

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 297

Rechnerische Bestimmung der Widerstands-
erhöhung eines Schiffes in regelmäßigen
Wellen und Vergleich mit entsprechenden
Modellversuchen

P. Blume, U. Keil, P. Schenzle

Hamburg, November 1973

Zusammenfassung

Die mittlere Erhöhung des Widerstandes eines Schiffes im Seegang ist bei Kenntnis des Seeganges und der Übertragungsfunktionen der Vertikal- und Relativbewegung des Schiffes vorhersagbar über die Berechnung der Übertragungsfunktion für die Widerstandserhöhung in regelmäßigen Wellen. Der Vergleich von Versuchsergebnissen mit entsprechenden Rechnungen läßt eine gute Übereinstimmung im Bereich der Maximalwerte erkennen. Es zeigt sich deutlich, daß diese Maxima für den Fall Wellenlänge = Schiffslänge zu erwarten sind.

Diese Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" entstanden und wurde unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel durchgeführt.

Die Bestimmung des zusätzlichen Seegangswiderstandes eines Schiffes im Entwurfsstadium ist möglich, wenn erstens der zu erwartende Seegang, gekennzeichnet durch Windgeschwindigkeit oder durch Wellenhöhe und Wellenperiode, und zweitens die Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung bekannt sind. *) Die Möglichkeiten zur Beschreibung des zu erwartenden Seeganges sind in (Lit. 1) und die Umrechnung der Widerstandserhöhung auf den unregelmäßigen Seegang in (Lit. 2) dargestellt. Hier wird eine einfache Methode der Berechnung der Widerstandserhöhung bzw. deren Übertragungsfunktion angewendet (siehe Lit. 3) und die Ergebnisse mit denen aus Modellversuchen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen eine recht gute Übereinstimmung in bezug auf Größe und Lage des Maximums bei $\lambda = L$ und den Verlauf darüber hinaus. Für kürzere Wellenlängen ergibt die Rechnung zu kleine Werte.

*) Die Übertragungsfunktion ist ein durch das Quadrat der Wellenhöhe normierter Wert. Sie ist frequenzabhängig. Das "Spektrum der Widerstandserhöhung" ergibt sich dann durch Multiplikation des Seegangsspektrums mit der Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung. Die mittlere Widerstandserhöhung, der für praktische Aussagen kennzeichnende Wert, beträgt dann $2\sqrt{m_0}$, wobei m_0 das Nullte Moment des Spektrums der Widerstandserhöhung ist.

Der Vergleich zwischen der Rechnung und den Modellversuchen wird anhand eines Containerschiffes der 3. Generation durchgeführt.

HAPAG-OSTASIEN-CONT.-SCHIFF

HAUPTABMESSUNGEN..

LPP = 273,00 M
 BM = 32,20 M
 TM = 10,94 M
 TRIMM = 0,00 M

 VERDR. = 56736 M³
 XS/L = -0,019
 IYY/L = 0,250

| SPT | X/L | FSPT (M ³) | BSPT (M) | TSPT (M) | M/(RHO*DX) (M ³) |
|-----|--------|---------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| 1 | -0.475 | 21.5 | 10.20 | 4.40 | 121.4 |
| 2 | -0.425 | 67.5 | 19.40 | 10.94 | 153.5 |
| 3 | -0.375 | 137.0 | 25.60 | 10.94 | 181.8 |
| 4 | -0.325 | 196.0 | 29.20 | 10.94 | 206.2 |
| 5 | -0.275 | 245.5 | 31.30 | 10.94 | 226.8 |
| 6 | -0.225 | 286.5 | 32.10 | 10.94 | 243.6 |
| 7 | -0.175 | 308.0 | 32.20 | 10.94 | 256.5 |
| 8 | -0.125 | 319.0 | 32.20 | 10.94 | 265.6 |
| 9 | -0.075 | 325.0 | 32.20 | 10.94 | 270.9 |
| 10 | -0.025 | 325.5 | 32.20 | 10.94 | 272.3 |
| 11 | 0.025 | 322.5 | 32.20 | 10.94 | 269.9 |
| 12 | 0.075 | 314.0 | 32.20 | 10.94 | 263.7 |
| 13 | 0.125 | 299.5 | 32.10 | 10.94 | 253.6 |
| 14 | 0.175 | 274.0 | 31.20 | 10.94 | 239.7 |
| 15 | 0.225 | 237.0 | 29.20 | 10.94 | 221.9 |
| 16 | 0.275 | 180.0 | 25.50 | 10.94 | 200.3 |
| 17 | 0.325 | 123.0 | 20.10 | 10.94 | 174.9 |
| 18 | 0.375 | 80.0 | 13.50 | 10.94 | 145.6 |
| 19 | 0.425 | 55.0 | 7.20 | 10.94 | 112.6 |
| 20 | 0.475 | 40.0 | 2.00 | 10.84 | 75.6 |

