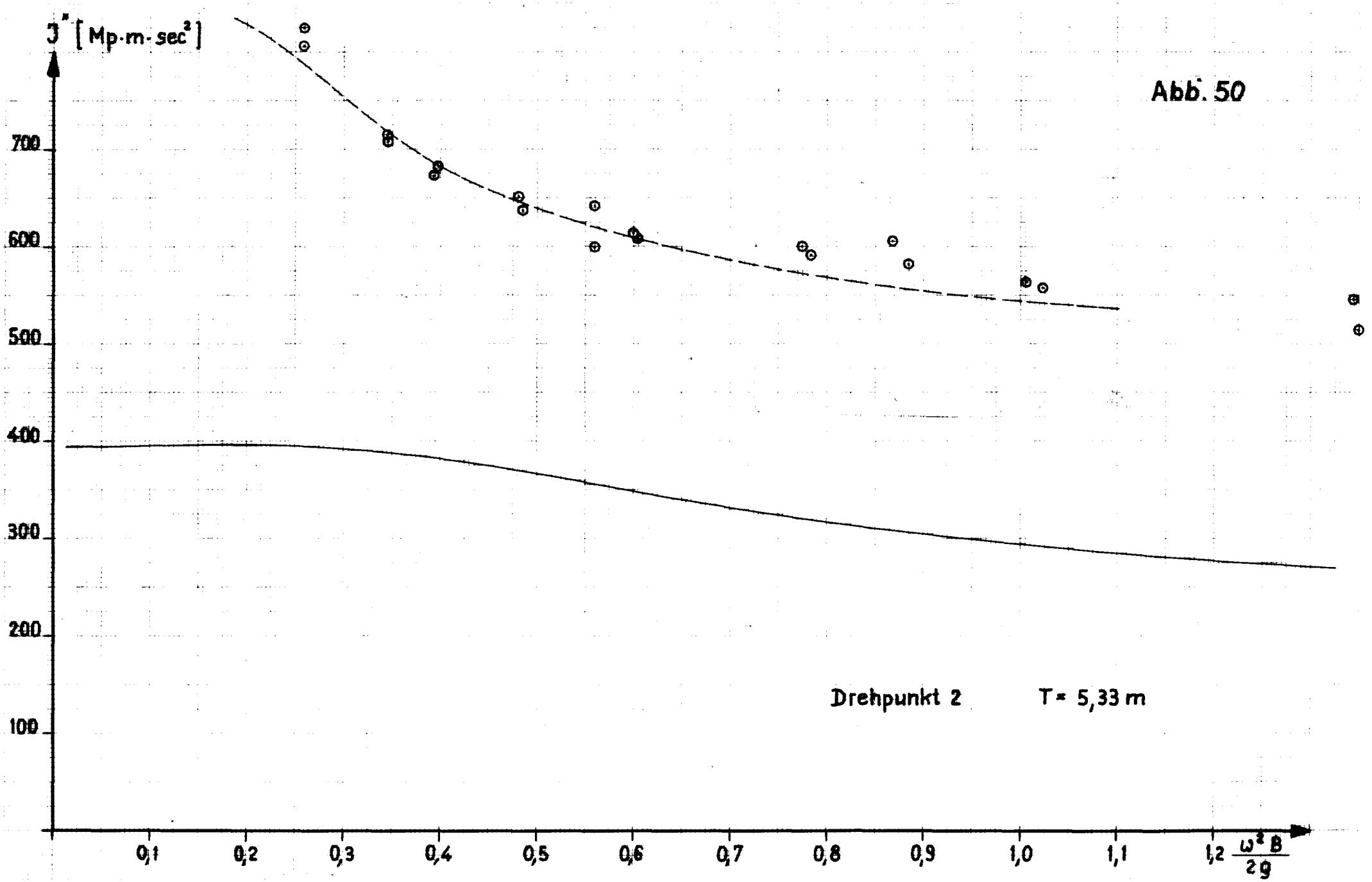
Abb. 45


J* [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 46
Drehpunkt 2
T = 3,33 m


J* [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω²B/2g
Abb. 47
Drehpunkt 2
T= 3,83 m


J" [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 48
Drehpunkt 2
T = 4,33 m


J'' [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 49
Drehpunkt 2
T = 4,83 m


J" [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω²B/2g
Abb. 50
Drehpunkt 2
T = 5,33 m

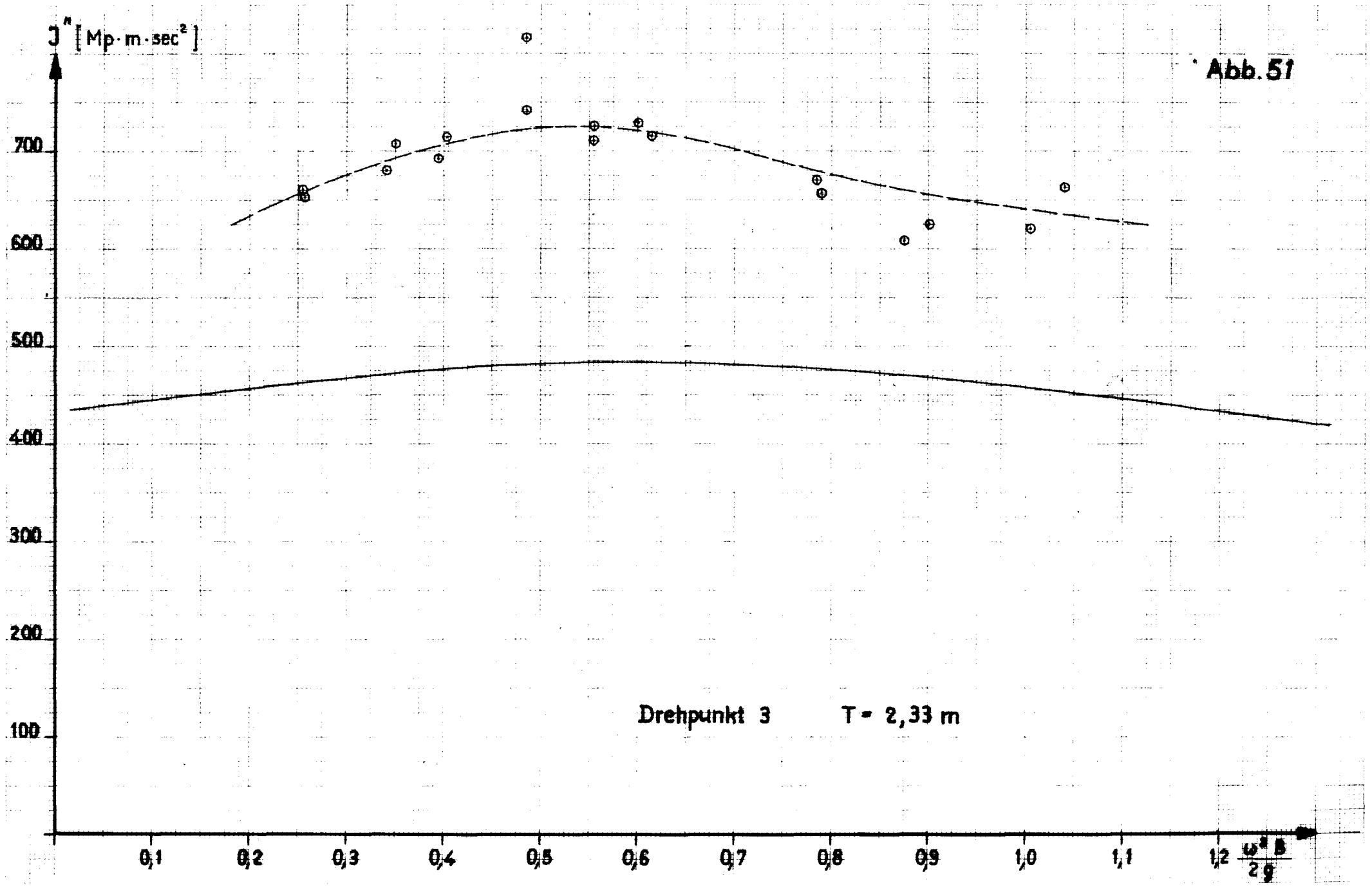
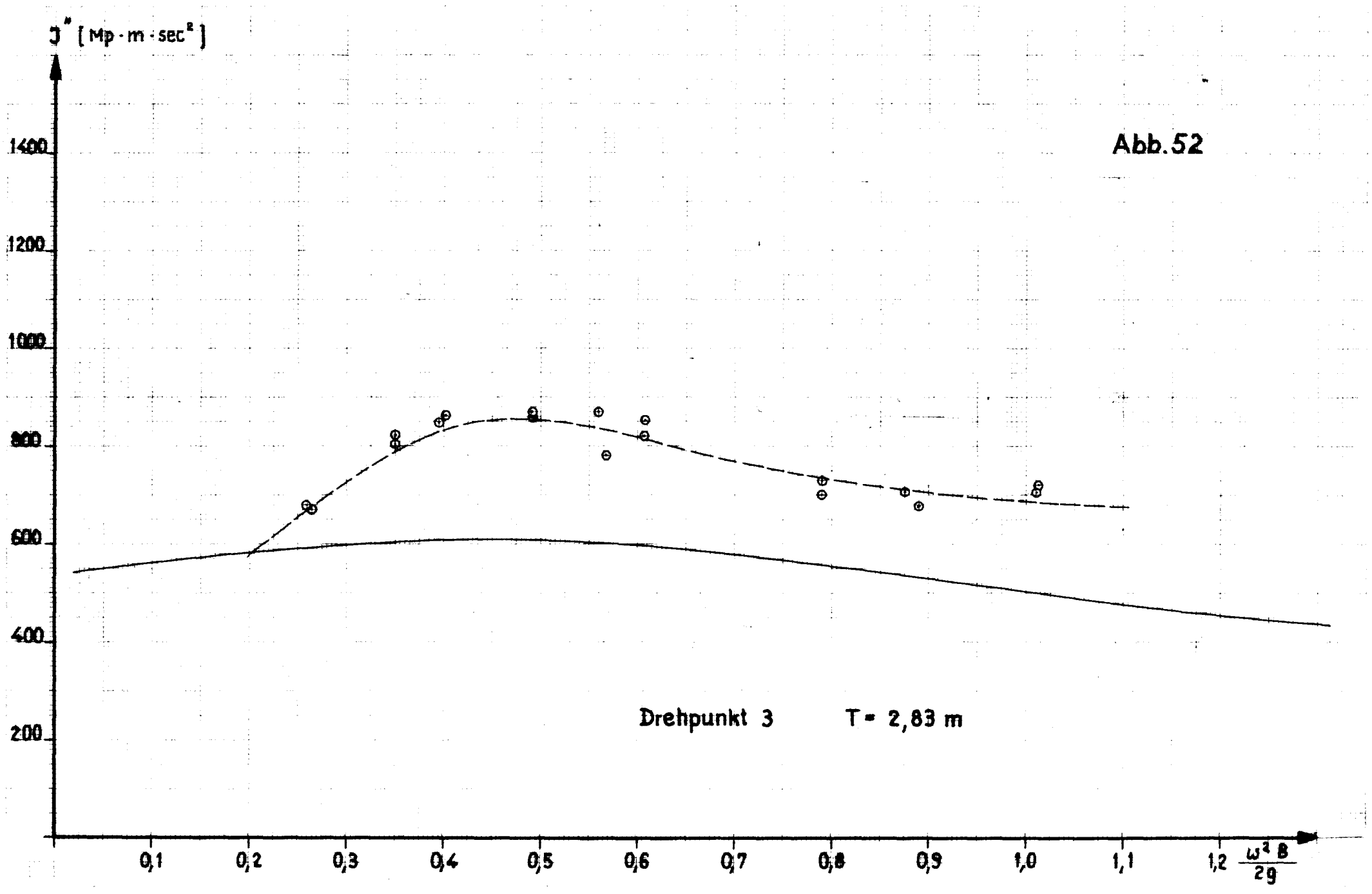
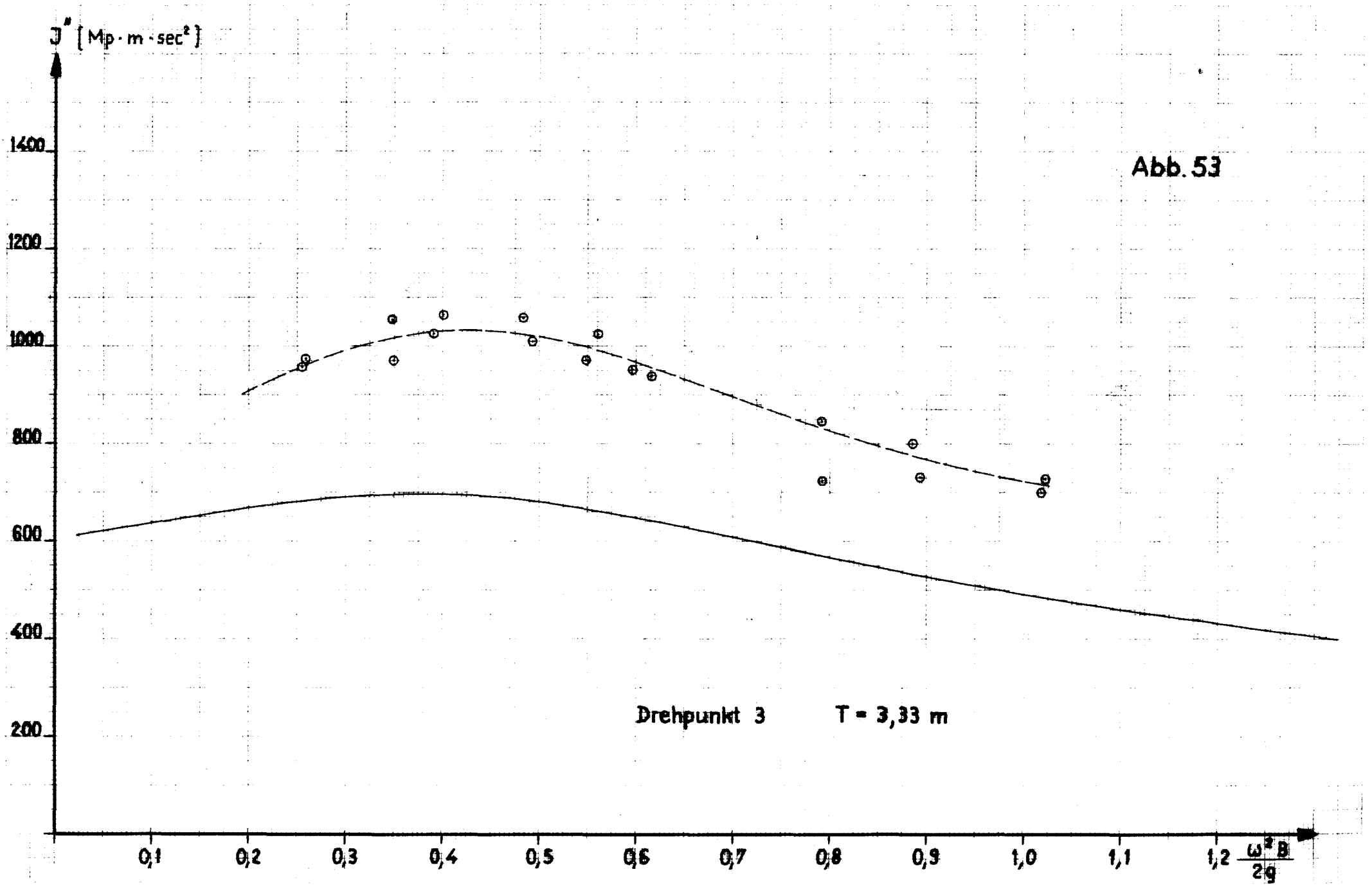
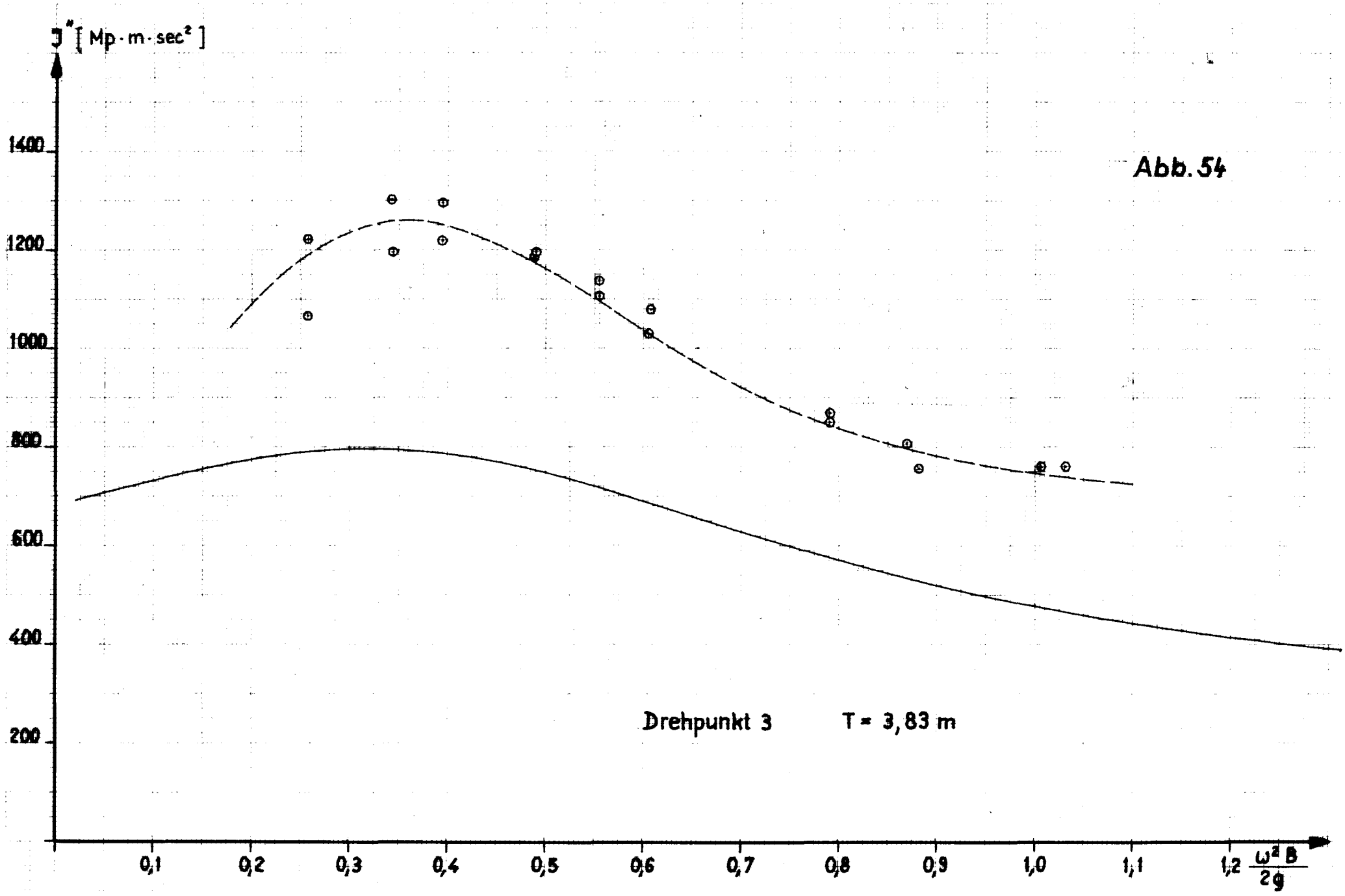
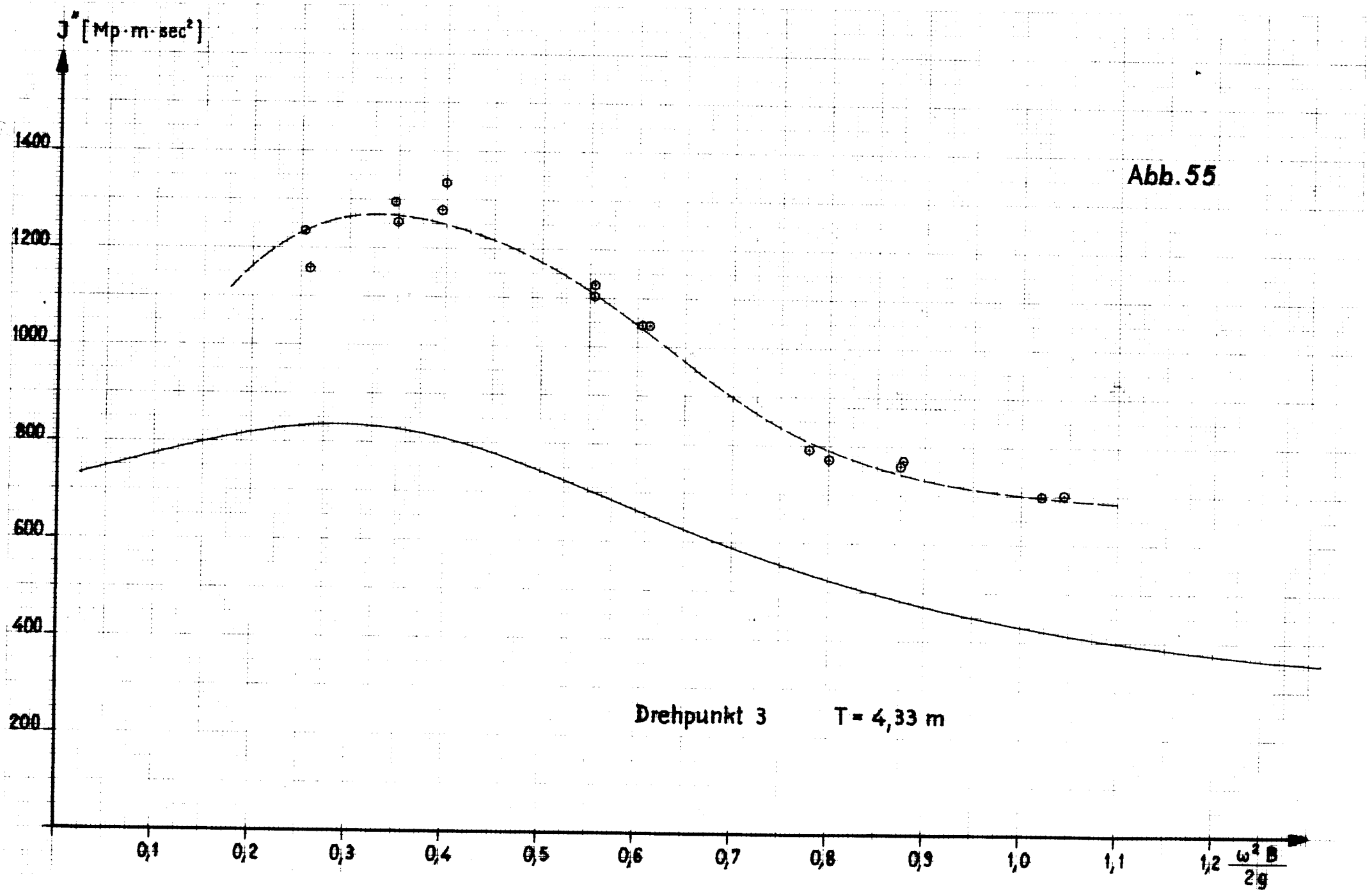

J" [Mp·m·sec²]
700
600
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Drehpunkt 3
T = 2,33 m

Abb. 51


J'' [Mp · m · sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 52
Drehpunkt 3
T = 2,83 m


J" [Mp · m · sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω²B/2g
Abb. 53
Drehpunkt 3
T = 3,33 m


J" [Mp · m · sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 54
Drehpunkt 3
T = 3,83 m


J'' [Mp·m·sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 55
Drehpunkt 3
T = 4,33 m

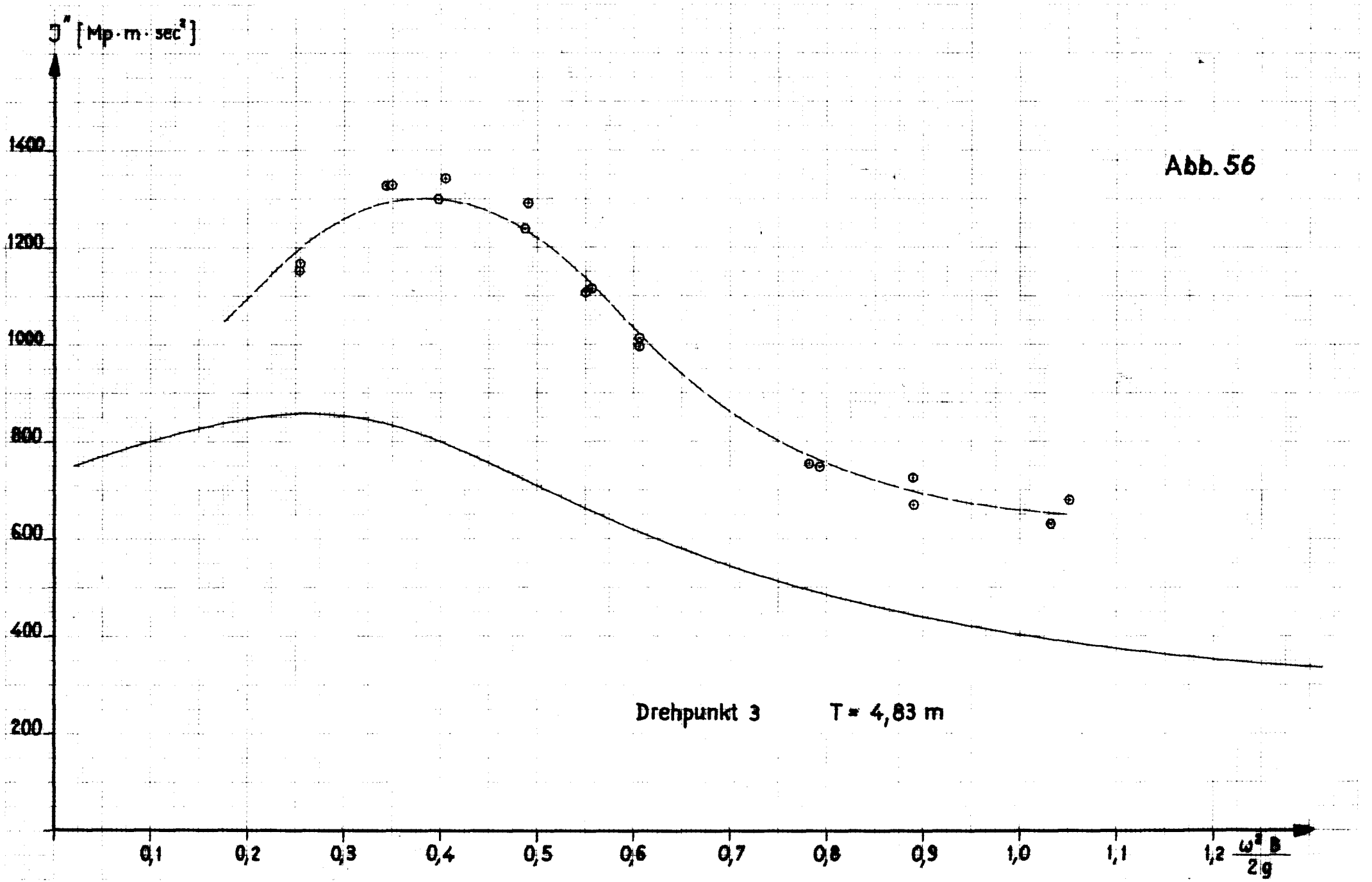
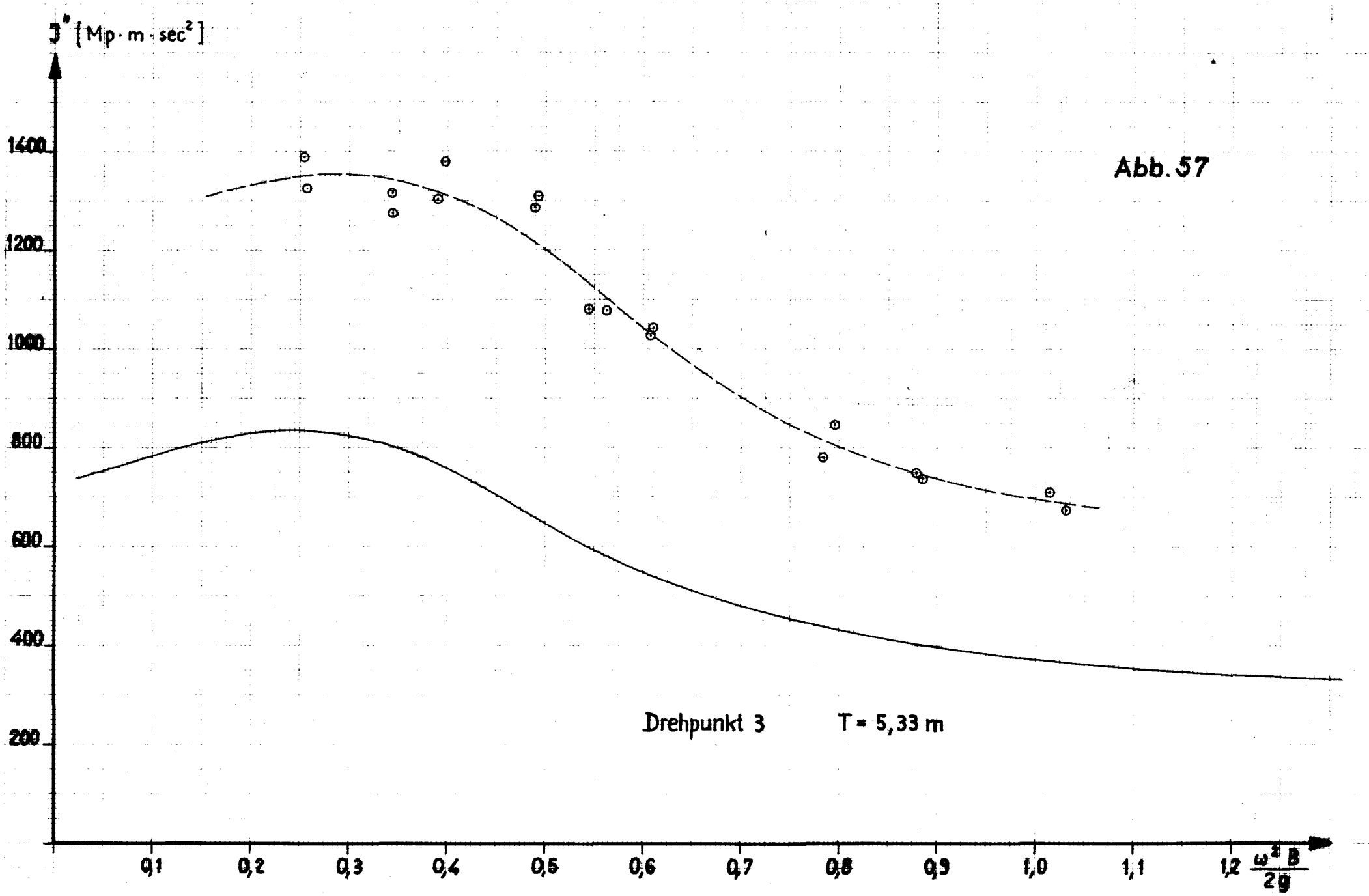

J'' [Mp · m · sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² b / 2g
Drehpunkt 3
T = 4,83 m

Abb. 56


J* [Mp · m · sec²]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
ω² B / 2g
Abb. 57
Drehpunkt 3
T = 5,33 m

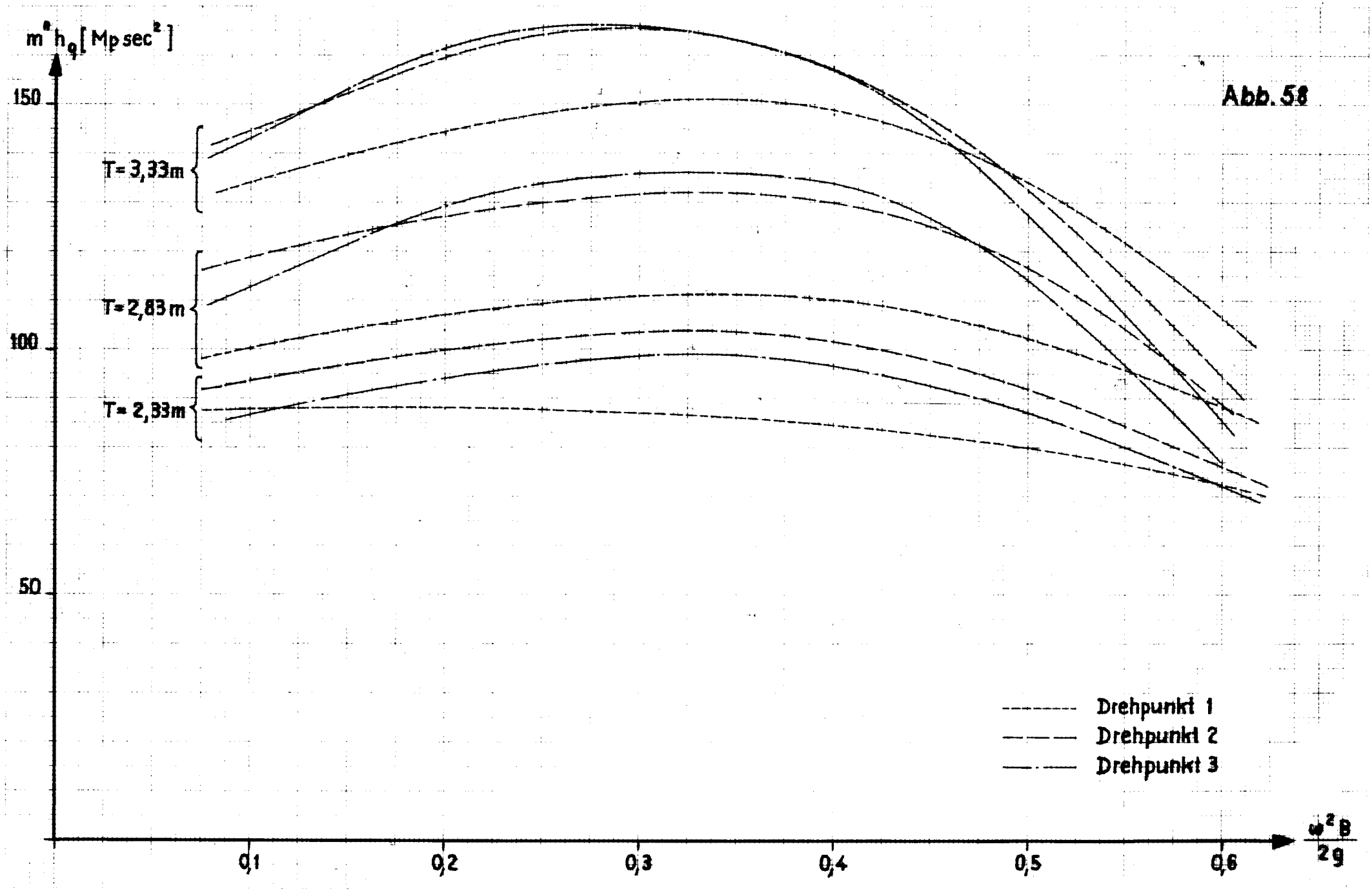
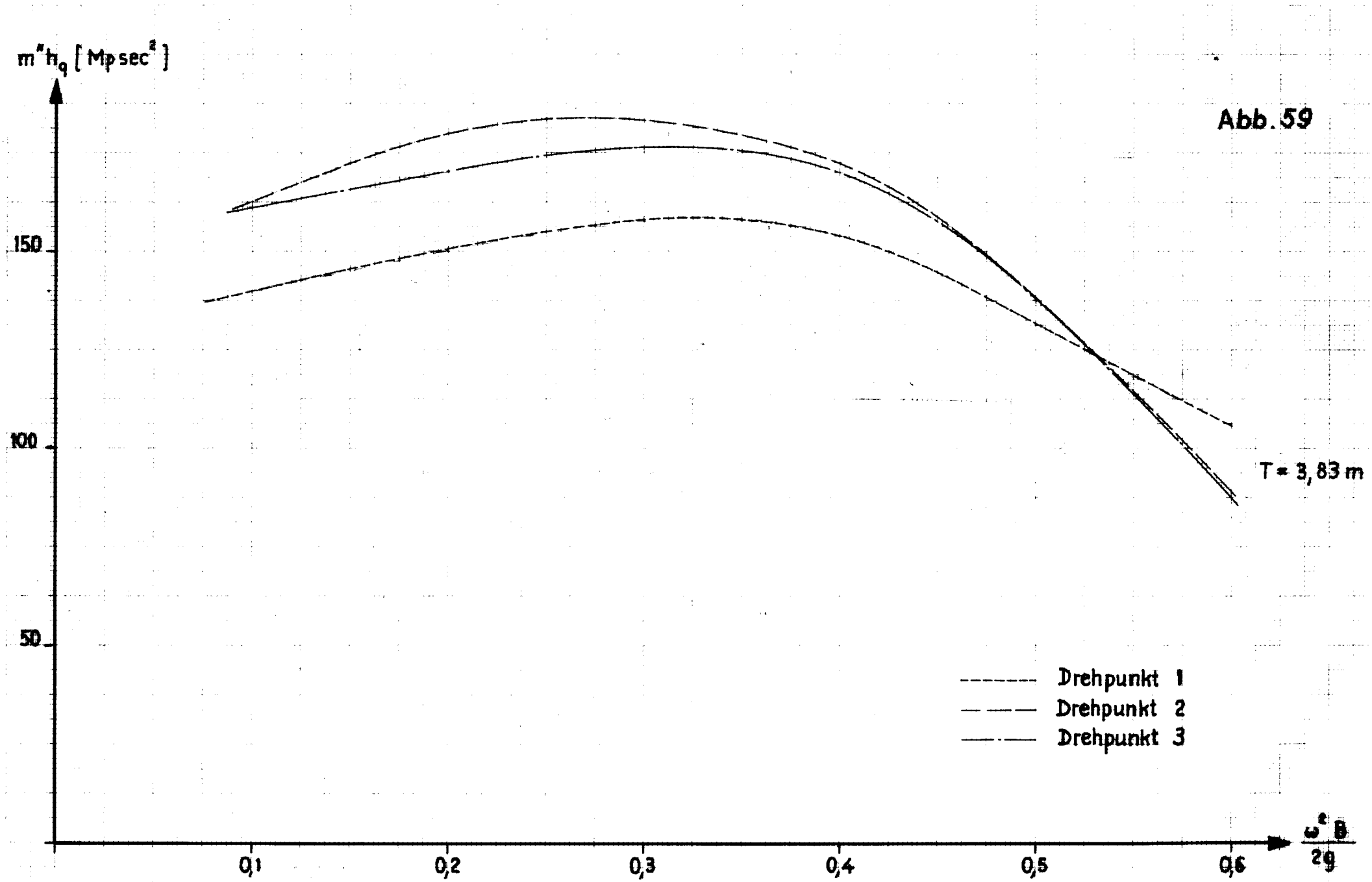

m* h_q [Mp sec²]
150
100
50
T= 3,33m
T= 2,83 m
T= 2,33m
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω² B / 2g
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

Abb. 58


m"h_q [Mp sec²]
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω² B / 2g
Abb. 59
T = 3,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

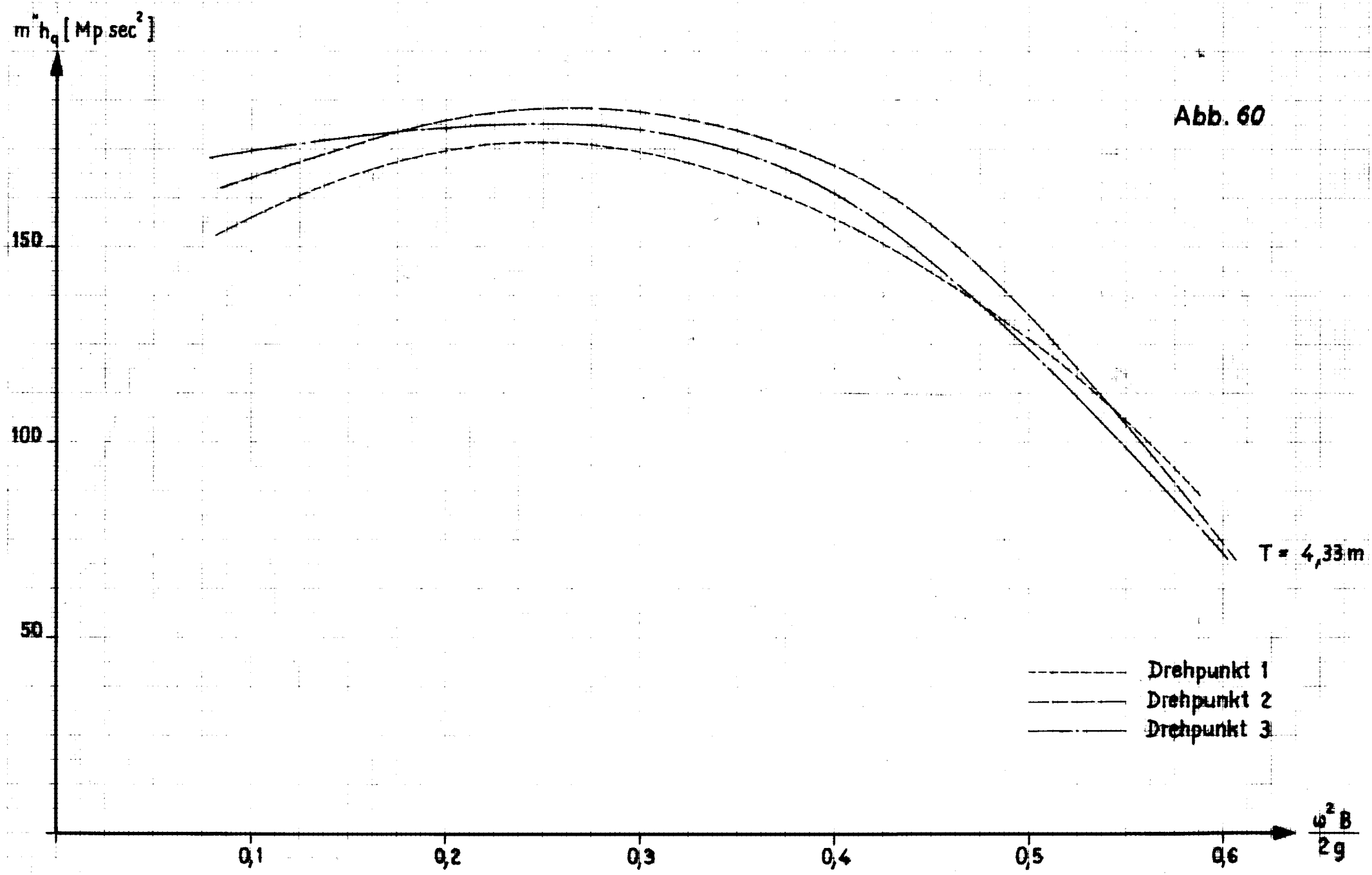

m* h_q [Mp sec²]
150
100
50
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω² B / 2g
T = 4,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

Abb. 60

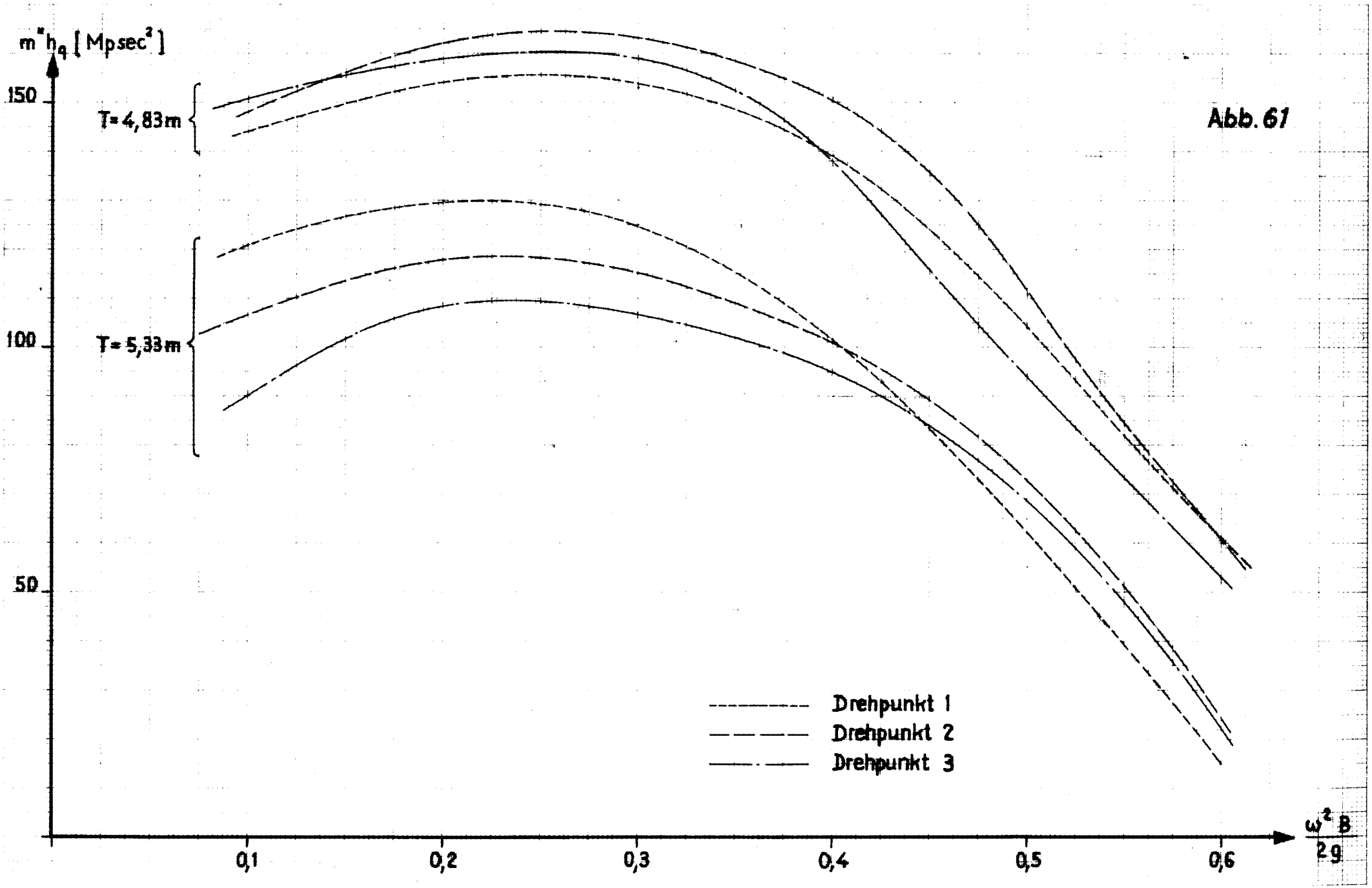
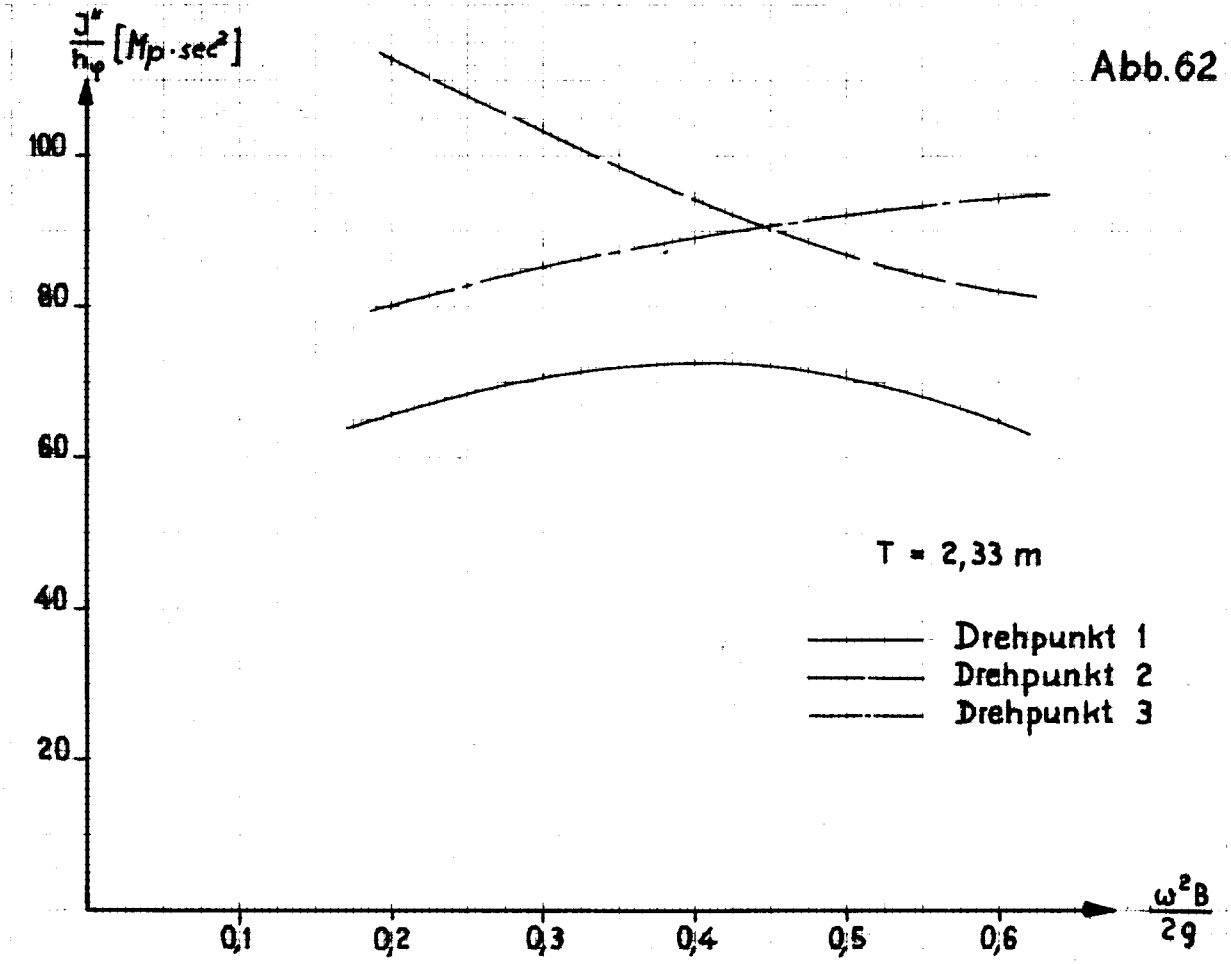