1. Das Rechenverfahren

Die Berechnung der Übertragungsfunktion des zusätzlichen Seegangswiderstandes erfolgt nach der in Lit. 3 vorgeschlagenen Methode. Dazu müssen die Vertikalbewegungen (Tauchen und Stampfen) und die Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche bekannt sein. Diese Werte können über ein in (Lit. 4) beschriebenes Rechenprogramm nach der Streifenmethode ermittelt werden.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung dieser Werte für mehrere Wellenlängen und Schiffsgeschwindigkeiten. Anhand dieser Werte, den Vertikalbewegungen zum einen und der Relativbewegung zum anderen, lassen sich zwei Anteile des zusätzlichen Widerstandes berechnen. Der erste Anteil ergibt sich als mittlere Längskraft aus der Integration der oszillierenden Drücke über die gesamte Schiffsoberfläche bis zur mittleren Wasserlinie am tauchenden und stampfenden Schiff im raumfesten System. Der zweite Anteil resultiert aus der Integration der zusätzlichen Drücke in der Zone der zeitweiligen Benetzung um die mittlere Wasserlinie (im Bereich der Relativbewegung).

Tabelle 2 zeigt die nach diesem Verfahren berechneten Werte der Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung.

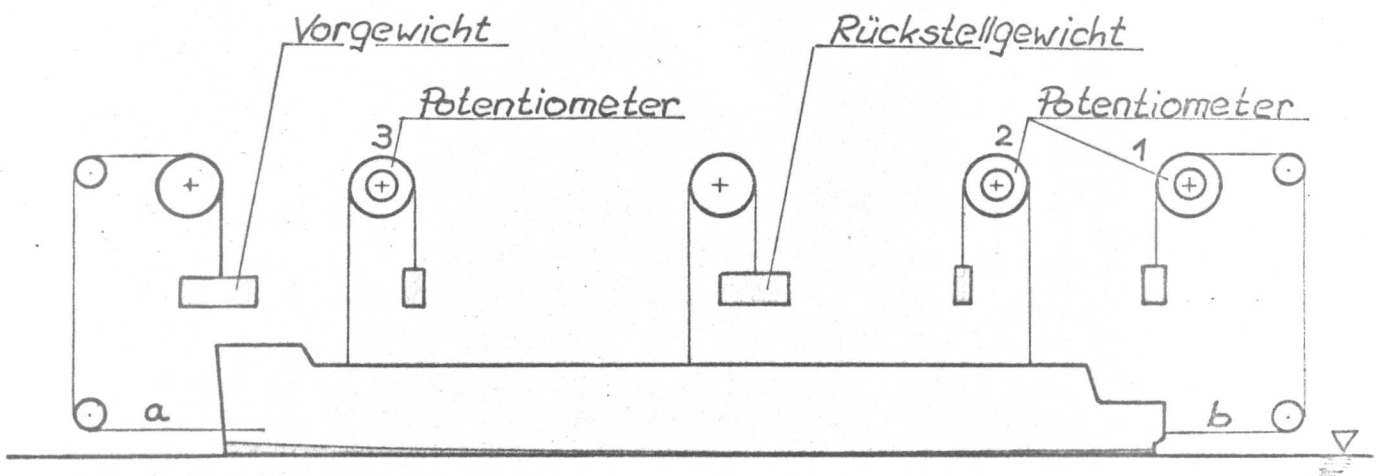
2. Der Modellversuch

Es wurden Versuche mit einem Containerschiffsmodell im großen Tank der HSVA in Glattwasser sowie in regelmäßiger, von vorn kommender See durchgeführt.