m*hq [Mpsec²]
150
100
50
T=4,83m
T=5,33m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g

Abb. 61

Abb. 62


$\frac{J'}{h_\varphi}$ [Mp·sec²]
100
80
60
40
20
T = 2,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

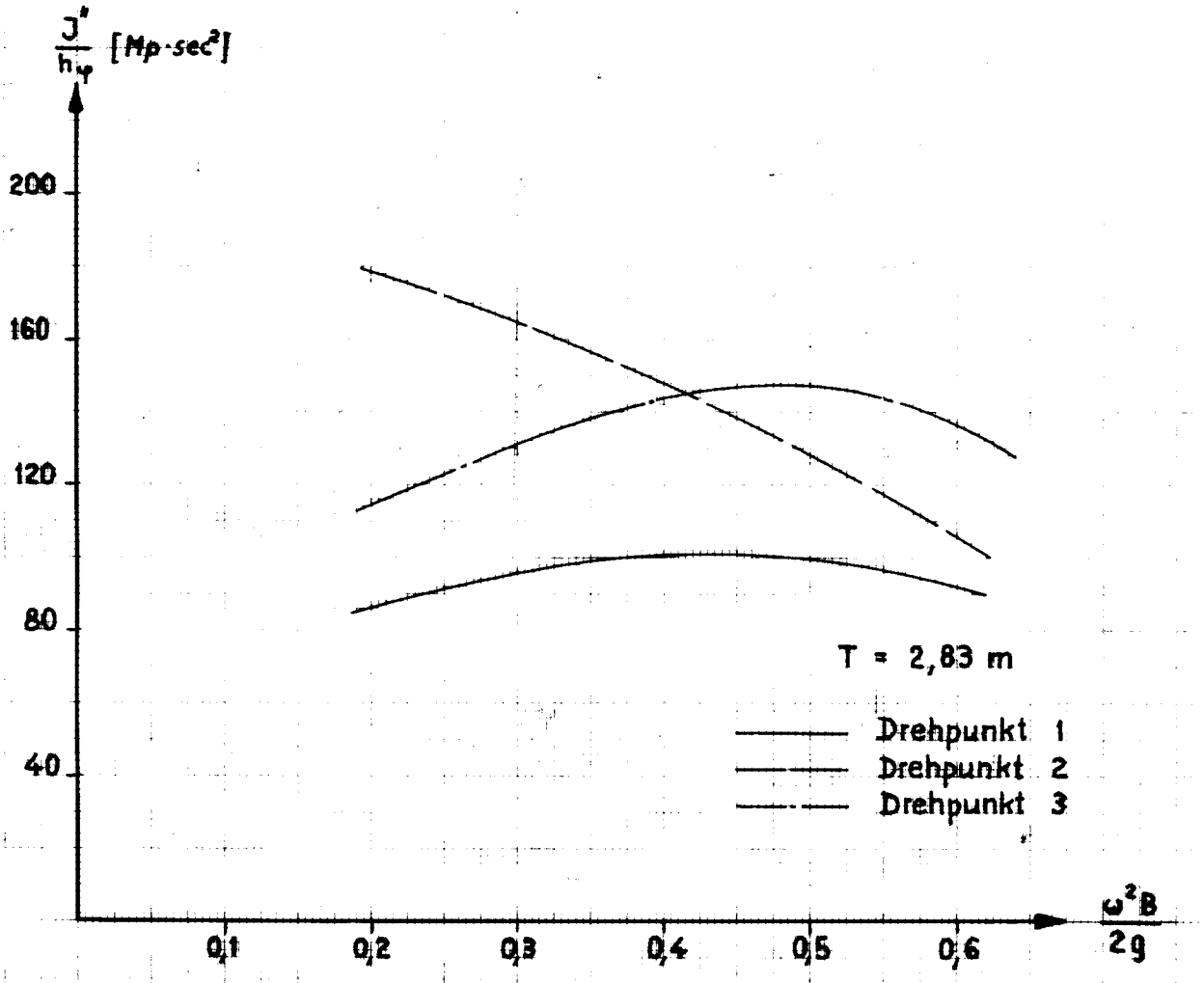
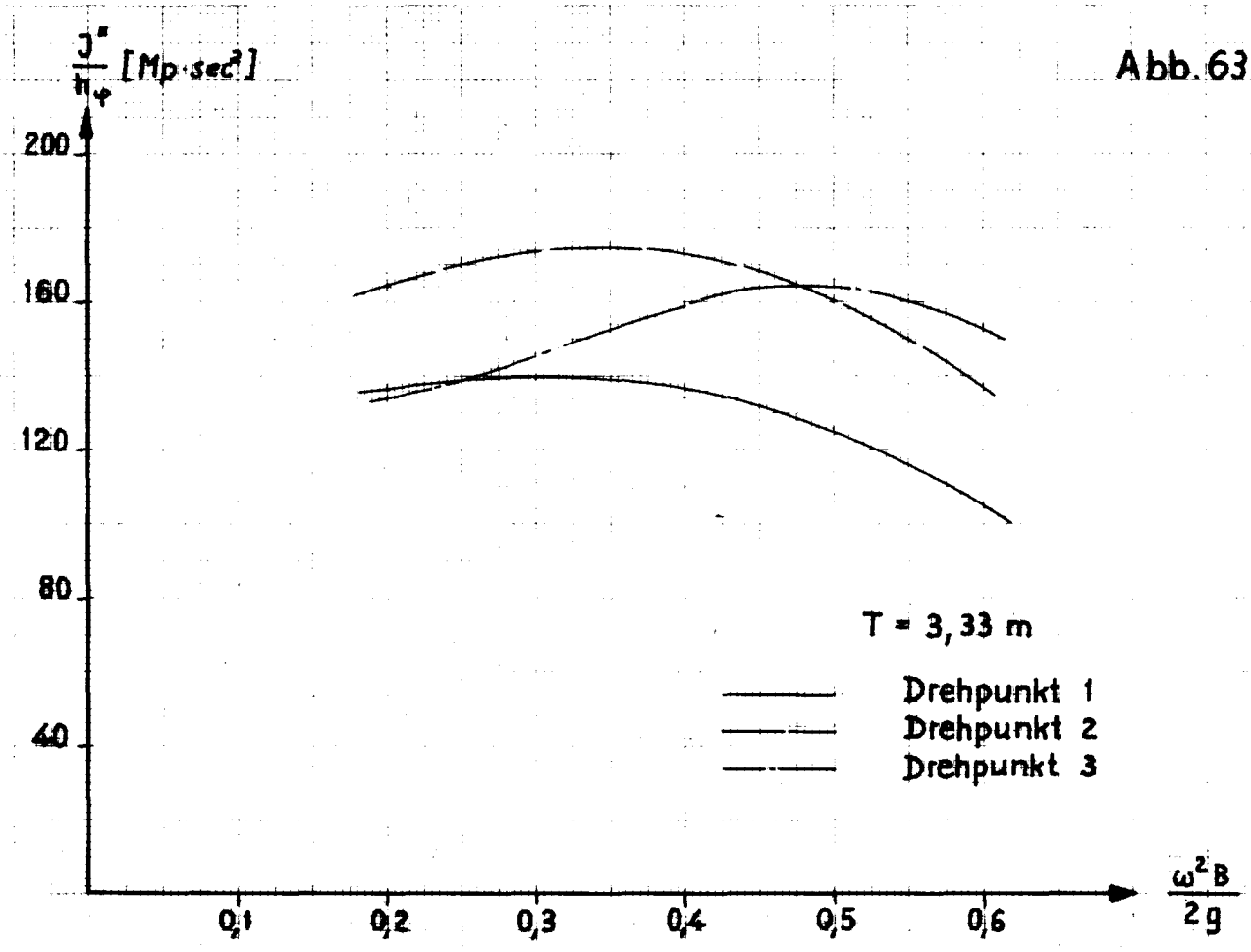
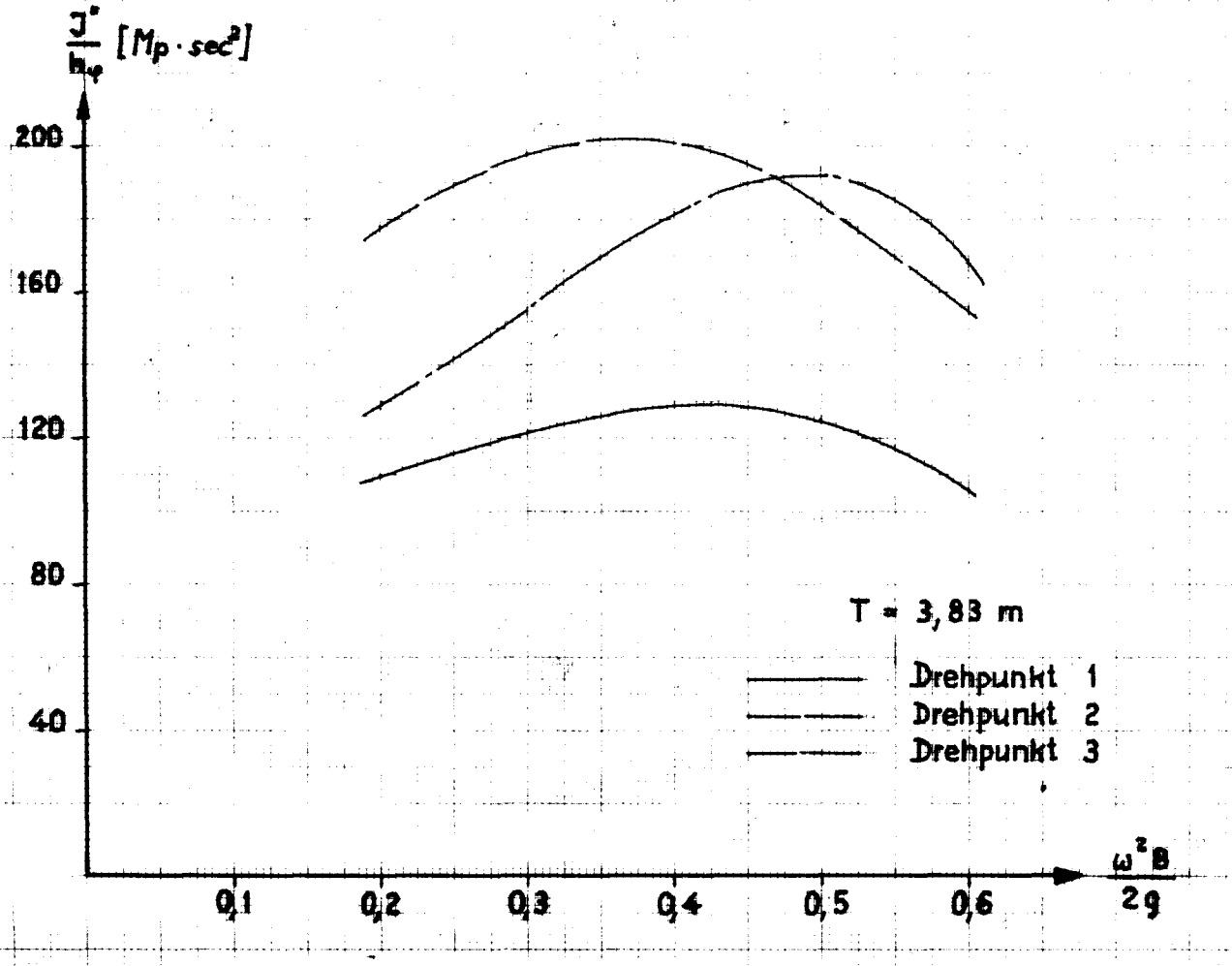

$\frac{J'}{h_\varphi}$ [Mp·sec²]
200
160
120
80
40
T = 2,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

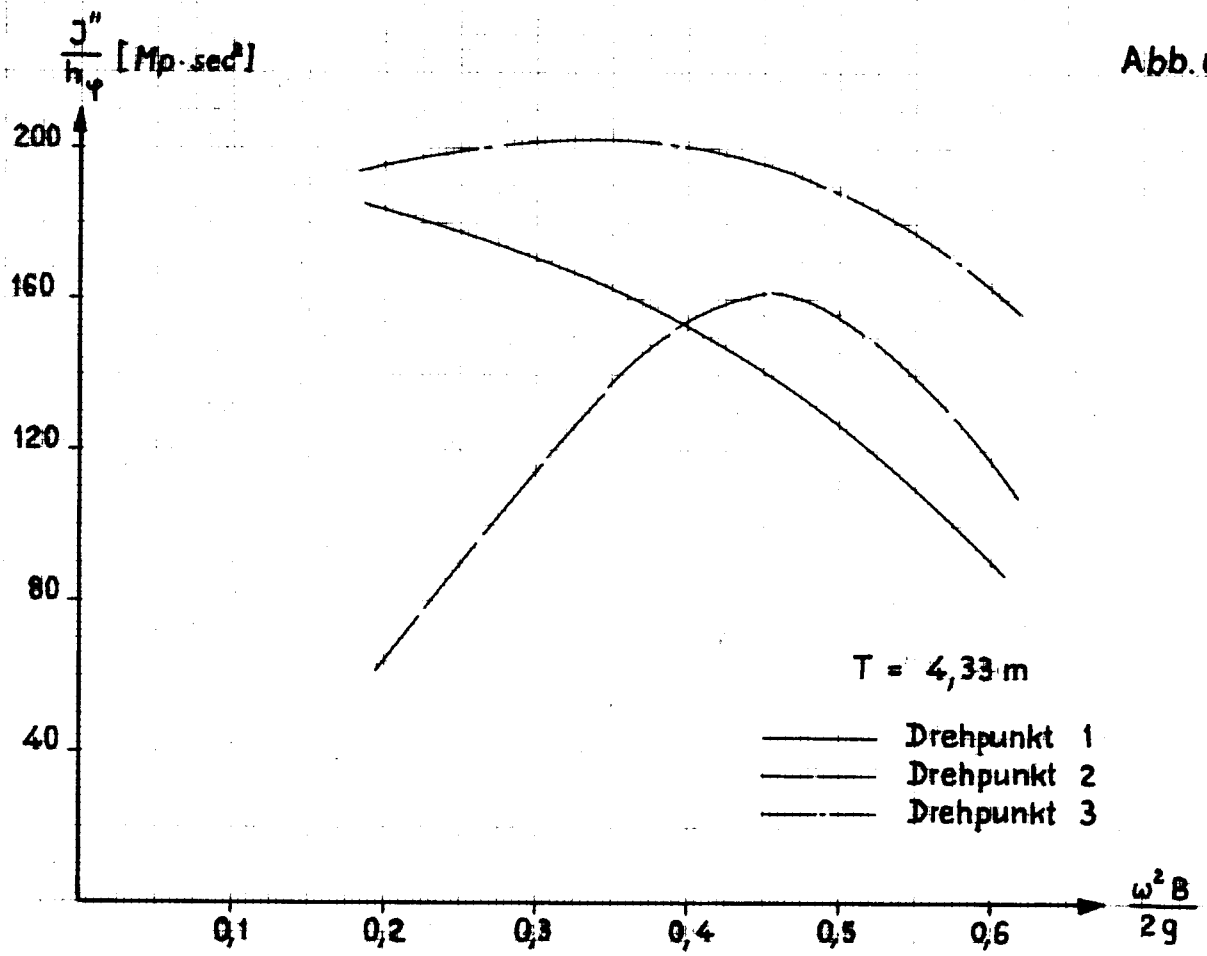
Abb. 63





MADE IN GERMANY

Abb. 64


J"/h_φ [Mp·sec²]
200
160
120
80
40
T = 4,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g

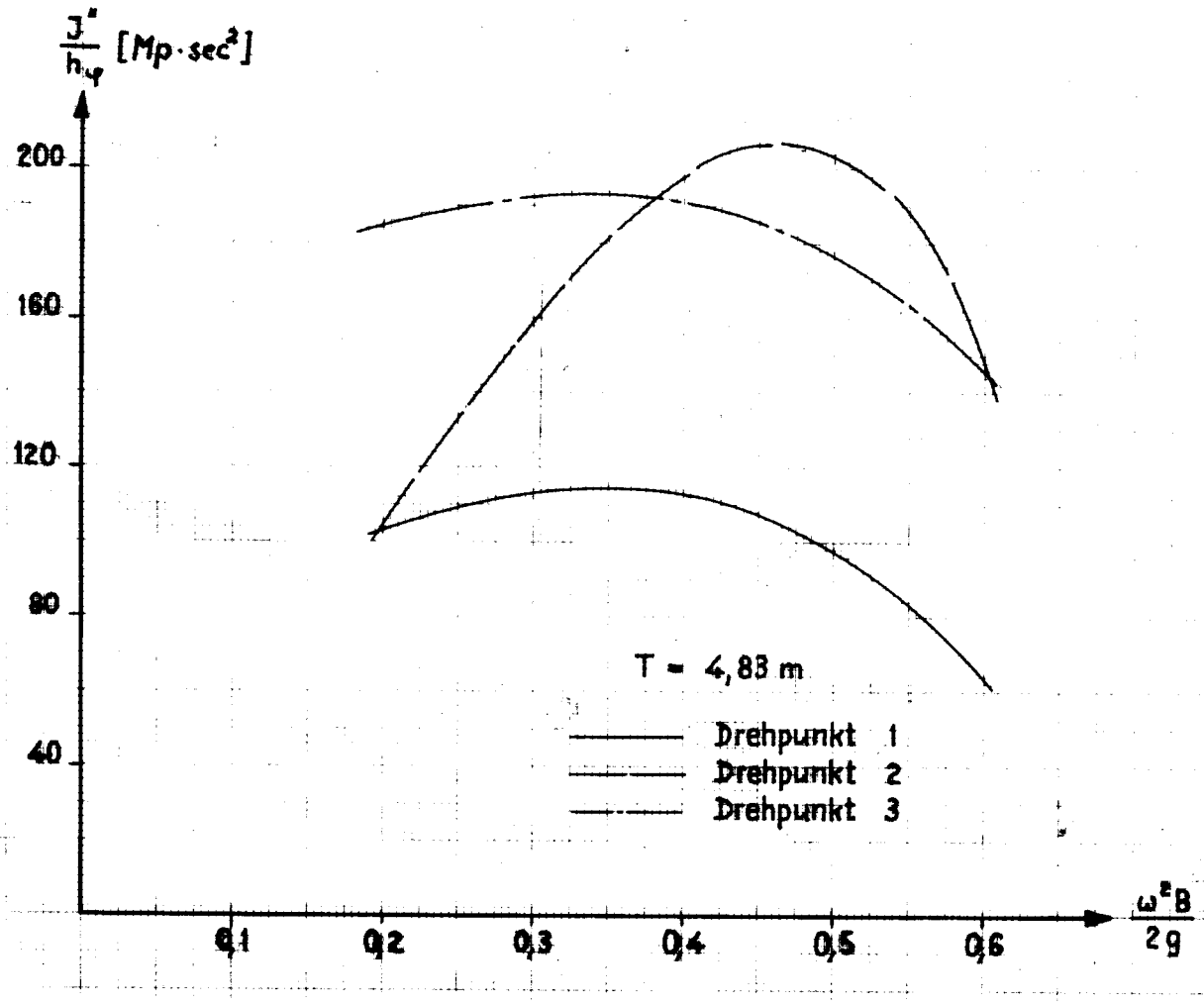
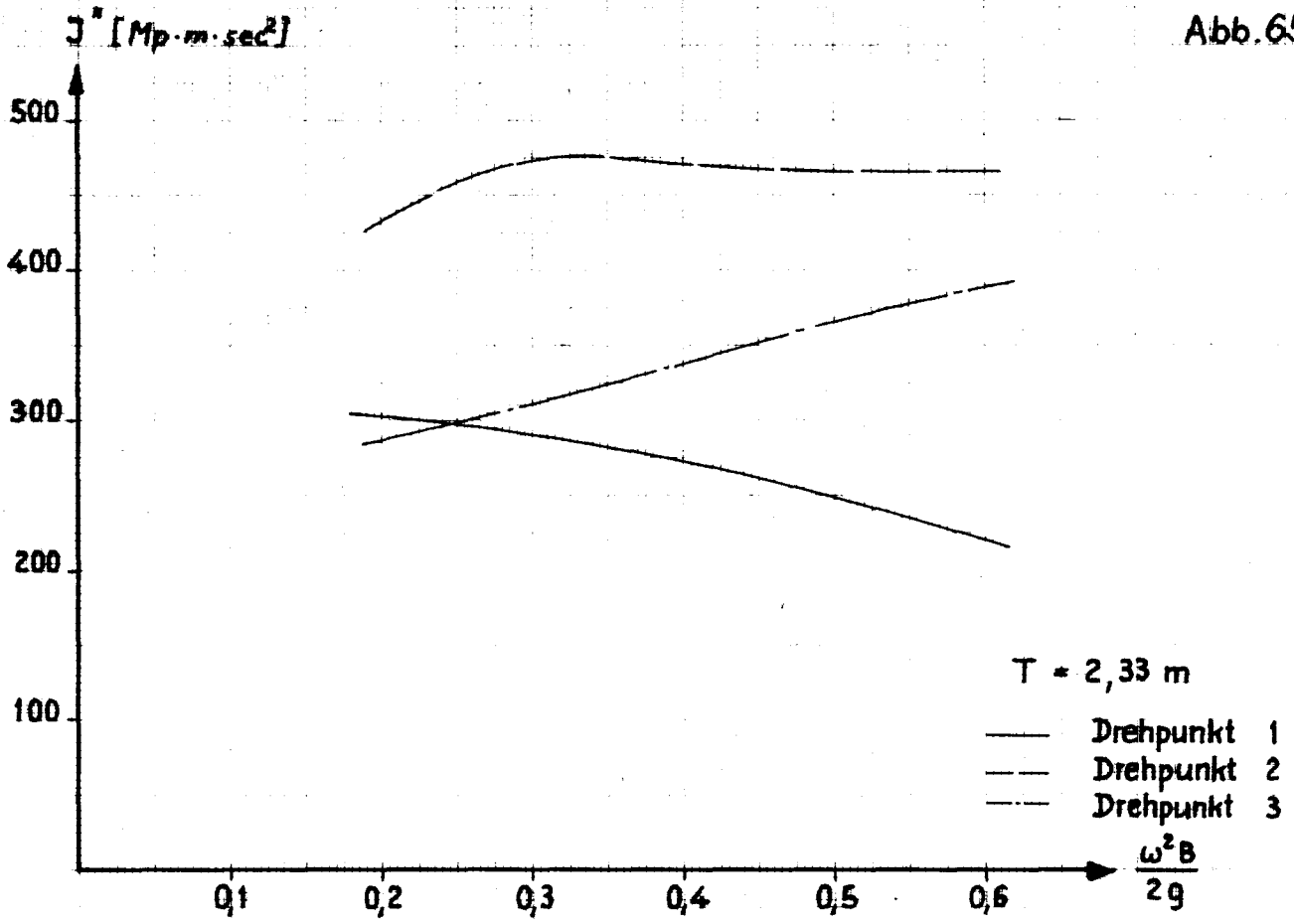

J"/h_φ [Mp·sec²]
200
160
120
80
40
T = 4,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B/2g

Abb.65


J* [Mp·m·sec²]
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g
T = 2,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

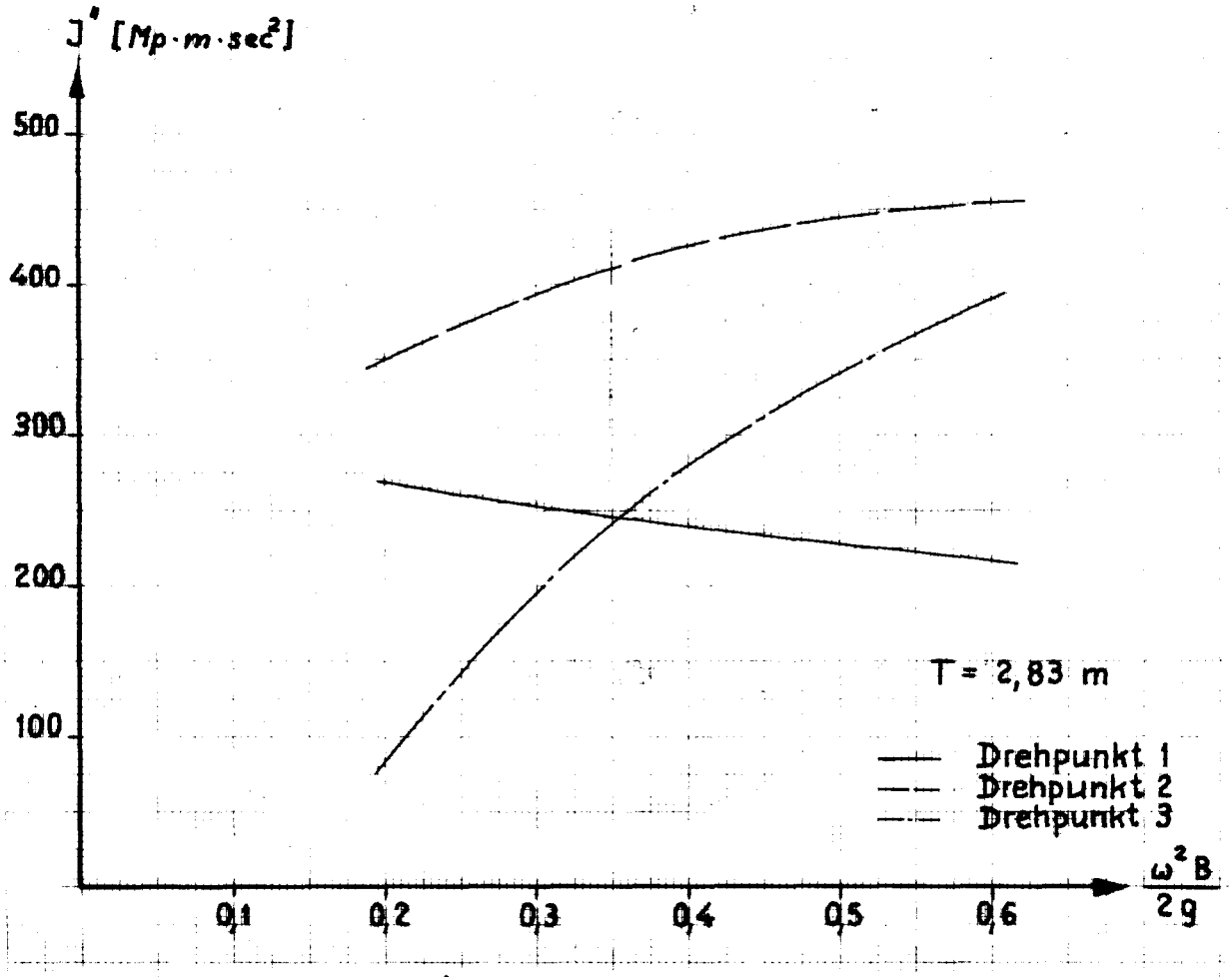
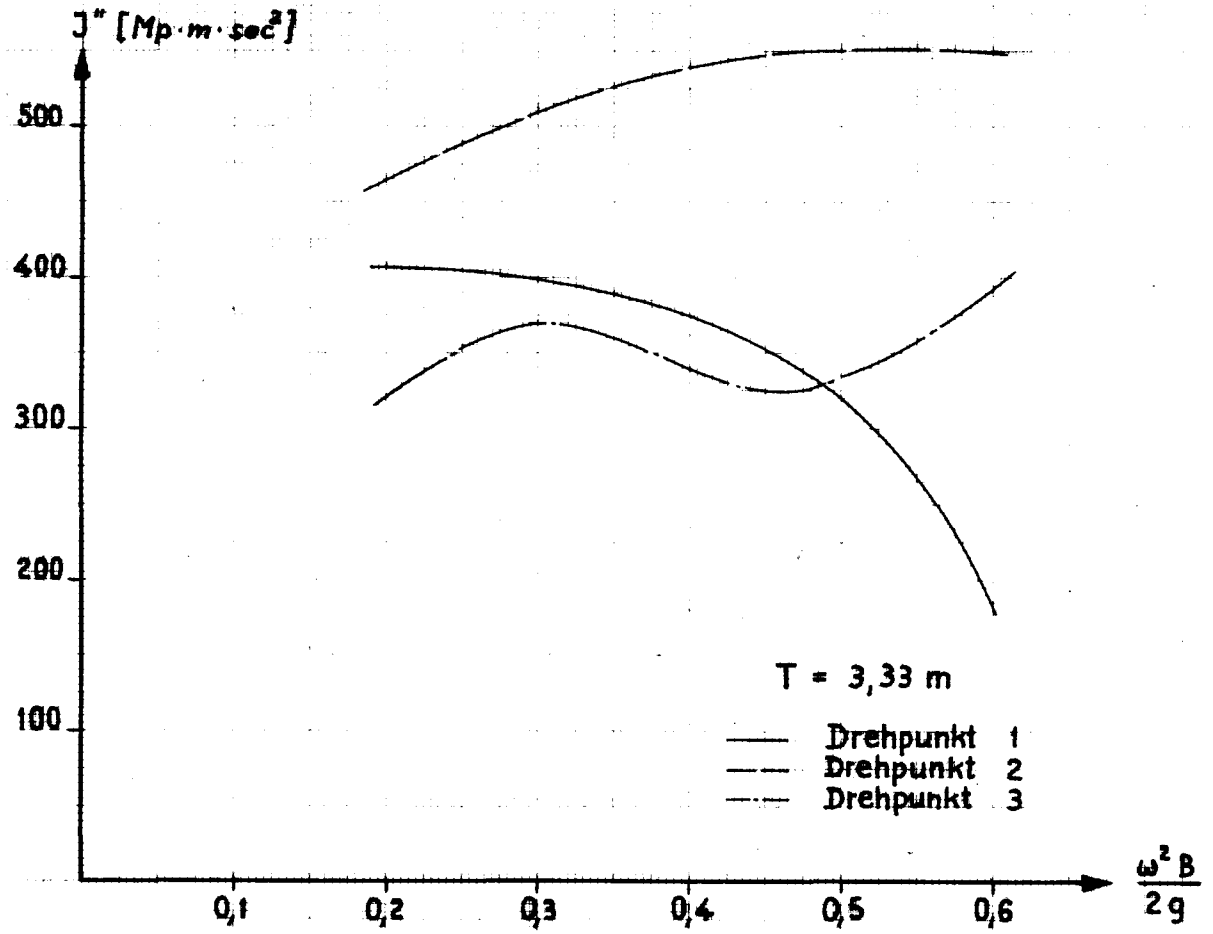

J* [Mp·m·sec²]
500
400
300
200
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g
T = 2,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

Abb. 66


J" [Mp·m·sec²]
500
400
300
200
100
T = 3,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g

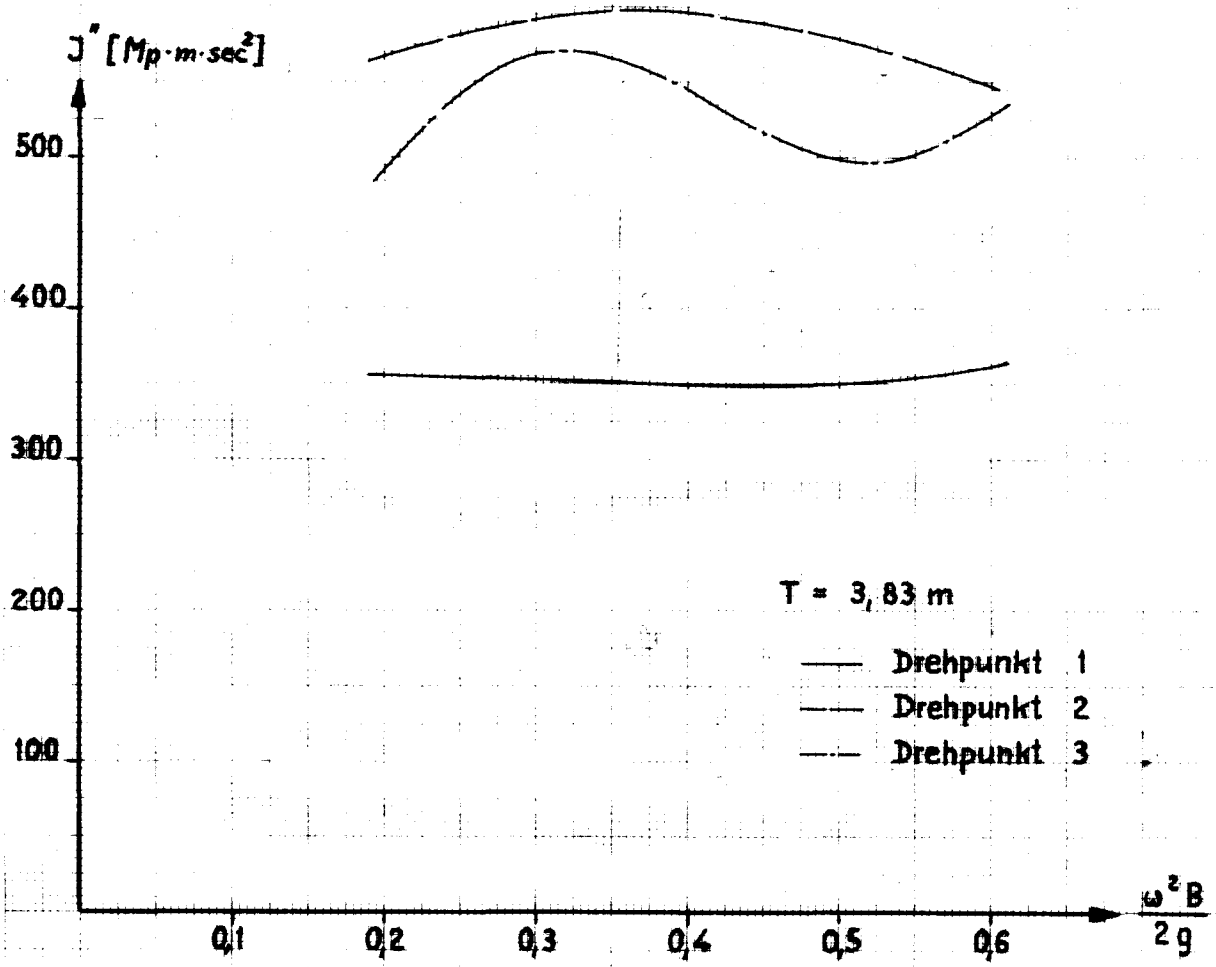
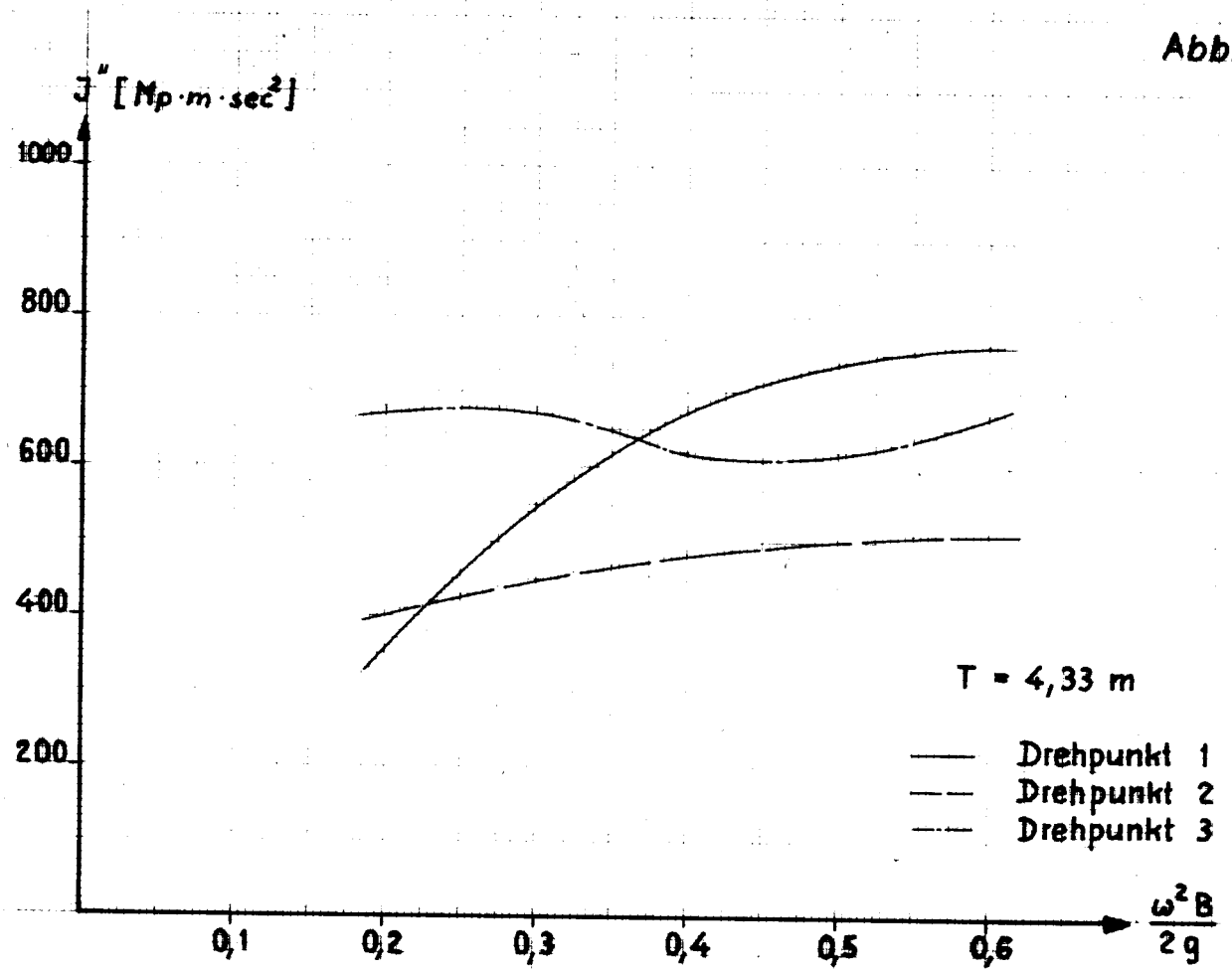

J" [Mp·m·sec²]
500
400
300
200
100
T = 3,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g

Abb. 67


J" [Mp·m·sec²]
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g
T = 4,33 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