Dabei wurden folgende Werte gemessen:

- Modellwiderstand
- Modellgeschwindigkeit
- Vertikalbewegung (vorn und hinten)
- Horizontalbewegung
- Wellenhöhe, Wellenlänge
- Begegnungsfrequenz

Außerdem wurden bei jeder Versuchsfahrt im Seegang etwa 10 Serienfotos vom bewegten Modell gemacht.



Versuchs- und Meßeinrichtung

Das Modell wird in Längsrichtung durch die Spanndrähte (a) und (b) geführt. In der skizzierten Meßanordnung wird der Widerstandsbereich grob über das Vorgewicht erfaßt. Mit Hilfe des geeichten Potentiometers 1 wird die Feinmessung durchgeführt. Das Rückstellgewicht wirkt dabei als sehr weiche Feder in Längsrichtung. Die feine Widerstandsmessung über den Spanndraht (a) auf eine Kraftmeßdose hat sich nicht bewährt, da durch die hohe Eigenfrequenz das kleine Widerstandssignal durch große Vibrationssignale überdeckt wird. Über die Potentiometer 2 und 3 wird die hintere bzw. vordere Vertikalbewegung gemessen. Alle diese Messungen werden zusammen mit der von einer Ultraschall-Wellensonde gemessenen Wellenhöhe auf einem U-V-Schreiber aufgezeichnet (Bild 3). Die Modellgeschwindigkeit wird nach der üblichen Methode am Modellwagen bestimmt. Die Glattwasser- und Seegangswiderstandsversuche werden mit der gleichen Schlepp- und Meßeinrichtung durchgeführt, um die eventuell die Widerstandsdifferenz stark beeinflussenden mechanischen Unterschiede bei verschiedenen Versuchsanordnungen auszuschließen. Mit der skizzierten Meßeinrichtung kann das Modell sich in seine, dem Widerstand entsprechende Gleichgewichtslage einpendeln. In kurzen Abständen wird das Modell fotografiert, um seinen Bewegungsablauf relativ zur Welle zu erfassen. Bild 5 zeigt eine Fotoserie.

Die Auswertung dieser Fotos erfolgt von Hand durch Abzeichnen der Wellenkontur auf Papier. Dabei zeigt sich, daß sich die Fotos durch die Geodätenmarken sehr gut auswerten lassen. Die Doppel-Amplitude der Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche ergibt sich dann als Abstand zwischen der oberen und der unteren Einhüllenden dieser momentanen Wellenkonturen. Eine Schwierigkeit bei der Auswertung liegt in der starken Spritzer- und Gischtbildung beim Eintauchen des Buges, welche eine genaue Bestimmung der Wellenkontur erschwert. Außerdem bildet sich ein zweites Bugwellensystem aus, so daß die wirkliche Wellenkontur nicht exakt feststellbar ist. Einen Ausweg eröffnet die Annahme, daß die Tauch- und Stampfbewegung symmetrisch ist. Außerdem ist aus den Glattwasserversuchen die Glattwasserwellenkontur bekannt. Dann ergibt sich

die Amplitude der Relativbewegung als Abstand zwischen der Glattwasserwellenkontur und der unteren Einhüllenden.

Die Durchführung der Glattwasserwiderstandsversuche erfolgt nach der üblichen Routine. Die Versuche in regelmäßigen, von vorn kommenden Wellen werden in Abständen von 45 min durchgeführt, damit das Tankwasser sich zwischen zwei Fahrten weitgehend beruhigen kann. Während der Versuchsdurchführung zeigt sich ein bemerkenswerter Effekt: Die Glattwasserwiderstandswerte, die bei Kontrollversuchen kurz nach Wellenversuchen erzielt wurden, weichen stärker als in den üblichen Toleranzen von den Ergebnissen der anfänglichen Glattwasserfahrten ab. Dies scheint auf eine von den Wellen nachwirkende Turbulenz des Tankwassers zurückzuführen zu sein, da die Wasseroberfläche keine wesentliche Bewegung zeigt.