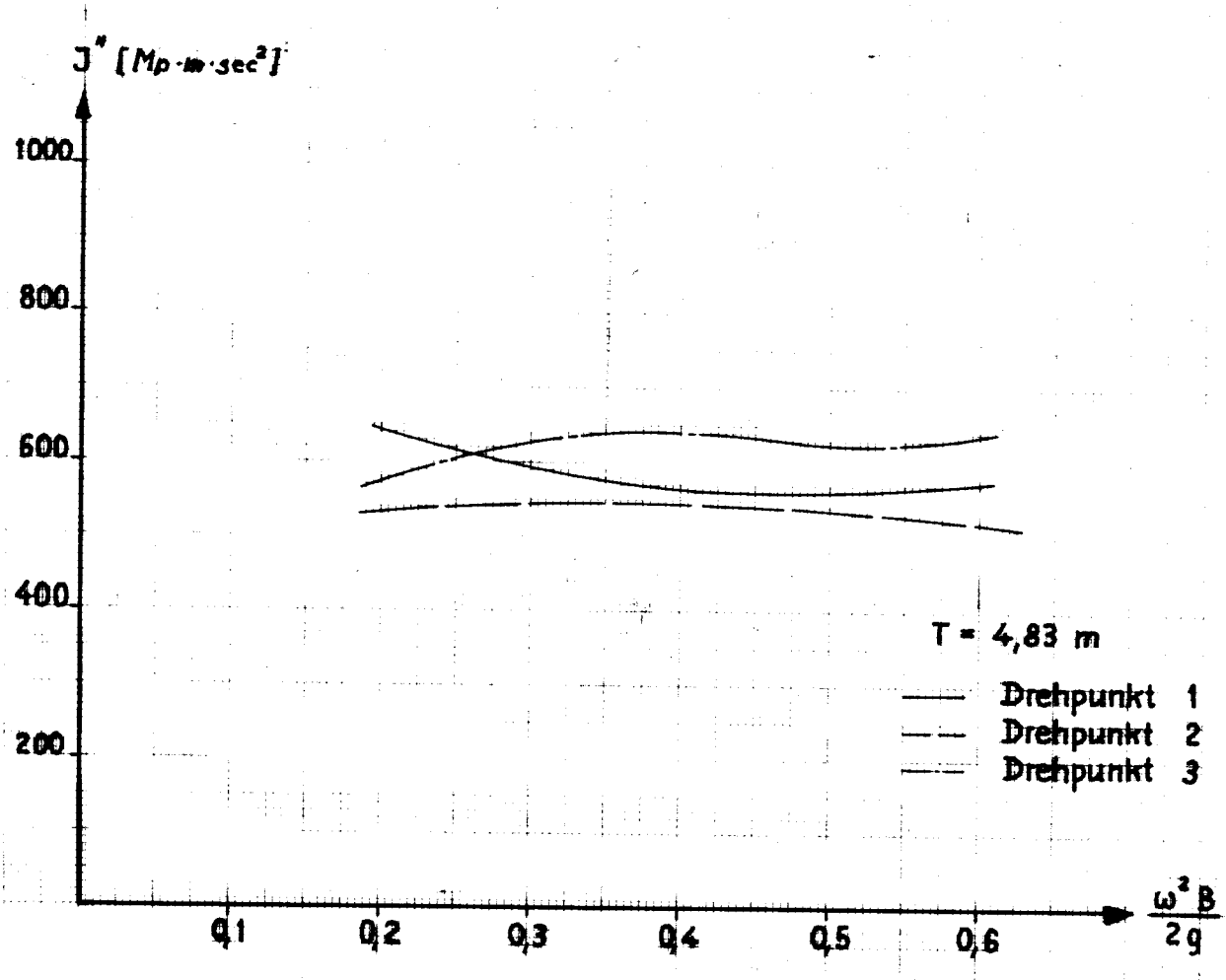
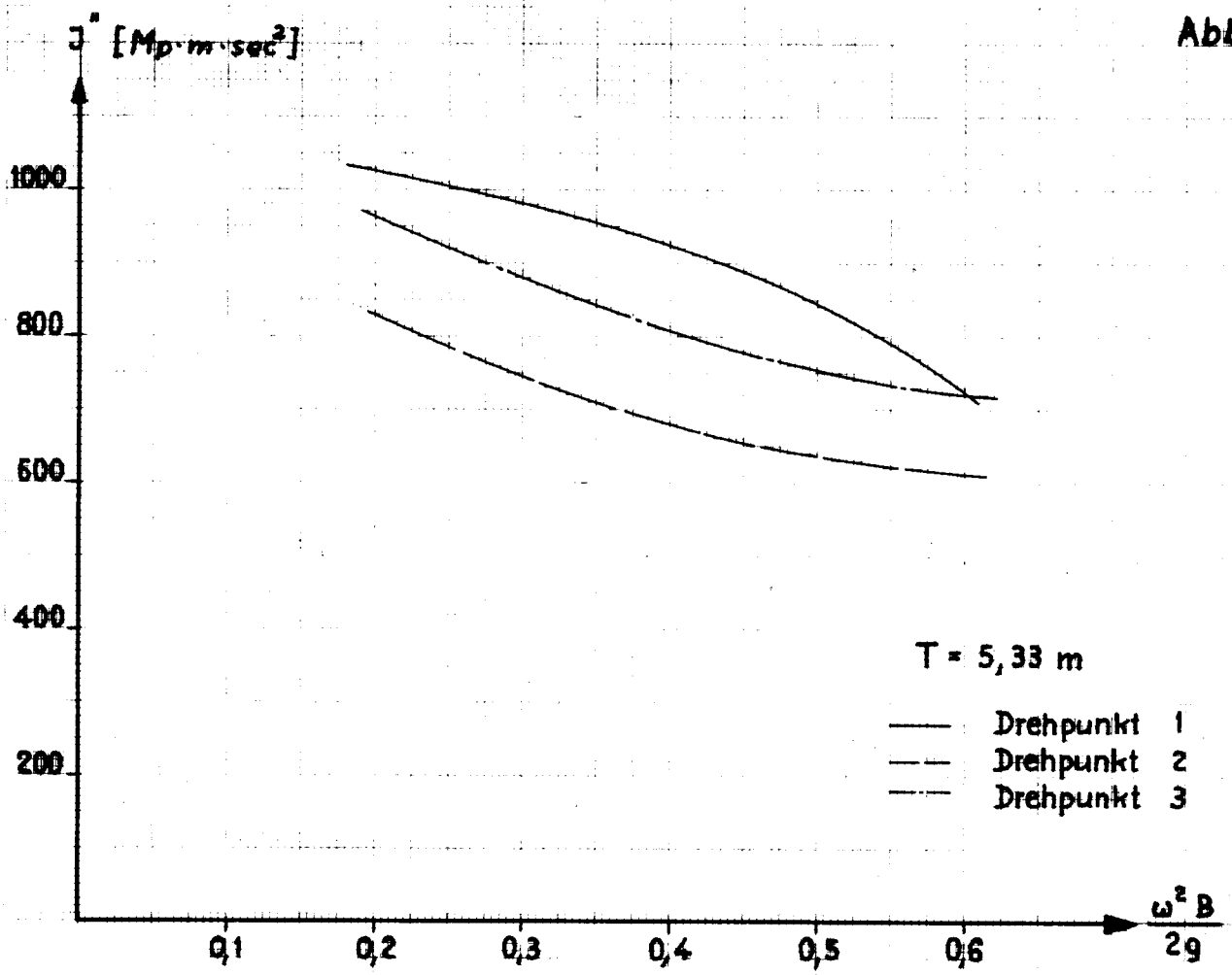
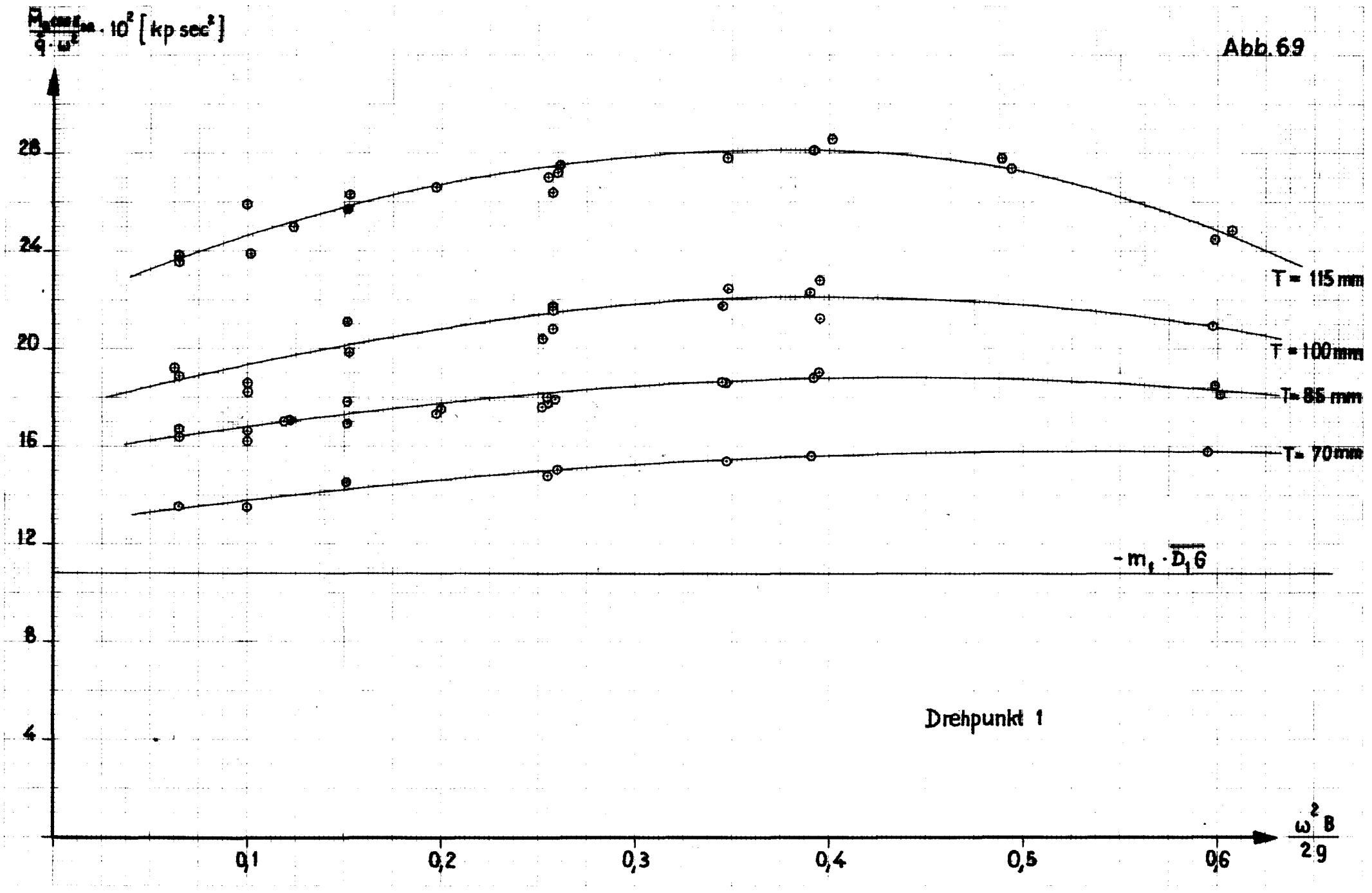

J" [Mp·m·sec²]
1000
800
600
400
200
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
ω²B / 2g
T = 4,83 m
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3

Abb.68



MADE IN GERMANY


$\frac{M_{B\,ges}}{q \cdot \omega^2} \cdot 10^2$ [kp sec²]
Abb. 69
28
24
20
16
12
8
4
T = 115 mm
T = 100 mm
T = 85 mm
T = 70 mm
$-m_t \cdot \overline{D_1 6}$
Drehpunkt 1
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

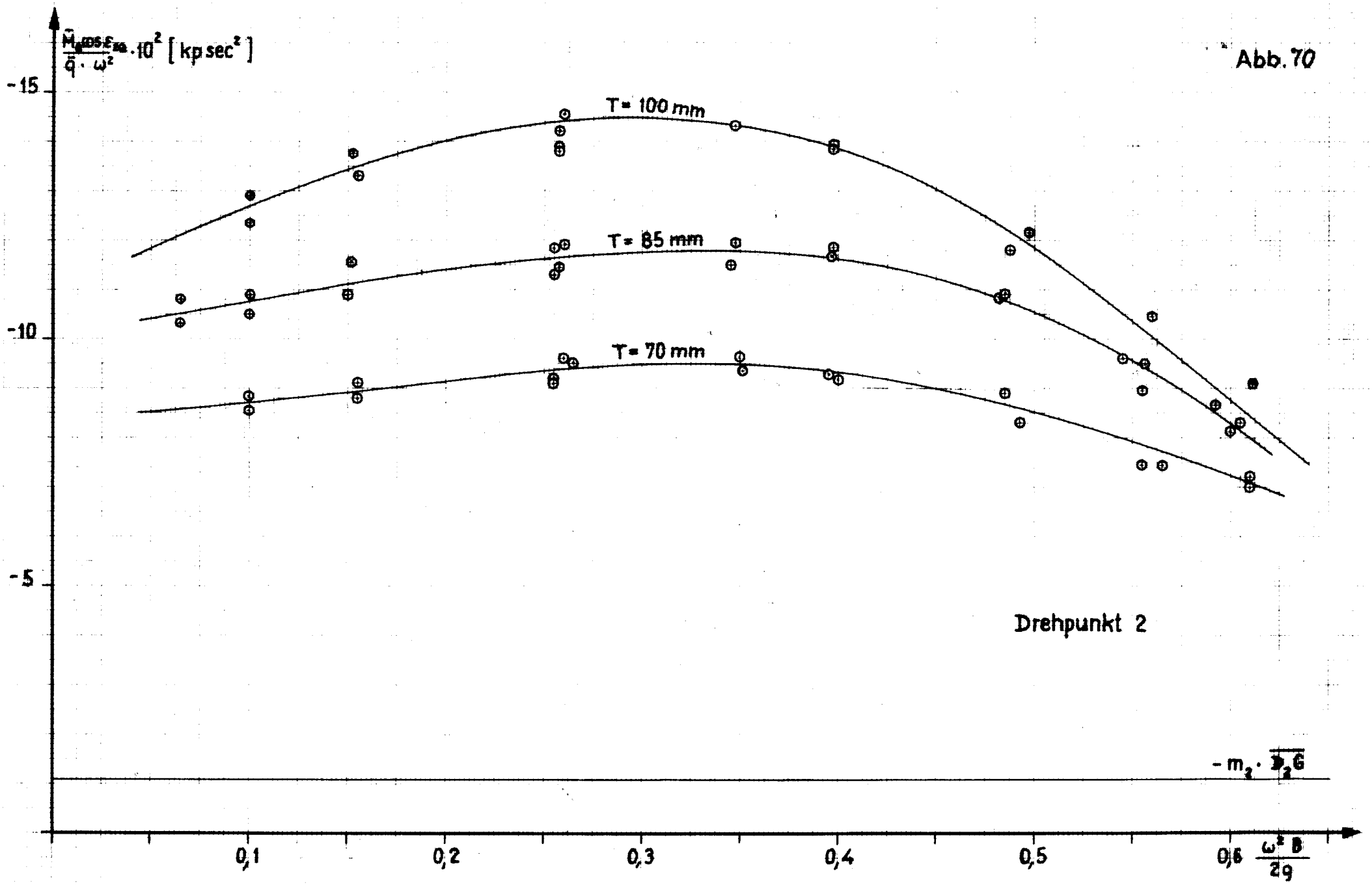


Abb. 70
$\frac{\tilde{M}_{\alpha} \cos \varepsilon_{\alpha}}{\bar{q} \cdot \omega^2} \cdot 10^2$ [kp sec^2]
-15
-10
-5
T = 100 mm
T = 85 mm
T = 70 mm
Drehpunkt 2
$-m_2 \cdot \overline{S_2 G}$
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

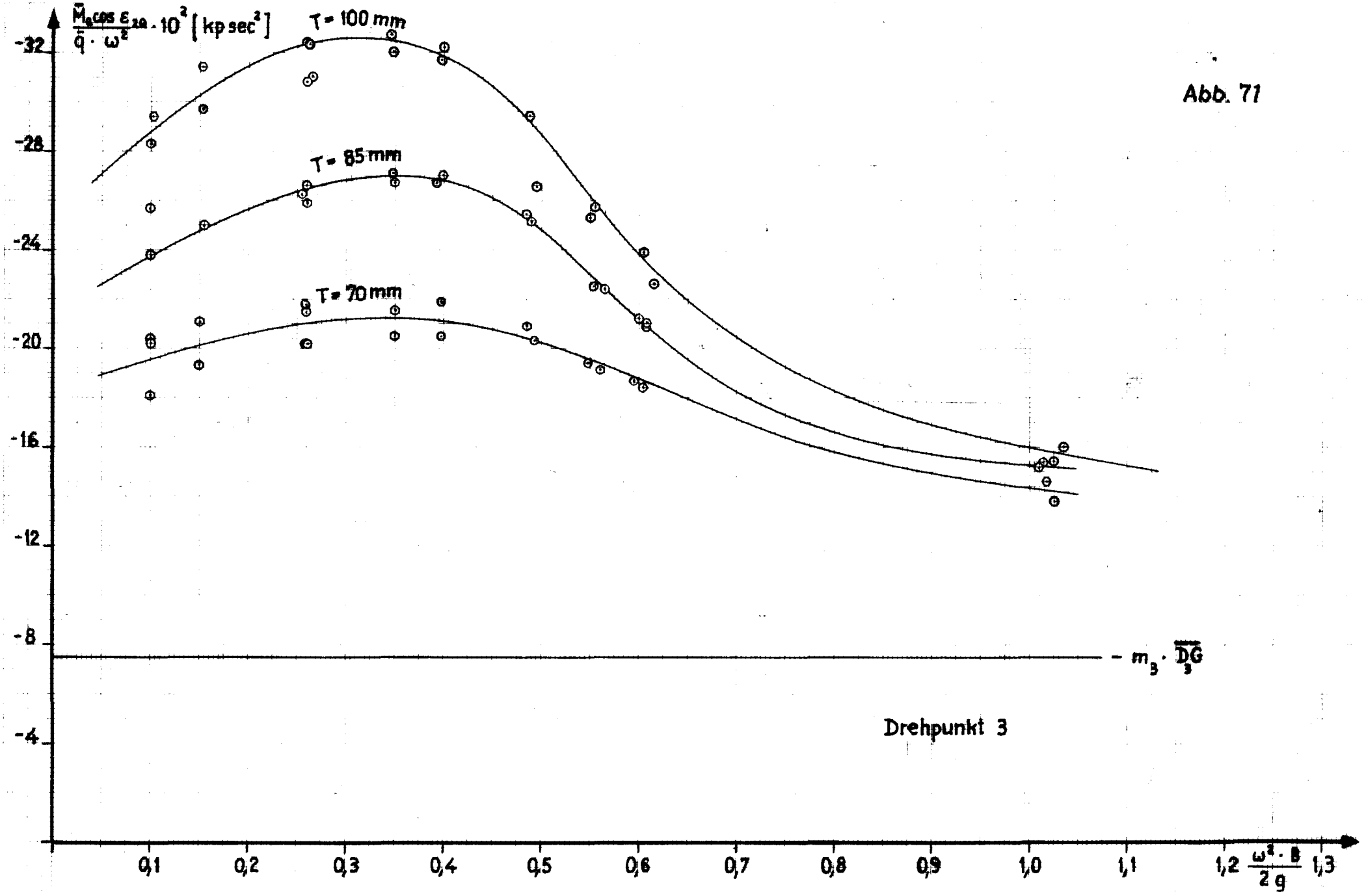

$\frac{\bar{M}_0 \cos \varepsilon_{z0}}{\bar{q} \cdot \omega^2} \cdot 10^2$ [kp sec^2]
T = 100 mm
T = 85 mm
T = 70 mm
-32
-28
-24
-20
-16
-12
-8
-4
$-m_3 \cdot \overline{DG}_3$
Drehpunkt 3
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
$\frac{\omega^2 \cdot B}{2g}$
1,3

Abb. 71

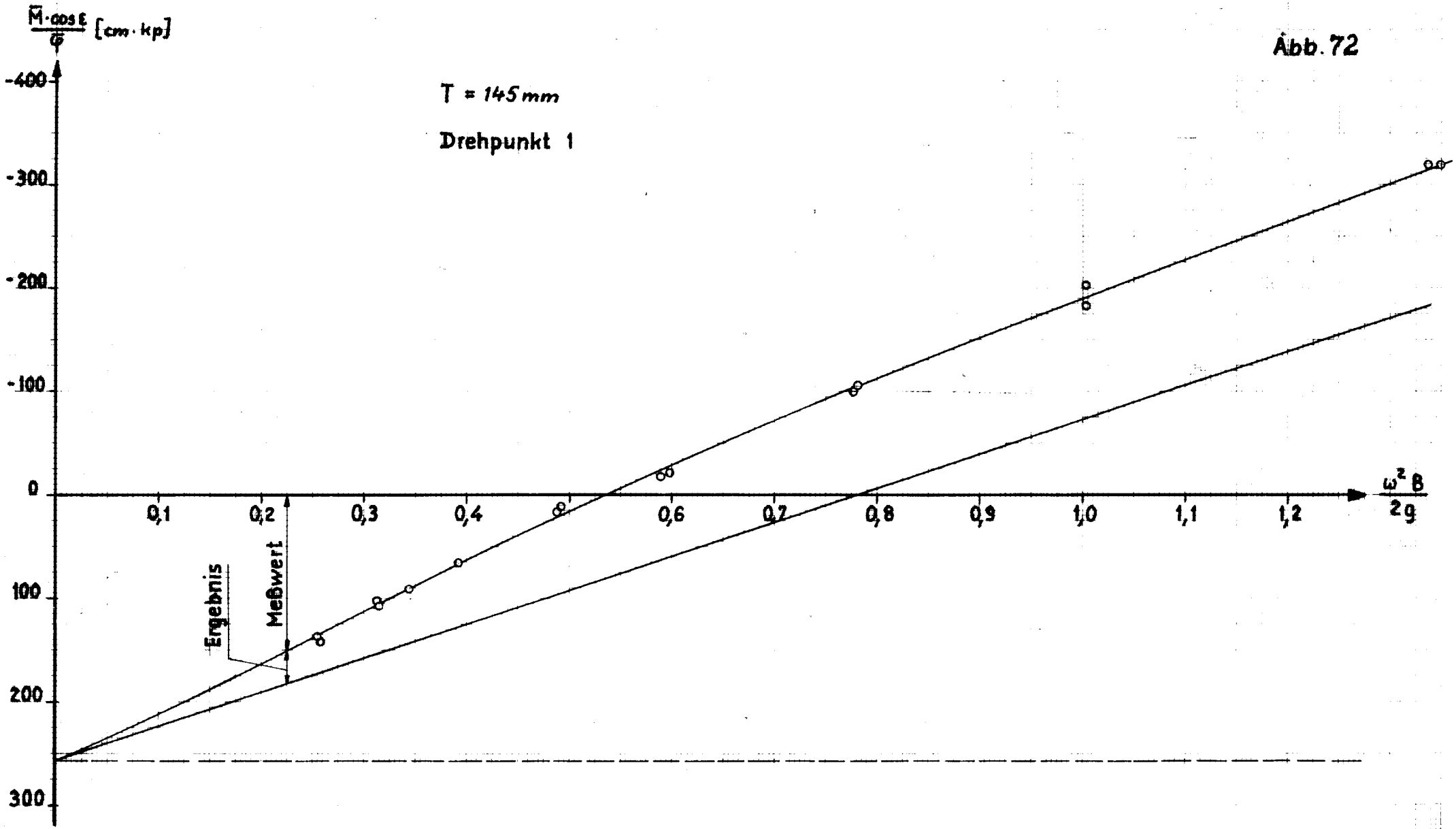

$\frac{\overline{M}\cdot\cos\varepsilon}{\varphi}$ [cm·kp]
T = 145 mm
Drehpunkt 1
-400
-300
-200
-100
0
100
200
300
0,1
0,2
0,3
0,4
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
Ergebnis
Meßwert

Abb. 72

Abb. 73

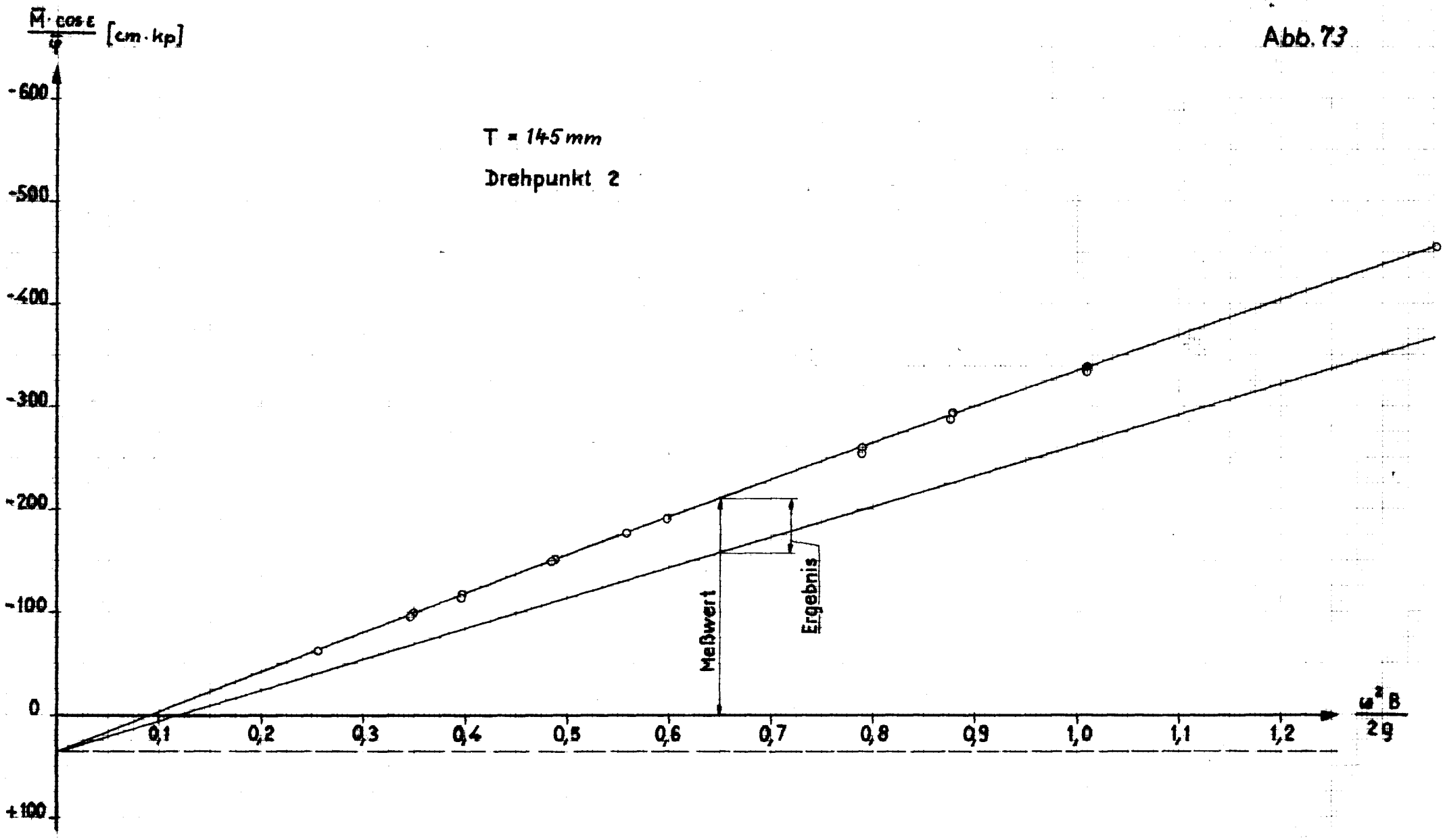

$\frac{M \cdot \cos\varepsilon}{\varphi}$ [cm · kp]
T = 145 mm
Drehpunkt 2
-600
-500
-400
-300
-200
-100
0
+100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
$\frac{\omega^2 B}{2g}$
Meßwert
Ergebnis