Die Versuche werden durchgeführt für folgende Modellgeschwindigkeiten

| | | | | | | |
|-------|---|------|-----|------|---|-------|
| v_m | = | 1.67 | m/s | Fn | = | 0.188 |
| | | 1.94 | m/s | | | 0.219 |
| | | 2.11 | m/s | | | 0.238 |
| | | 2.29 | m/s | | | 0.258 |
| | | 2.47 | m/s | | | 0.278 |

a. im Glattwasser

b. in regelmäßigen von vorn kommenden Wellen

| | | | | | | | |
|---------------|---|------|---|-------------|---|------|----|
| mit λ | = | 1.7 | m | und ξ_H | = | 6.0 | cm |
| | | 3.3 | " | | | 6.5 | " |
| | | 5.0 | " | | | 7.0 | " |
| | | 6.8 | " | | | 9.5 | " |
| | | 8.8 | " | | | 10.3 | " |
| | | 10.8 | " | | | 11.8 | " |
| | | 13.0 | " | | | 11.8 | " |
| | | 16.0 | " | | | 13.2 | " |

In Bild 1 sind die Ergebnisse der Widerstandsversuche dargestellt als gestraakte Kurven über der Froudezahl.

Die Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung kann aus den gemessenen Werten berechnet werden. ΔR ist die Widerstandsdifferenz aus Wellen- und Glattwasserwiderstandsversuch.

$$Y_{RW} = \frac{\Delta R}{\rho \cdot g \cdot B^3 / L \cdot \rho_w^2} \quad \Delta R = R_W - R_G$$

Tabelle 3 zeigt das Ergebnis der Modellversuche.

In Bild 2 sind die einzelnen Meßpunkte eingetragen.

Es wird eine Fehlerabschätzung durchgeführt. Der Fehler bei der Widerstandsbestimmung ist ein absoluter Fehler, der in seiner Größe im wesentlichen von der Reibung der Umlenk- und Potentiometerrollen abhängt. Problematisch ist die Betrachtung des Fehlers bei der Differenz zweier Werte, die nahezu gleich groß sind. Hier kann der Fehler so groß wie der Wert selbst werden. (Dies trifft für kleine Werte von λ/L zu.) Der Fehler bei der Messung und Auswertung der Wellenhöhe liegt bei der üblichen Größe von 2 - 3 %.

Der gesamte (relative) Fehler ergibt sich zu:

$$f = \sqrt{\frac{F_{WH}^2}{\xi^2} + \frac{F_W^2 + F_G^2}{(R_W - R_G)^2}}$$

- F_{WH} = absoluter Fehler der Wellenhöhe
- F_W = " " des Wellenwiderstandes in Wellen
- F_G = " " des Glattwasserwiderstandes
- ξ = Wellenhöhe

3. Vergleich Messung - Rechnung

Anhand der im Modellversuch direkt gemessenen oder aus aufgezeichneten Werten ermittelter Größen läßt sich zum einen das Ergebnis aus Rechnung und Versuch vergleichen, sowie die Komponenten, deren Summe das Ergebnis ist.

a. Das Ergebnis:

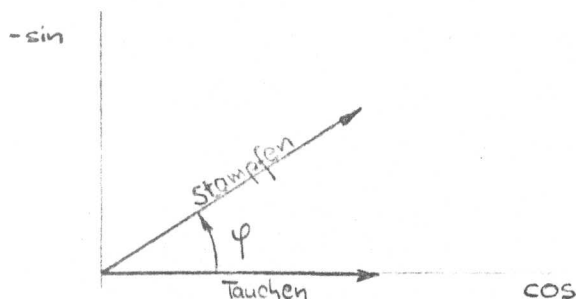
In Bild 2 sind die Rechenwerte als Kurve, die Meßwerte als diskrete Punkte und der Bereich des Fehlers eingetragen.

b. Die Komponenten:

Anlehnend an die Nomenklatur in (Lit. 3) werden die Übertragungsfunktionen der Widerstandserhöhung infolge der Vertikalbewegung mit YPXS und infolge der Relativbewegung mit YPXSS bezeichnet. Die in den Tabellen 2 und 4 ermittelten Werte sind in Bild 4 graphisch dargestellt für $F_n = 0.278$.

Die in Bild 2 auffallende extreme Differenz der Rechen- und Meßwerte ist demnach auf den "zweiten Anteil" zurückzuführen. Um die bestehenden Unterschiede näher zu untersuchen, erfolgt die Analyse der gemessenen Vertikalbewegungen und der fotografierten Relativbewegung (siehe Bild 3, 5, 6).