Abb. 74

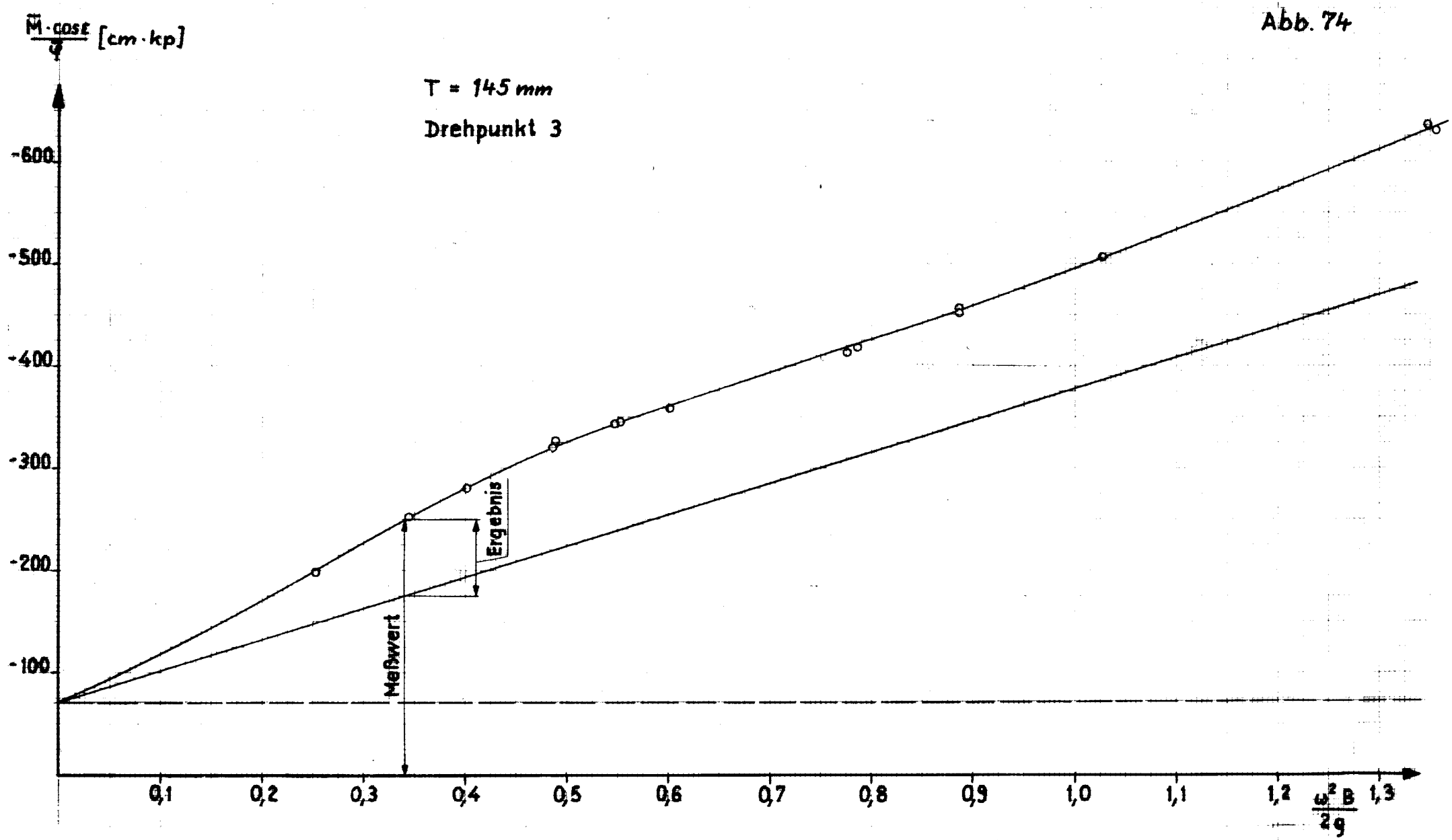
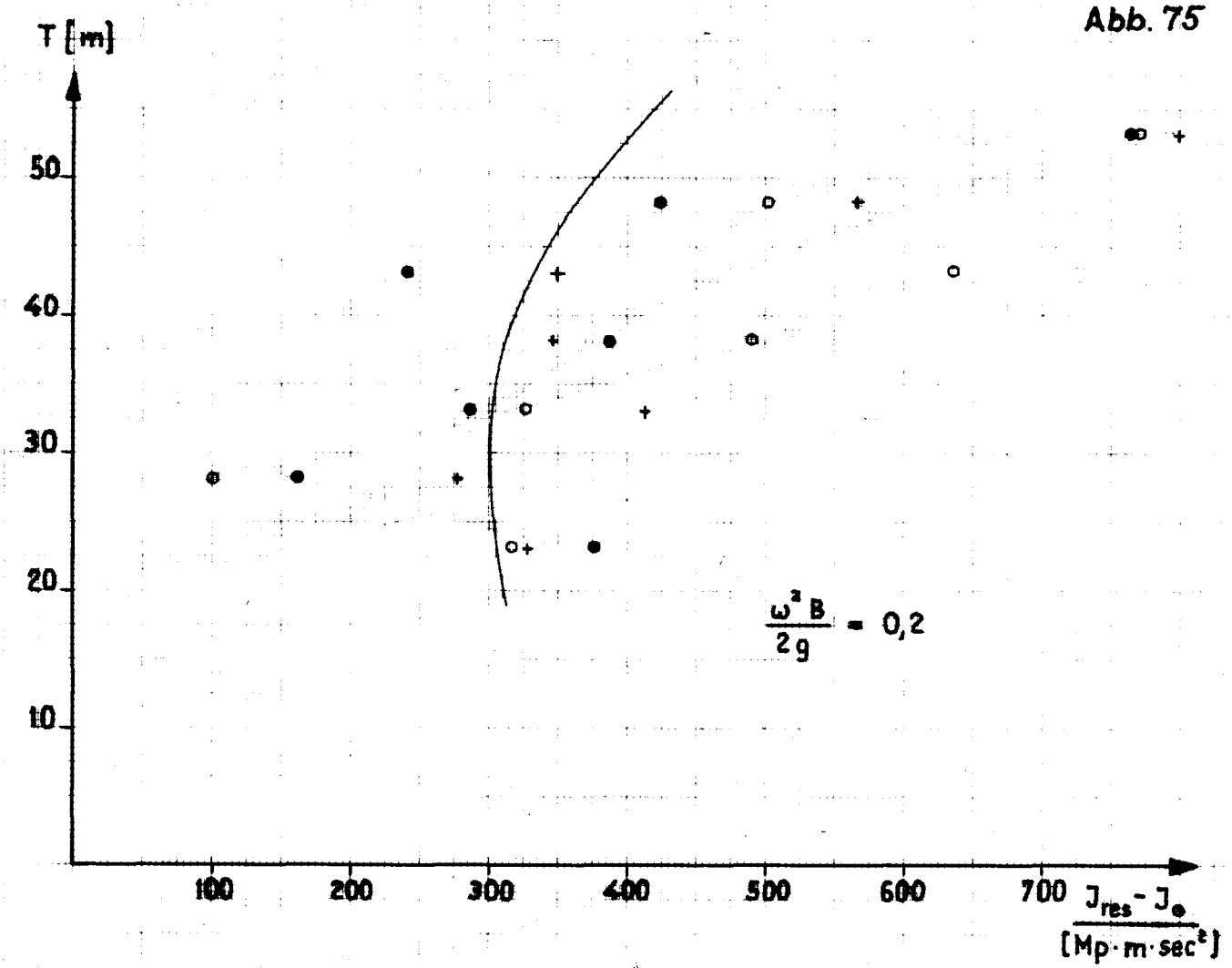

$\frac{\tilde{M} \cdot \cos\varepsilon}{\varphi}$ [cm · kp]
T = 145 mm
Drehpunkt 3
-600
-500
-400
-300
-200
-100
Ergebnis
Meßwert
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,1
1,2
1,3
$\frac{\omega^2 B}{2g}$

Abb. 75


T [m]
50
40
30
20
10
100
200
300
400
500
600
700
$\frac{\omega^2 B}{2g} = 0,2$
$\frac{J_{res} - J_\Theta}{[Mp \cdot m \cdot sec^2]}$

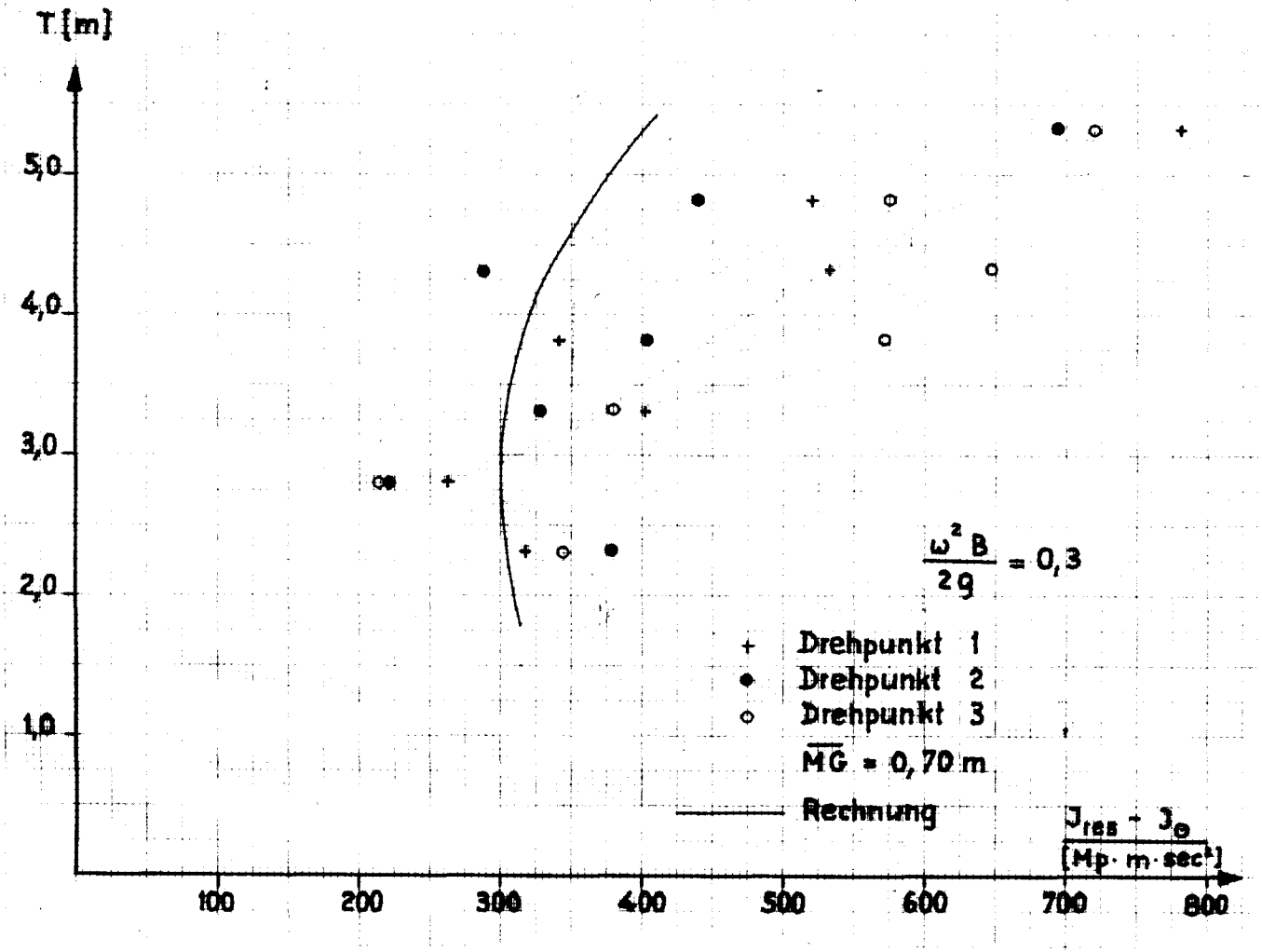
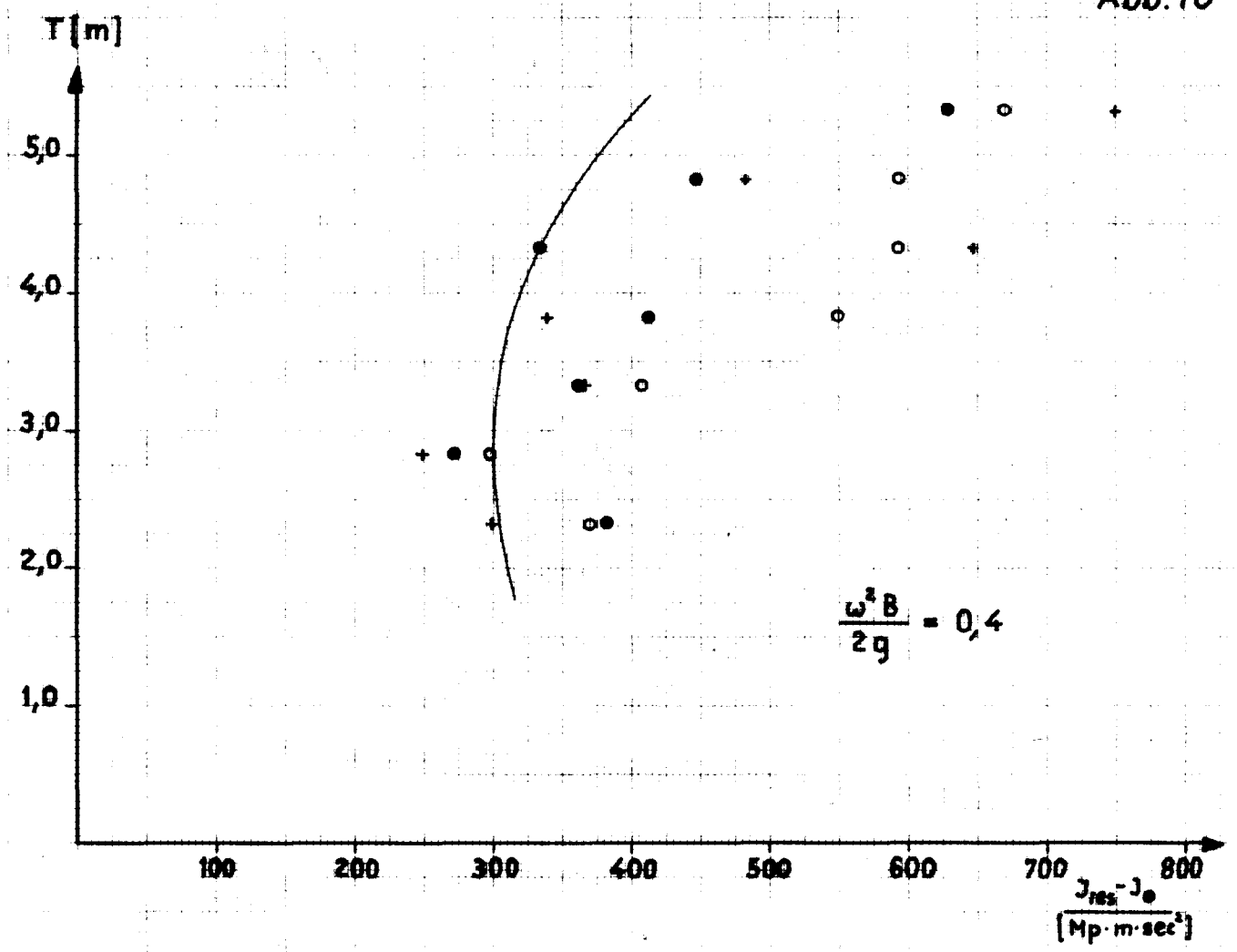

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
100
200
300
400
500
600
700
800
$\frac{\omega^2 B}{2g} = 0,3$
+ Drehpunkt 1
● Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
$\overline{MG} = 0,70$ m
Rechnung
$\frac{J_{res} - J_\Theta}{[Mp \cdot m \cdot sec^2]}$

Abb. 76


T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
100
200
300
400
500
600
700
800
$\frac{J_{res} - J_e}{[Mp \cdot m \cdot sec^2]}$
$\frac{\omega^2 B}{2g} = 0,4$

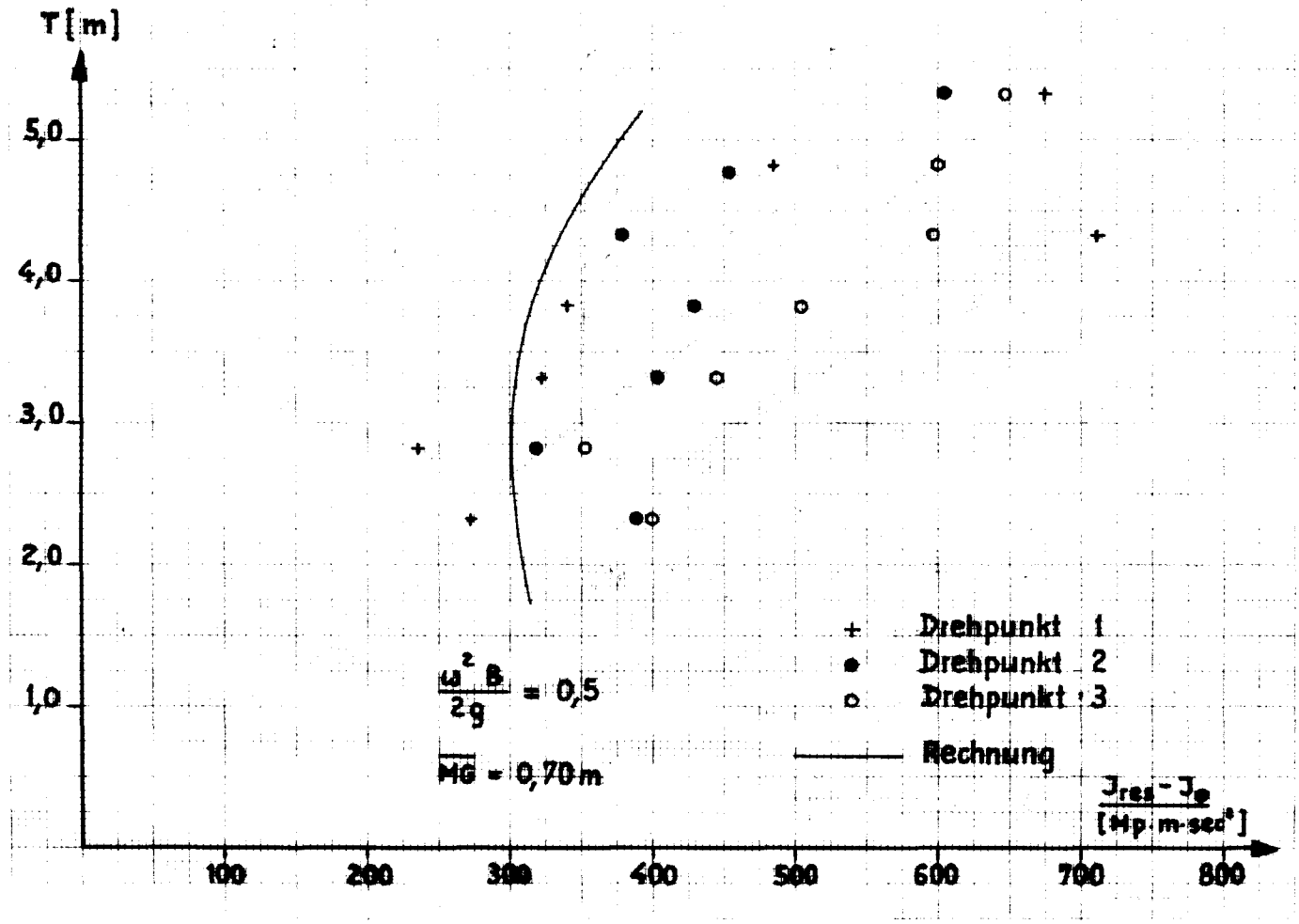
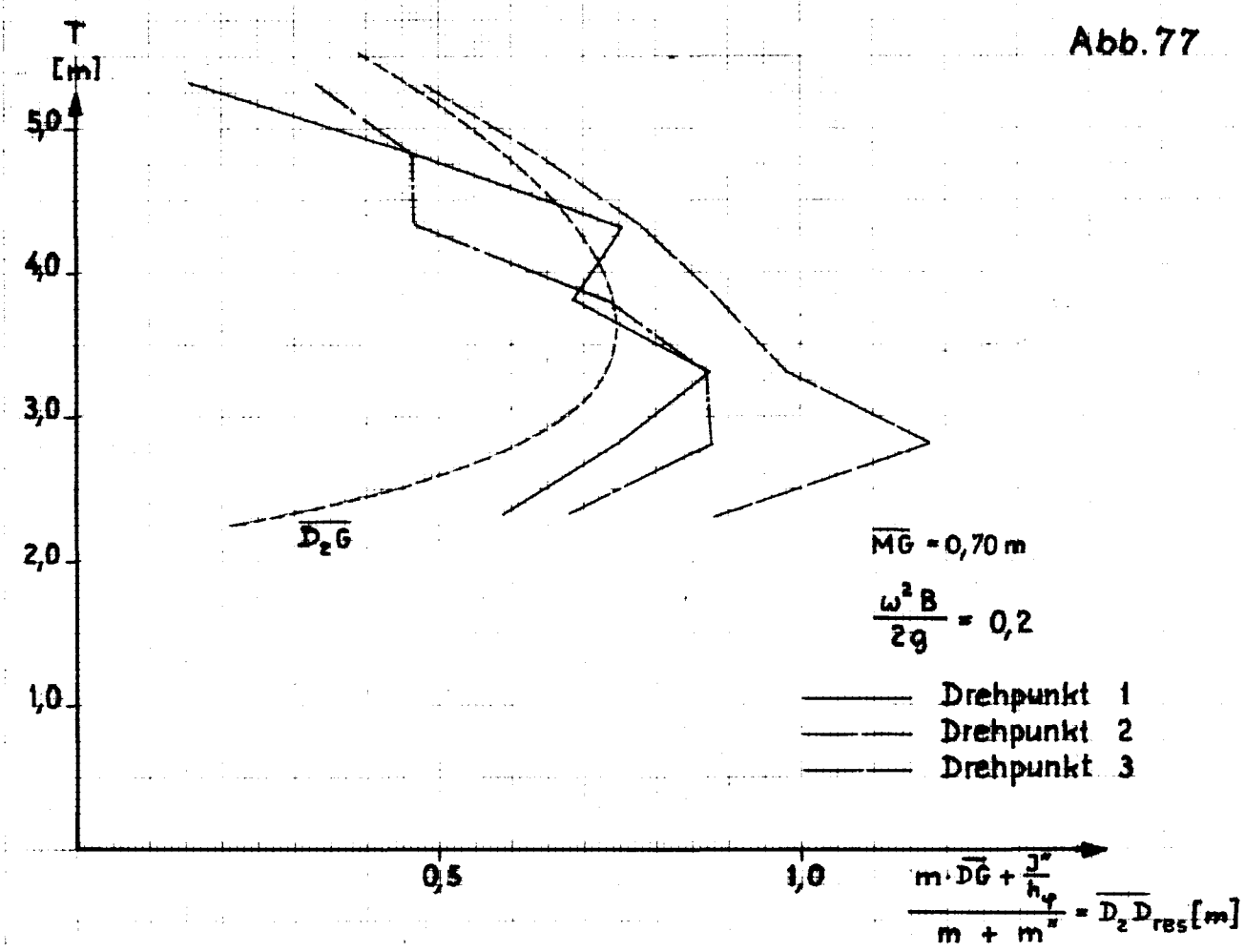

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
100
200
300
400
500
600
700
800
$\frac{J_{res} - J_e}{[Mp \cdot m \cdot sec^2]}$
$\frac{\omega^2 B}{2g} = 0,5$
$\overline{MG} = 0,70\,m$
+ Drehpunkt 1
● Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Rechnung

Abb. 77


T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
$\overline{D_2G}$
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,5
1,0
$\frac{m \cdot \overline{DG} + \frac{J^*}{h_\varphi}}{m + m^*} = \overline{D_2 D}_{res}$ [m]

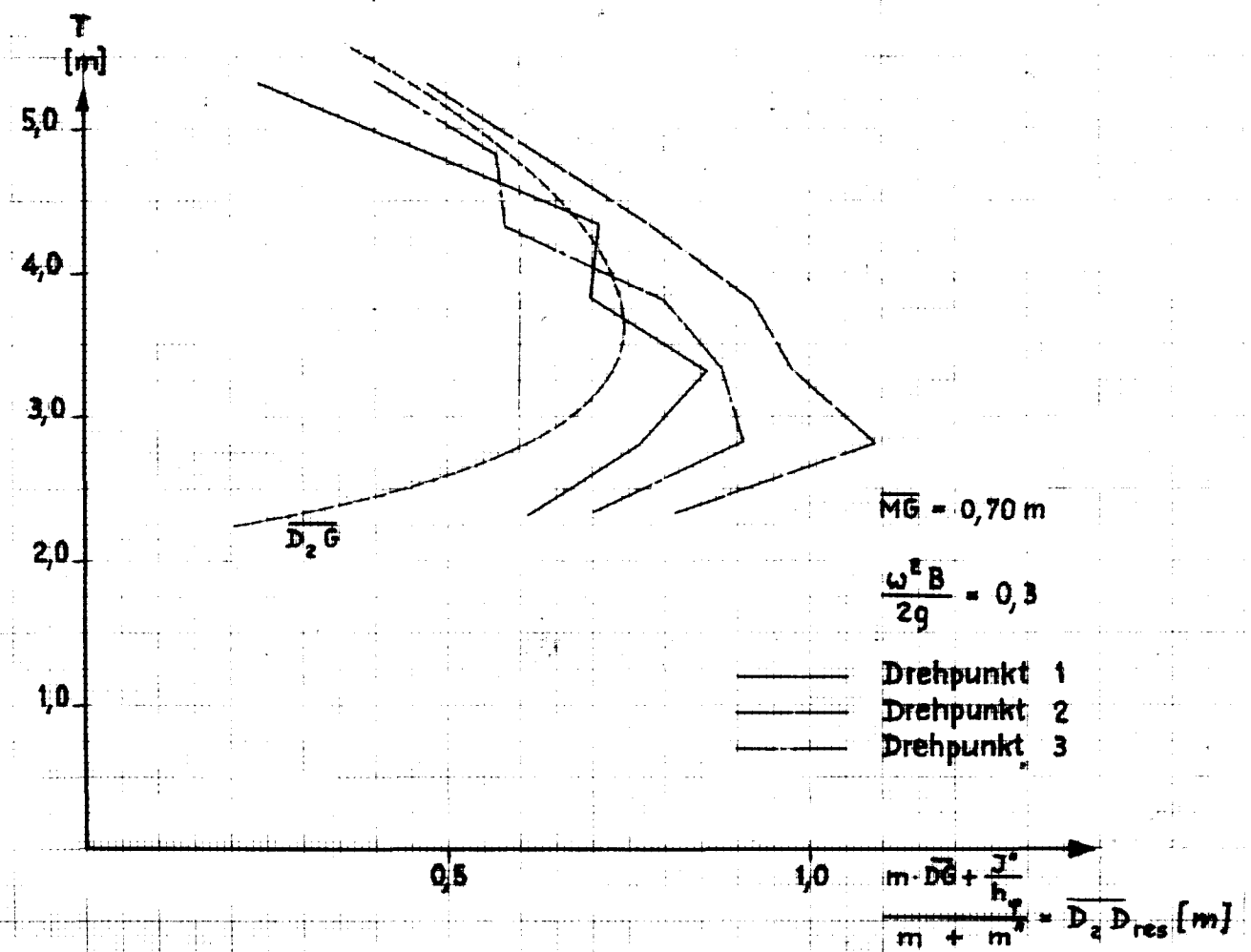
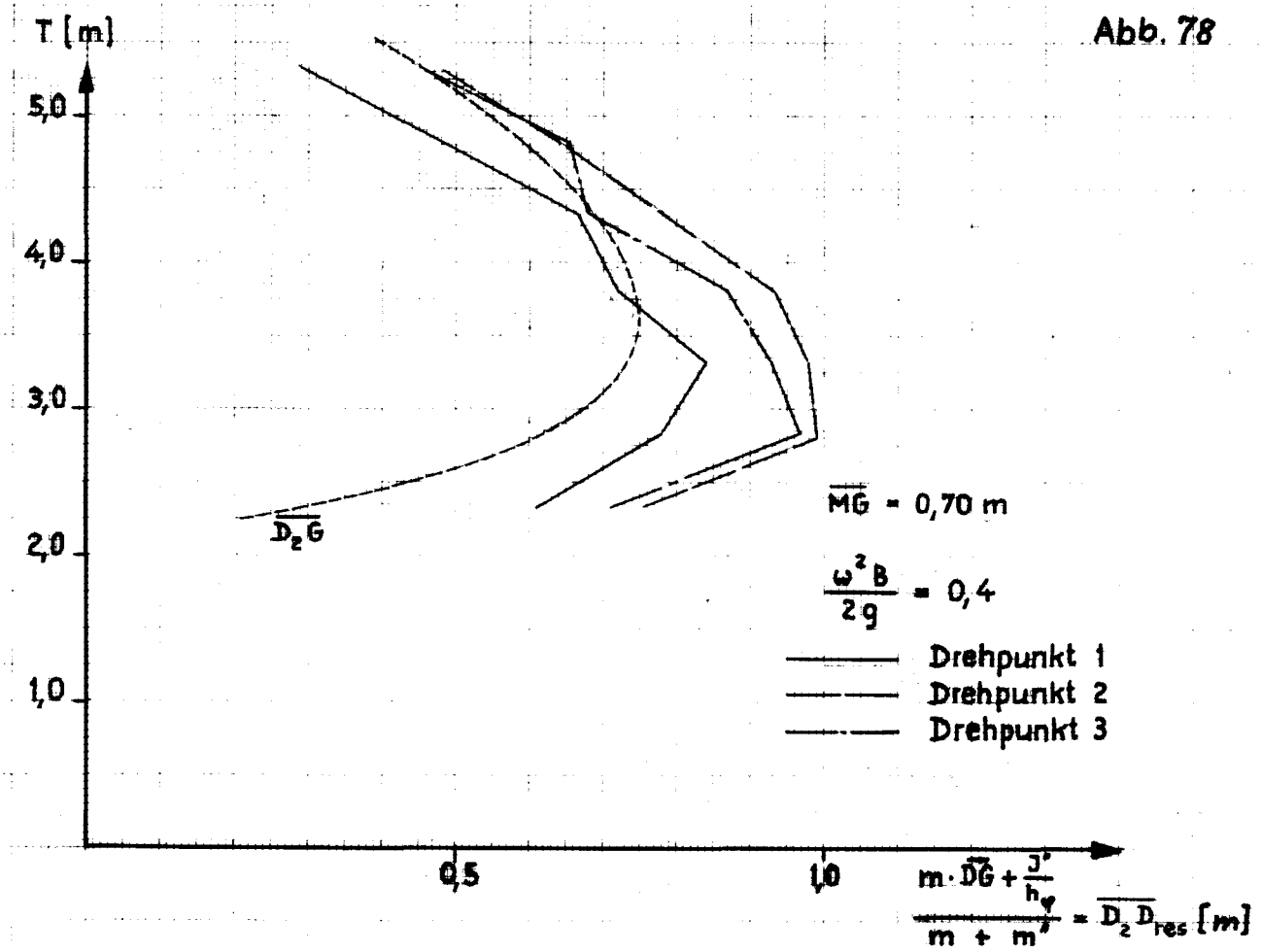

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
$\overline{D_2G}$
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,3
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,5
1,0
$\frac{m \cdot \overline{DG} + \frac{J^*}{h_\varphi}}{m + m^*} = \overline{D_2 D}_{res}$ [m]

Abb. 78


T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
$\overline{D_2G}$
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,4
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,5
1,0
$\frac{m \cdot \overline{DG} + \frac{J^*}{h_\varphi}}{m + m^*} = \overline{D_2 D}_{res}$ [m]

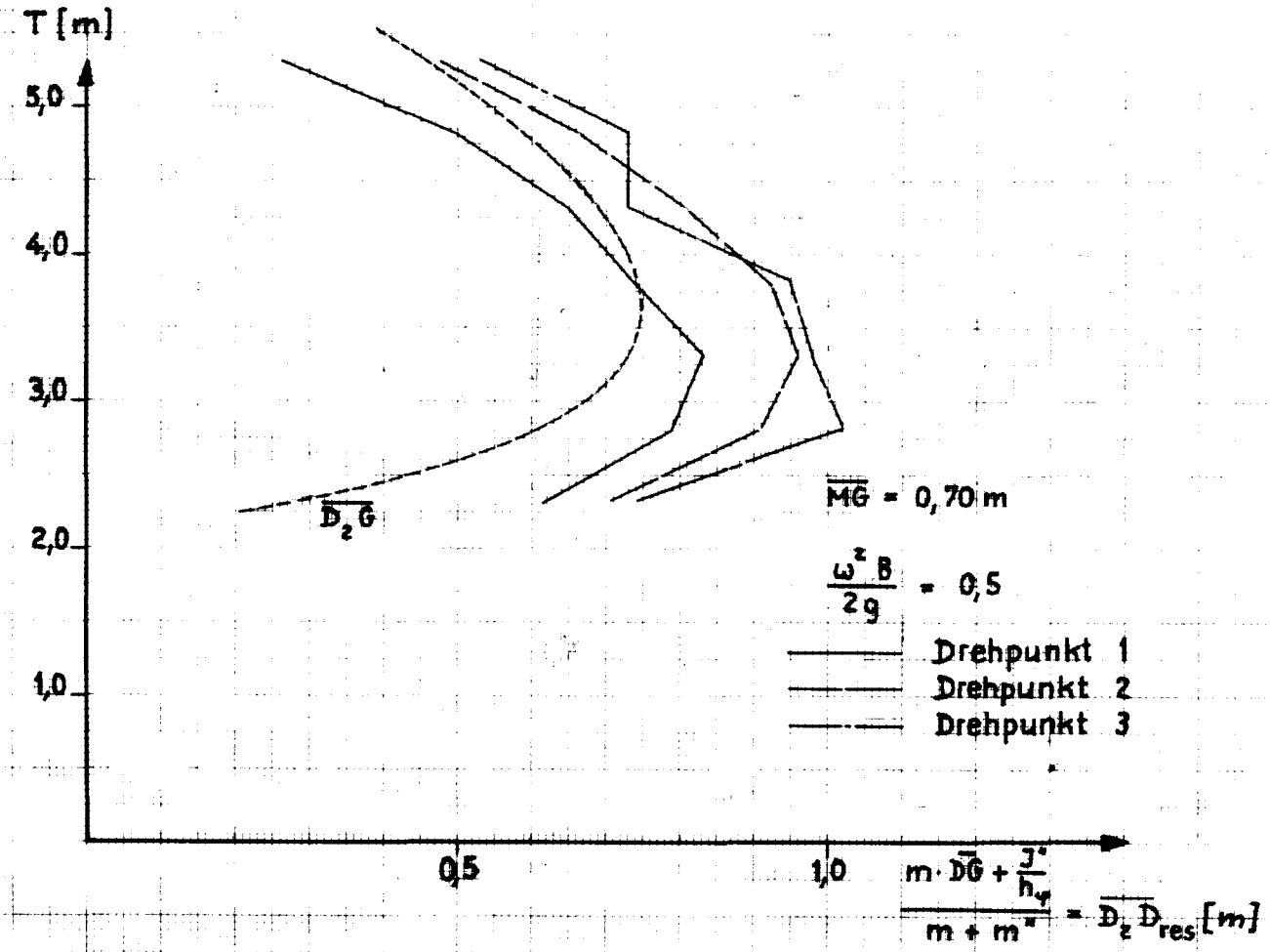

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
$\overline{D_2G}$
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,5
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,5
1,0
$\frac{m \cdot \overline{DG} + \frac{J^*}{h_\varphi}}{m + m^*} = \overline{D_2 D}_{res}$ [m]

Abb. 79

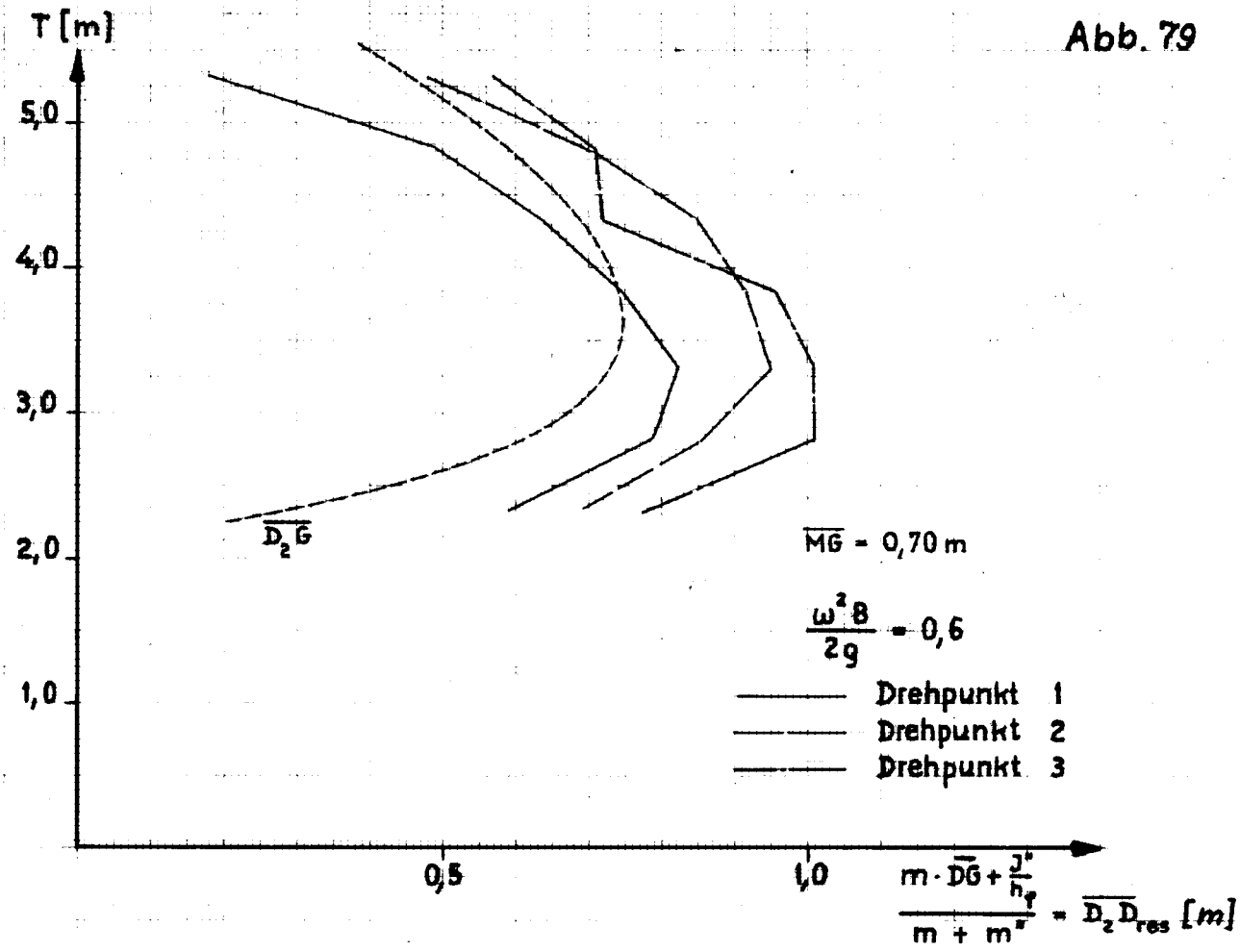

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
$\overline{D_2G}$
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,6
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
0,5
1,0
$\frac{m \cdot \overline{DG} + \frac{J^*}{h_q}}{m + m^*} = \overline{D_2 D}_{res}$ [m]

Abb. 80

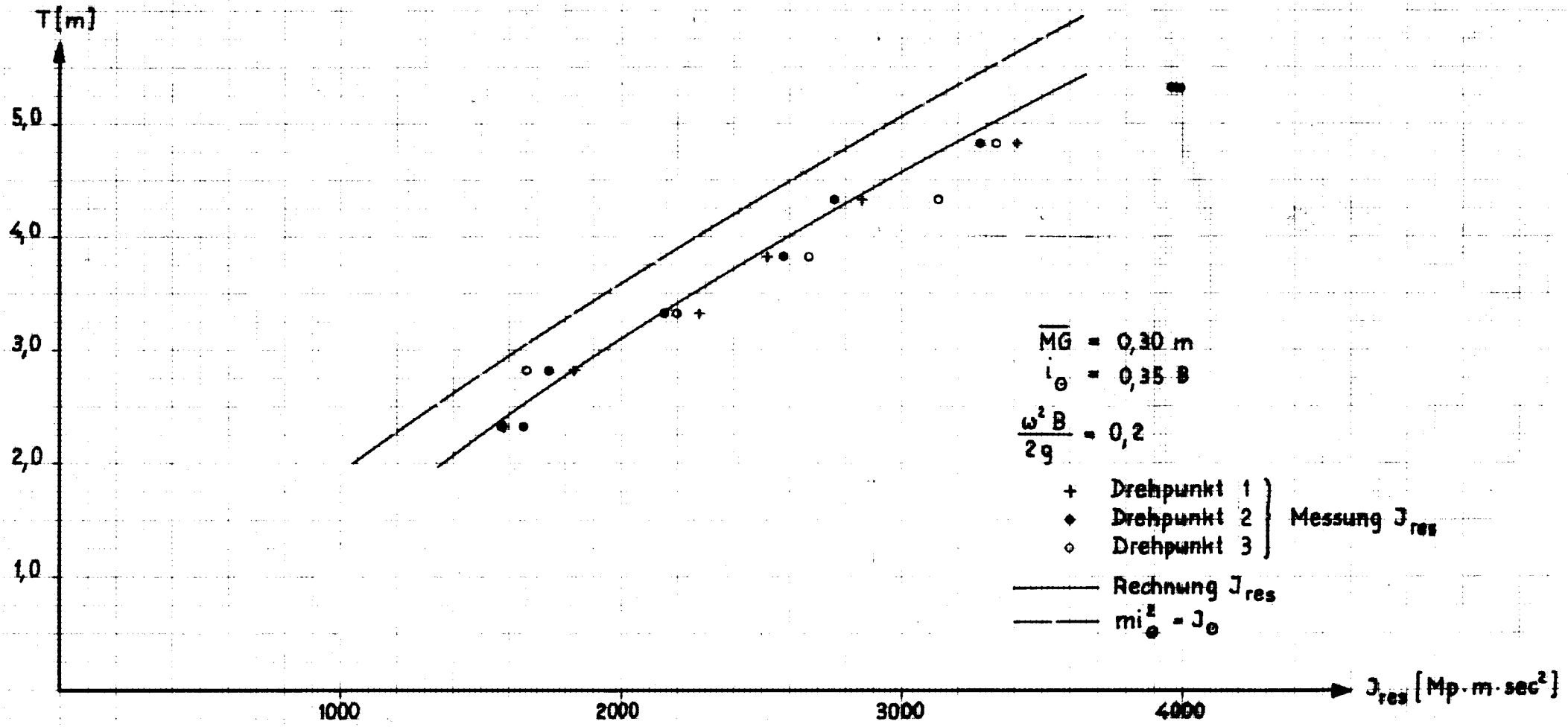

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
J_{res} [Mp·m·sec²]
$\overline{MG}$ = 0,30 m
i_Θ = 0,35 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
+ Drehpunkt 1
◆ Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$

Abb. 81

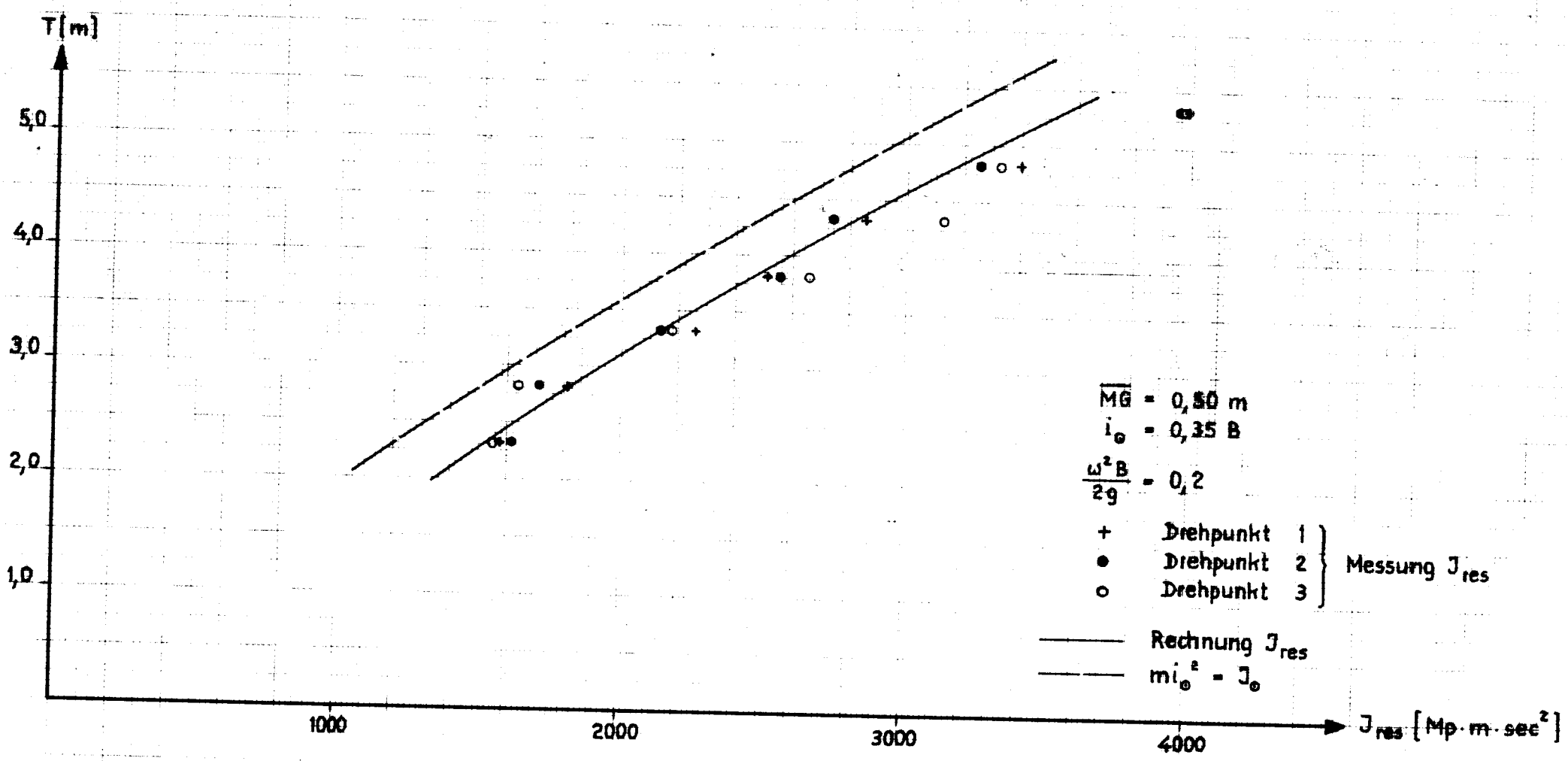

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
J_{res} [Mp · m · sec²]
$\overline{MG}$ = 0,50 m
$i_\odot$ = 0,35 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
+ Drehpunkt 1
● Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\odot^2 = J_\odot$