Für eine Geschwindigkeit ($F_n = 0.278$) ist das Ergebnis dieser Versuchsanalyse und das Ergebnis der Rechnung verglichen und grafisch in Bild 7 (Vertikalbewegung) und Bild 8 (Relativbewegung) dargestellt. Der in Bild 7 dargestellte Phasenwinkel φ ist folgendermaßen definiert:



Literaturangaben

- 1 Moskowitz, L., Pierson, W.J.:
A Proposed Spectral Form
Journal of Geophysical Research, Vol. 69, No. 24
Dezember 1964

- 2 Gerritsma, J., van den Bosch, J.J., Beukelman, W.:
Propulsion in Regular and Irregular Waves
International Shipbuilding Progress
Juni 1961

- 3 Boese, P.:
Eine einfache Methode ...
IfS-Bericht Nr. 258, Februar 1970

- 4 Kirsch, M.:
Die Berechnung der Bewegungsgrößen ...
IfS-Bericht Nr. 241, Mai 1969

ÜBERPRÜFUNGSFUNKTIONEN DER TAUCH- UND STAMPFBEWEGUNGEN
 FORM. SEE VON VORN (MY = 180 GRD)

FN(PP) = 0.188

| LA/L | WD (1/S) | Z A/ZETA A | | | THETA A/(ZETA A*K) | | |
|------|-------------|------------|----------|-------|--------------------|----------|-------|
| | | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES |
| .22 | 1.013 | .0022 | -.0021 | .0031 | .0001 | -.0007 | .0007 |
| .42 | .733 | .0080 | -.0220 | .0234 | -.0098 | -.0195 | .0218 |
| .63 | .599 | .1403 | -.1152 | .1815 | .0223 | .0030 | .0225 |
| .85 | .515 | .4280 | .0526 | .4313 | .3949 | -.1261 | .4145 |
| .90 | .501 | .5084 | .0258 | .5091 | .4469 | -.2121 | .4947 |
| .95 | .488 | .5614 | -.0076 | .5615 | .4780 | -.2980 | .5633 |
| 1.00 | .475 | .5944 | -.0359 | .5955 | .4929 | -.3780 | .6212 |
| 1.05 | .464 | .6159 | -.0553 | .6183 | .4962 | -.4498 | .6697 |
| 1.10 | .453 | .6315 | -.0669 | .6350 | .4921 | -.5127 | .7106 |
| 1.33 | .412 | .6867 | -.0673 | .6900 | .4367 | -.7113 | .8346 |
| 1.62 | .373 | .7495 | -.0419 | .7506 | .3624 | -.8407 | .9155 |
| 2.00 | .336 | .8132 | -.0182 | .8134 | .2898 | -.9257 | .9700 |

FN(PP) = 0.218

| LA/L | WD (1/S) | Z A/ZETA A | | | THETA A/(ZETA A*K) | | |
|------|-------------|------------|----------|-------|--------------------|----------|-------|
| | | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES |
| .22 | 1.013 | .0019 | -.0019 | .0027 | .0000 | -.0005 | .0005 |
| .42 | .733 | .0065 | -.0180 | .0191 | -.0073 | -.0157 | .0173 |
| .63 | .599 | .1234 | -.0749 | .1443 | .0168 | .0009 | .0168 |
| .85 | .515 | .3770 | .2031 | .4282 | .3888 | -.0474 | .3917 |
| .90 | .501 | .5086 | .1989 | .5461 | .4614 | -.1275 | .4787 |
| .95 | .488 | .6108 | .1568 | .6306 | .5115 | -.2148 | .5548 |
| 1.00 | .475 | .6769 | .1025 | .6846 | .5419 | -.3017 | .6202 |
| 1.05 | .464 | .7144 | .0527 | .7164 | .5563 | -.3833 | .6755 |
| 1.10 | .453 | .7342 | .0136 | .7344 | .5589 | -.4570 | .7219 |
| 1.33 | .412 | .7602 | -.0524 | .7620 | .5042 | -.6932 | .8572 |
| 1.62 | .373 | .7905 | -.0446 | .7918 | .4158 | -.8417 | .9388 |
| 2.00 | .336 | .8343 | -.0236 | .8347 | .3297 | -.9351 | .9915 |

FN(PP) = 0.238

| LA/L | WD (1/S) | Z A/ZETA A | | | THETA A/(ZETA A*K) | | |
|------|-------------|------------|----------|-------|--------------------|----------|--------|
| | | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES |
| .22 | 1.013 | .0018 | -.0017 | .0025 | .0000 | -.0004 | .0004 |
| .42 | .733 | .0057 | -.0160 | .0170 | -.0062 | -.0137 | .0151 |
| .63 | .599 | .1110 | -.0572 | .1248 | .0147 | -.0004 | .0147 |
| .85 | .515 | .3012 | .2707 | .4050 | .3726 | -.0003 | .3726 |
| .90 | .501 | .4533 | .3062 | .5470 | .4575 | -.0730 | .4632 |
| .95 | .488 | .5934 | .2829 | .6574 | .5196 | -.1577 | .5430 |
| 1.00 | .475 | .6963 | .2253 | .7318 | .5610 | -.2452 | .6123 |
| 1.05 | .464 | .7602 | .1591 | .7767 | .5851 | -.3302 | .6718 |
| 1.10 | .453 | .7947 | .0995 | .8009 | .5952 | -.4094 | .7224 |
| 1.33 | .412 | .8169 | -.0306 | .8175 | .5502 | -.6731 | .8694 |
| 1.62 | .373 | .8233 | -.0436 | .8245 | .4542 | -.8387 | .9538 |
| 2.00 | .336 | .8513 | -.0269 | .8517 | .3588 | -.9400 | 1.0061 |

UEBERTRAGUNGSFUNKTIONEN DER TAUCH- UND STAMPFBEWEGUNGEN
 FÜR DIE SEE VON VORN (MY = 180 GRD)

FN(PP) = 0.258

| LA/L | WD (1/S) | Z A/ZETA A | | | THETA A/(ZETA A*K) | | |
|------|-------------|------------|----------|-------|--------------------|----------|--------|
| | | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES |
| .22 | 1.013 | .0016 | -.0016 | .0023 | .0000 | -.0004 | .0004 |
| .42 | .733 | .0050 | -.0144 | .0153 | -.0054 | -.0120 | .0132 |
| .63 | .599 | .0993 | -.0444 | .1088 | .0132 | -.0016 | .0133 |
| .85 | .515 | .2143 | .3012 | .3697 | .3486 | .0413 | .3511 |
| .90 | .501 | .3646 | .3839 | .5294 | .4453 | -.0216 | .4458 |
| .95 | .488 | .5319 | .3990 | .6649 | .5190 | -.1025 | .5290 |
| 1.00 | .475 | .6748 | .3572 | .7635 | .5704 | -.1891 | .6009 |
| 1.05 | .464 | .7755 | .2863 | .8266 | .6037 | -.2749 | .6633 |
| 1.10 | .453 | .8363 | .2105 | .8623 | .6222 | -.3569 | .7173 |
| 1.33 | .412 | .8781 | .0041 | .8782 | .5951 | -.6458 | .8782 |
| 1.62 | .373 | .8607 | -.0392 | .8616 | .4944 | -.8320 | .9679 |
| 2.00 | .336 | .8708 | -.0296 | .8713 | .3897 | -.9434 | 1.0208 |

FN(PP) = 0.278

| LA/L | WD (1/S) | Z A/ZETA A | | | THETA A/(ZETA A*K) | | |
|------|-------------|------------|----------|-------|--------------------|----------|--------|
| | | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES | COS-KOMP | SIN-KOMP | RES |
| .22 | 1.013 | .0015 | -.0015 | .0022 | -.0000 | -.0003 | .0003 |
| .42 | .733 | .0044 | -.0131 | .0139 | -.0048 | -.0106 | .0116 |
| .63 | .599 | .0888 | -.0352 | .0955 | .0121 | -.0024 | .0124 |
| .85 | .515 | .1343 | .2992 | .3279 | .3181 | .0756 | .3269 |
| .90 | .501 | .2610 | .4225 | .4966 | .4253 | .0265 | .4262 |
| .95 | .488 | .4355 | .4872 | .6534 | .5117 | -.0491 | .5140 |
| 1.00 | .475 | .6107 | .4803 | .7769 | .5729 | -.1349 | .5886 |
| 1.05 | .464 | .7519 | .4216 | .8621 | .6140 | -.2209 | .6525 |
| 1.10 | .453 | .8484 | .3399 | .9139 | .6399 | -.3037 | .7083 |
| 1.33 | .412 | .9409 | .0548 | .9425 | .6365 | -.6114 | .8826 |
| 1.62 | .373 | .9027 | -.0301 | .9032 | .5358 | -.8209 | .9803 |
| 2.00 | .336 | .8930 | -.0316 | .8936 | .4226 | -.9450 | 1.0351 |