Abb. 82

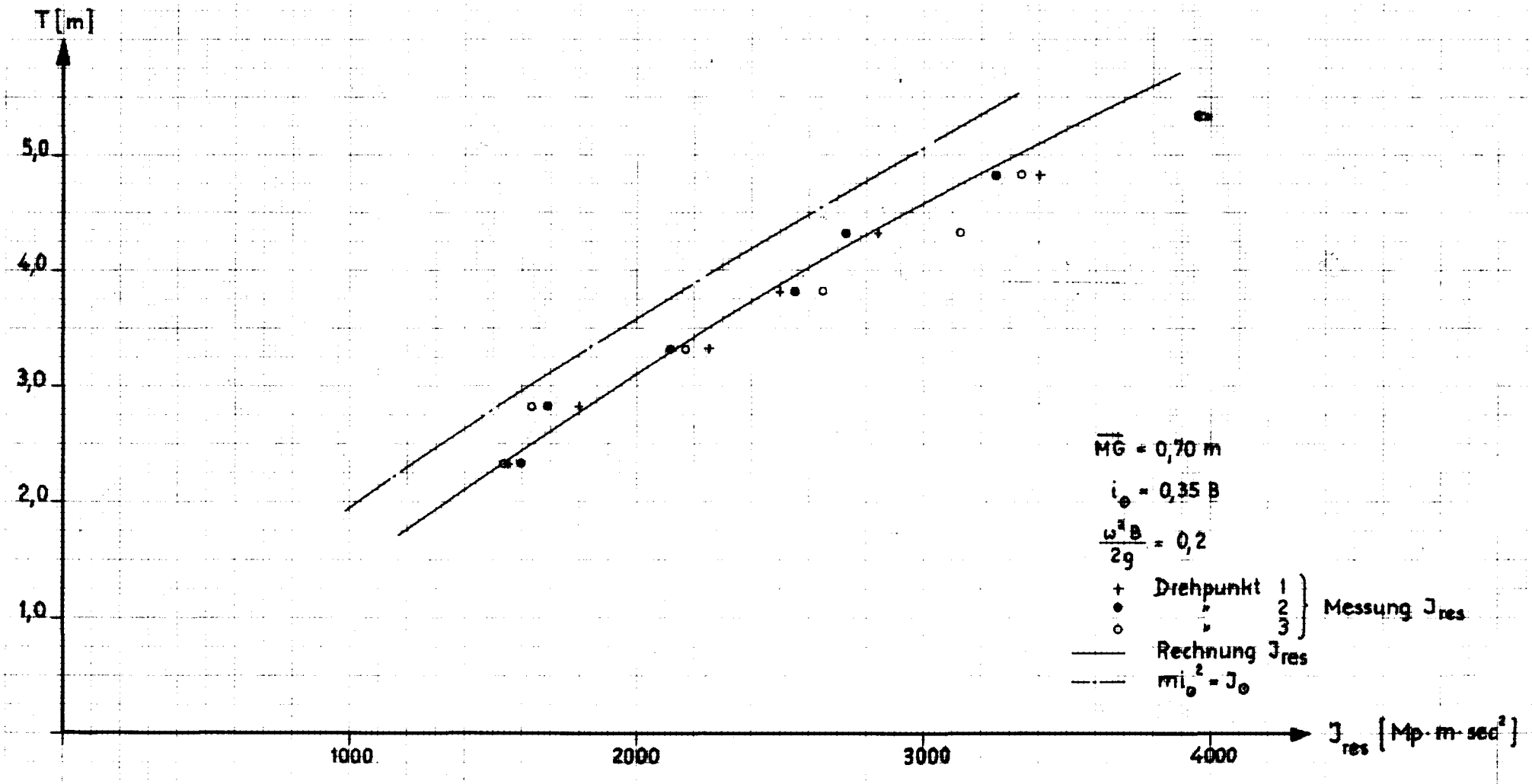

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
J_{res} [Mp·m·sec²]
$\overline{MG}$ = 0,70 m
i_Θ = 0,35 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
+ Drehpunkt 1
• " 2
○ " 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$

Abb. 83

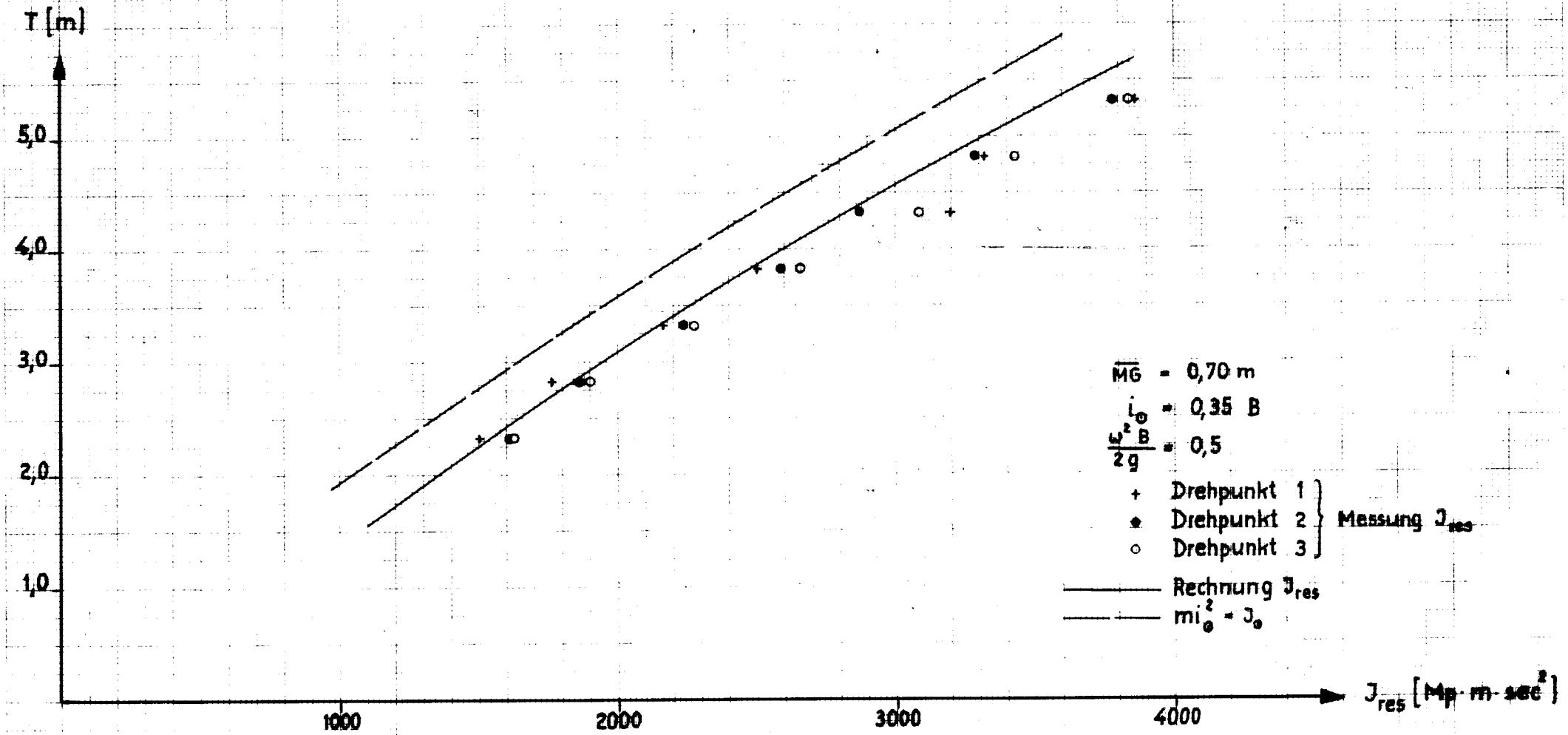

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
J_{res} [Mp · m · sec²]
$\overline{MG}$ = 0,70 m
i_Θ = 0,35 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,5
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$

Abb. 84

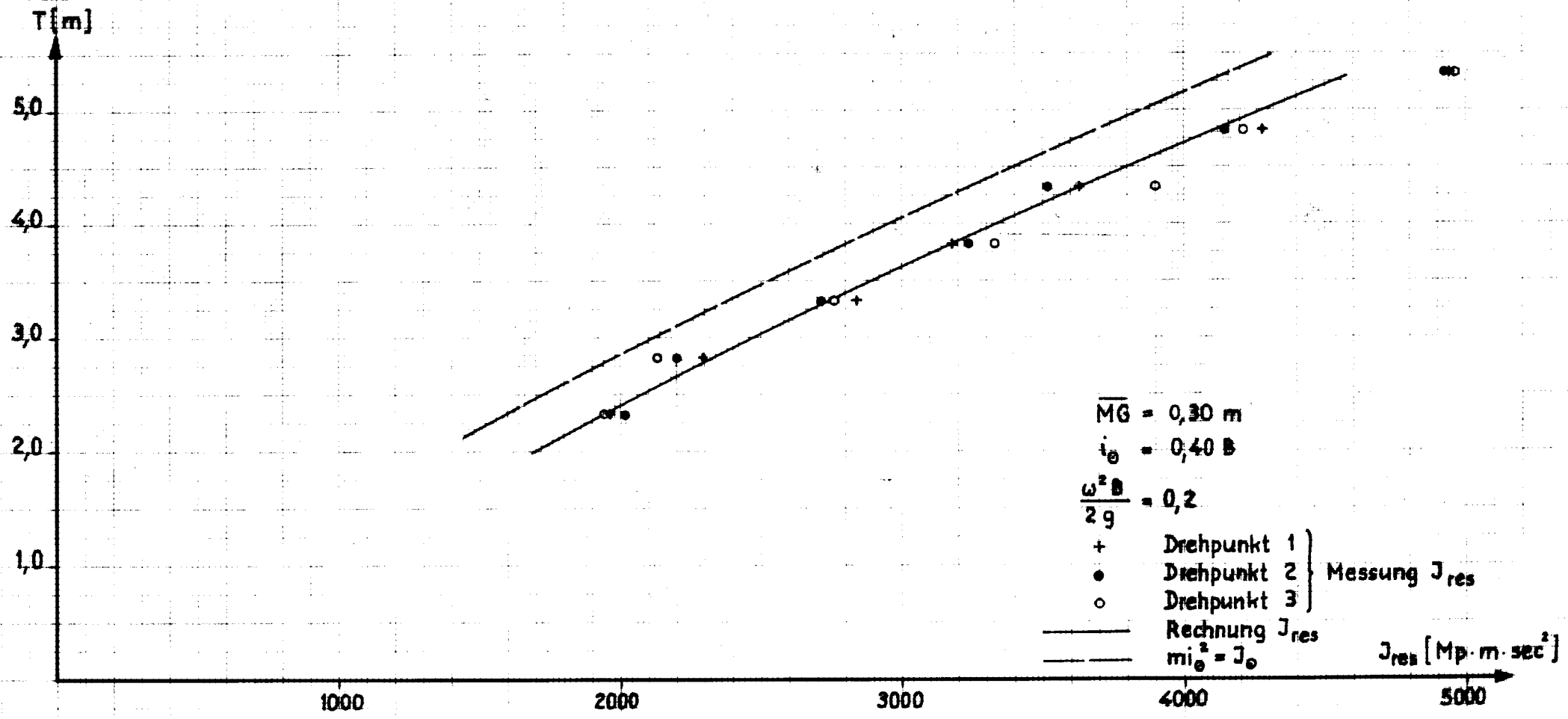

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
5000
J_{res} [Mp·m·sec²]
$\overline{MG}$ = 0,30 m
i_Θ = 0,40 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
+ Drehpunkt 1
• Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$

Abb. 85

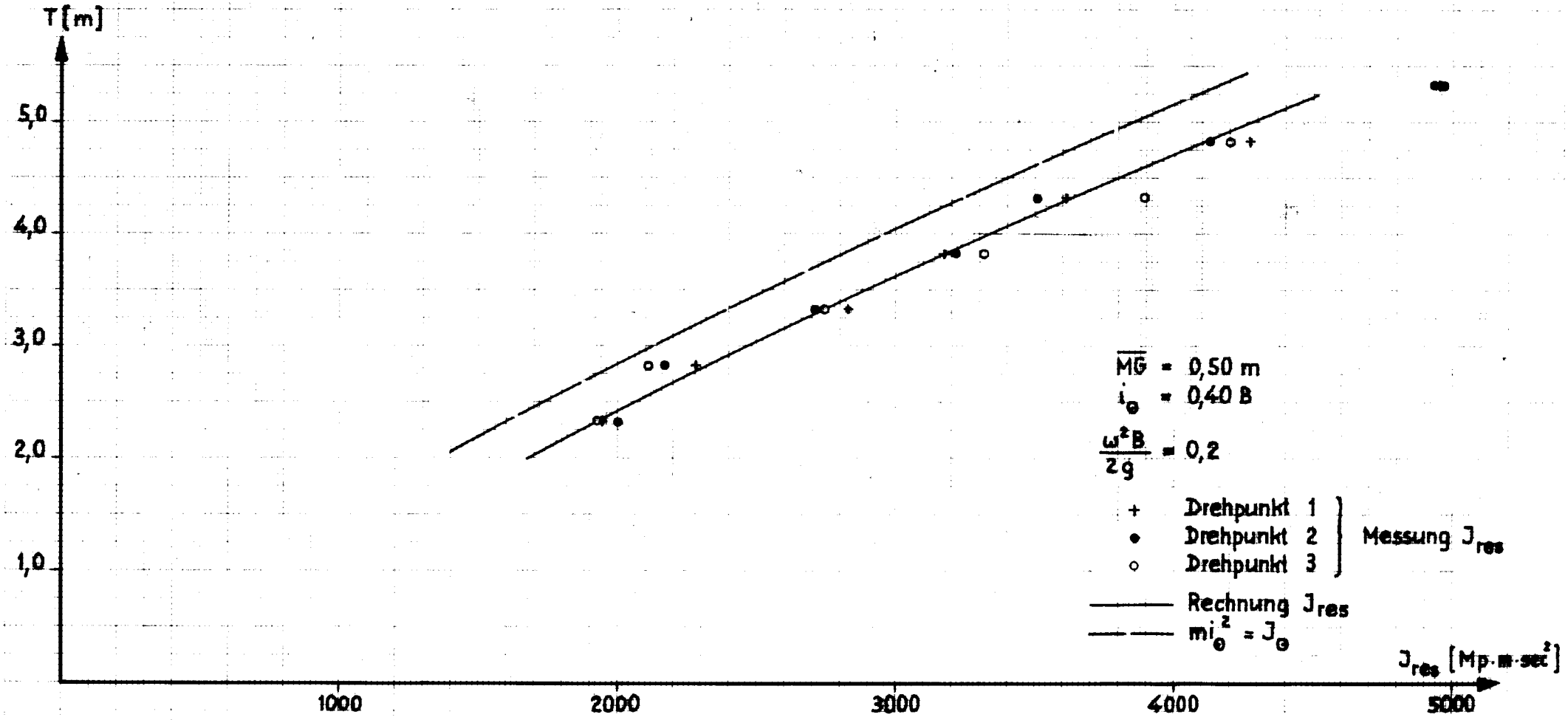

T [m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
5000
J_{res} [Mp·m·sec²]
$\overline{MG}$ = 0,50 m
i_Θ = 0,40 B
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
+ Drehpunkt 1
• Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$

Abb. 86

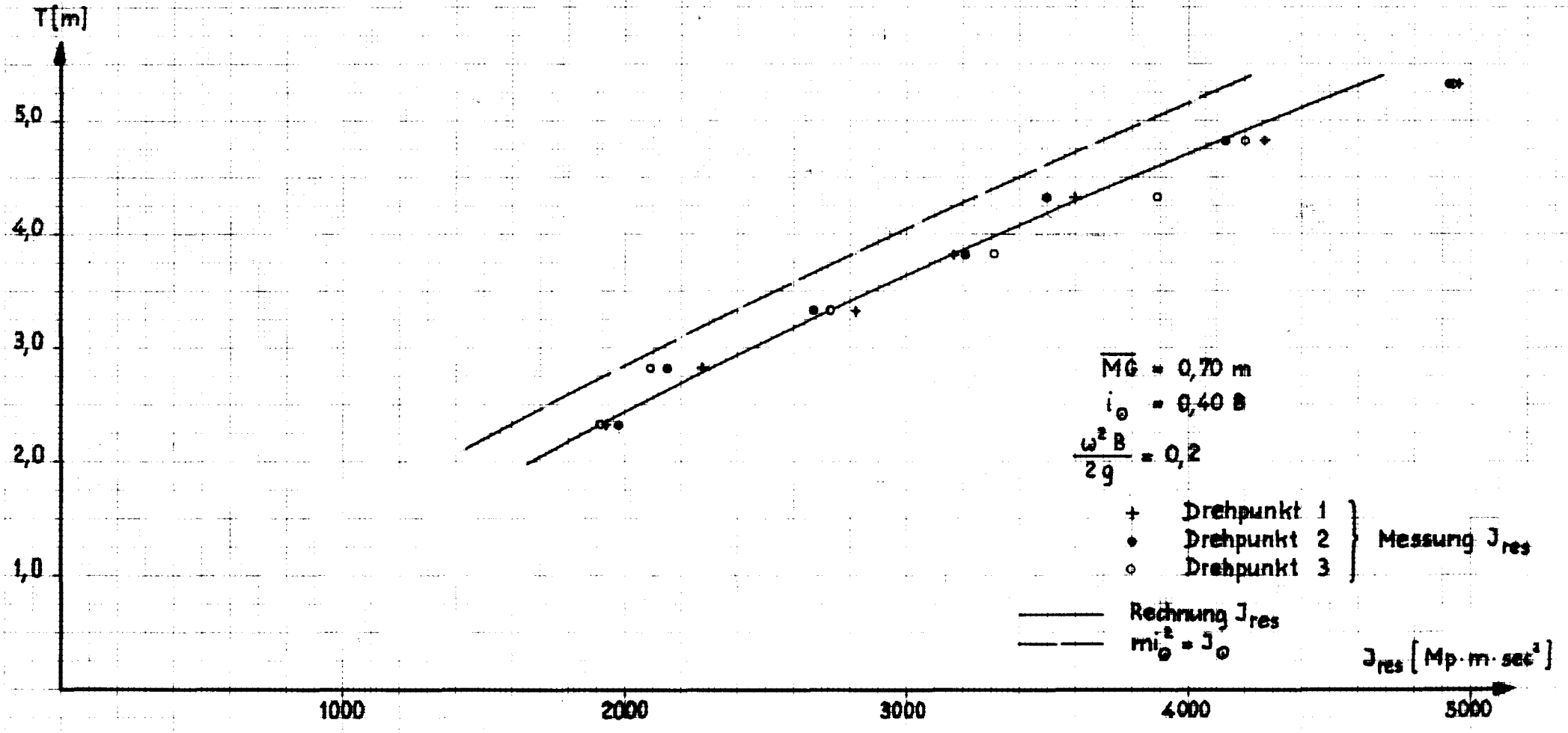
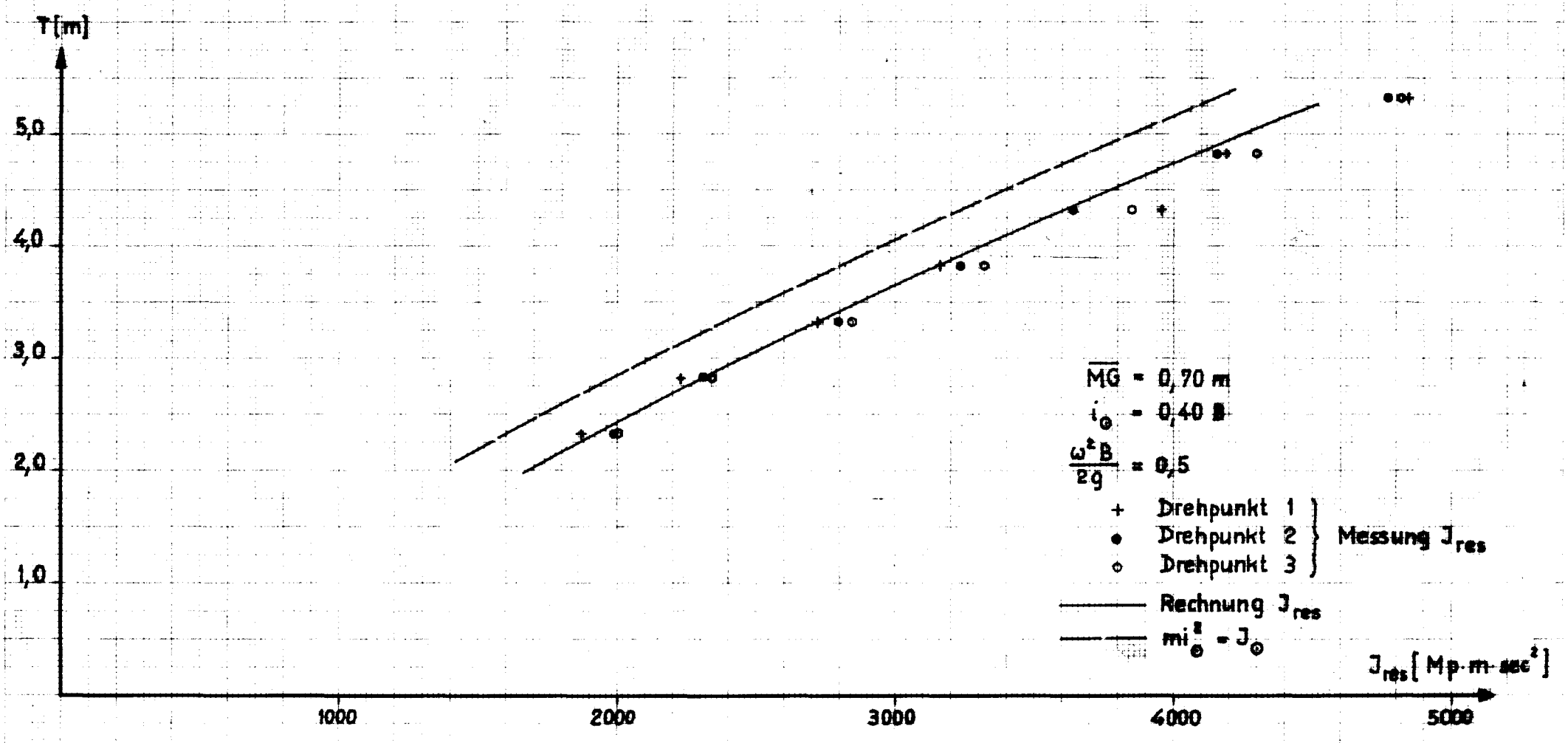

T[m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
5000
$\overline{MG}$ = 0,70 m
i_Θ = 0,40 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,2
Drehpunkt 1
Drehpunkt 2
Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\Theta^2 = J_\Theta$
J_{res} [Mp·m·sec²]

Abb. 87


T[m]
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
1000
2000
3000
4000
5000
J_{res}[Mp·m·sec²]
$\overline{MG}$ = 0,70 m
$i_\odot$ = 0,40 m
$\frac{\omega^2 B}{2g}$ = 0,5
+ Drehpunkt 1
• Drehpunkt 2
○ Drehpunkt 3
Messung J_{res}
Rechnung J_{res}
$mi_\odot^2 = J_\odot$