ENDE STÖHP 133.03

ERMITTLUNG DER ÜBERTRAGUNGSFKT. DER WIDERSTANDSERHOEHUNG IM SEEANG
 MIT DEN BERECHNETEN WERTEN DER TAUCH- UND STAMPFBEWEGUNGEN
 FUER SEE VON VORN (MY=180 GRD)

FN = 0.188

| LA/L | WD (1/S) | YPXS | YPXSS | YRW |
|------|----------|-------|-------|------|
| .22 | 1.013 | -0.00 | 0.01 | 0.01 |
| .42 | .733 | -0.01 | 0.53 | 0.51 |
| .63 | .599 | -0.07 | 1.07 | 1.00 |
| .85 | .515 | -1.73 | 10.12 | 8.39 |
| .90 | .501 | -2.07 | 11.02 | 8.94 |
| .95 | .488 | -2.23 | 11.06 | 8.83 |
| 1.00 | .475 | -2.23 | 10.53 | 8.30 |
| 1.05 | .464 | -2.14 | 9.69 | 7.55 |
| 1.10 | .453 | -1.99 | 8.73 | 6.74 |
| 1.33 | .412 | -1.27 | 4.92 | 3.65 |
| 1.62 | .373 | -0.69 | 2.38 | 1.69 |
| 2.00 | .336 | -0.35 | 1.03 | 0.68 |

FN = 0.218

| LA/L | WD (1/S) | YPXS | YPXSS | YRW |
|------|----------|-------|-------|-------|
| .22 | 1.013 | -0.00 | 0.01 | 0.01 |
| .42 | .733 | -0.01 | 0.41 | 0.40 |
| .63 | .599 | -0.06 | 0.76 | 0.70 |
| .85 | .515 | -1.60 | 10.15 | 8.54 |
| .90 | .501 | -2.17 | 11.87 | 9.70 |
| .95 | .488 | -2.56 | 12.63 | 10.07 |
| 1.00 | .475 | -2.74 | 12.55 | 9.81 |
| 1.05 | .464 | -2.74 | 11.89 | 9.15 |
| 1.10 | .453 | -2.63 | 10.92 | 8.29 |
| 1.33 | .412 | -1.72 | 6.26 | 4.54 |
| 1.62 | .373 | -0.93 | 3.00 | 2.07 |
| 2.00 | .336 | -0.45 | 1.27 | 0.82 |

FN = 0.238

| LA/L | WD (1/S) | YPXS | YPXSS | YRW |
|------|----------|-------|-------|-------|
| .22 | 1.013 | -0.00 | 0.01 | 0.01 |
| .42 | .733 | -0.01 | 0.35 | 0.34 |
| .63 | .599 | -0.05 | 0.62 | 0.57 |
| .85 | .515 | -1.38 | 9.69 | 8.32 |
| .90 | .501 | -2.03 | 11.87 | 9.84 |
| .95 | .488 | -2.58 | 13.16 | 10.57 |
| 1.00 | .475 | -2.93 | 13.52 | 10.59 |
| 1.05 | .464 | -3.06 | 13.16 | 10.09 |
| 1.10 | .453 | -3.02 | 12.31 | 9.29 |
| 1.33 | .412 | -2.07 | 7.28 | 5.21 |
| 1.62 | .373 | -1.12 | 3.48 | 2.36 |
| 2.00 | .336 | -0.54 | 1.47 | 0.93 |

Tabelle 2a

ERMITTLUNG DER UEBERTRAGUNGSFKT. DER WIDERSTANDSERHOEHUNG IM SEEGANG
 MIT DEN BERECHNETEN WERTEN DER TAUCH- UND STAMPFBEWEGUNGEN
 FÜR SEE VON VORN (MY=180 GRD)

FN = 0.258

| LA/L | WD (1/S) | YPXS | YPXSS | YRW |
|------|----------|-------|-------|-------|
| .22 | 1.013 | -0.00 | 0.01 | 0.01 |
| .42 | .733 | -0.01 | 0.31 | 0.30 |
| .63 | .599 | -0.04 | 0.51 | 0.47 |
| .85 | .515 | -1.11 | 9.01 | 7.90 |
| .90 | .501 | -1.76 | 11.51 | 9.75 |
| .95 | .488 | -2.43 | 13.26 | 10.83 |
| 1.00 | .475 | -2.94 | 14.10 | 11.16 |
| 1.05 | .464 | -3.24 | 14.12 | 10.88 |
| 1.10 | .453 | -3.33 | 13.52 | 10.20 |
| 1.33 | .412 | -2.46 | 8.39 | 5.93 |
| 1.62 | .373 | -1.33 | 4.02 | 2.68 |
| 2.00 | .336 | -0.64 | 1.69 | 1.05 |

FN = 0.278

| LA/L | WD (1/S) | YPXS | YPXSS | YRW |
|------|----------|-------|-------|-------|
| .22 | 1.013 | -0.00 | 0.00 | 0.00 |
| .42 | .733 | -0.01 | 0.27 | 0.27 |
| .63 | .599 | -0.04 | 0.43 | 0.39 |
| .85 | .515 | -0.85 | 8.17 | 7.32 |
| .90 | .501 | -1.44 | 10.88 | 9.44 |
| .95 | .488 | -2.14 | 13.02 | 10.88 |
| 1.00 | .475 | -2.78 | 14.29 | 11.52 |
| 1.05 | .464 | -3.24 | 14.72 | 11.48 |
| 1.10 | .453 | -3.48 | 14.42 | 10.95 |
| 1.33 | .412 | -2.85 | 9.54 | 6.69 |
| 1.62 | .373 | -1.58 | 4.62 | 3.05 |
| 2.00 | .336 | -0.84 | 2.25 | 1.41 |

AUSWERTUNG DER MODELLVERSUCHE 'HAPAG-OSTASIEN-CONTAINER-SCHIFF'

=====

ERMITTLUNG DER UEBERTRAGUNGSFKT. DER WIDERSTANDSERHOEHUNG IM SEEGANG
DURCH MESSUNG DES ZUSAETZLICHEN WIDERSTANDES IM MODELLVERSUCH

| VERSUCH NR | LA/L | DM (1/S) | FN | YRW |
|------------|------|----------|-------|-------|
| 8 | 0.21 | 1.026 | 0.188 | 2.62 |
| 204 | 0.22 | 1.014 | 0.188 | 2.47 |
| 207 | 0.22 | 1.014 | 0.188 | 2.14 |
| 9 | 0.21 | 1.030 | 0.217 | 4.56 |
| 209 | 0.22 | 1.012 | 0.237 | 3.28 |
| 211 | 0.22 | 1.012 | 0.237 | 2.59 |
| 10 | 0.21 | 1.025 | 0.238 | 4.65 |
| 11 | 0.22 | 1.009 | 0.258 | 3.97 |
| 12 | 0.22 | 1.010 | 0.278 | 5.82 |
| 205 | 0.22 | 1.009 | 0.278 | 4.99 |
| 206 | 0.22 | 1.010 | 0.278 | 4.50 |
| 13 | 0.41 | 0.740 | 0.188 | 2.19 |
| 14 | 0.41 | 0.739 | 0.217 | 3.76 |
| 15 | 0.42 | 0.737 | 0.238 | 3.69 |
| 16 | 0.42 | 0.737 | 0.258 | 3.07 |
| 17 | 0.41 | 0.738 | 0.279 | 2.92 |
| 18 | 0.63 | 0.598 | 0.188 | 2.54 |
| 19 | 0.62 | 0.605 | 0.219 | 3.79 |
| 20 | 0.62 | 0.602 | 0.238 | 3.73 |
| 22 | 0.63 | 0.599 | 0.258 | 3.51 |
| 23 | 0.62 | 0.602 | 0.279 | 2.21 |
| 25 | 0.84 | 0.519 | 0.188 | 7.40 |
| 26 | 0.85 | 0.516 | 0.219 | 9.56 |
| 27 | 0.85 | 0.515 | 0.238 | 10.49 |
| 28 | 0.84 | 0.518 | 0.258 | 9.20 |
| 29 | 0.84 | 0.518 | 0.278 | 8.10 |
| 212 | 1.08 | 0.458 | 0.188 | 8.43 |
| 111 | 1.08 | 0.457 | 0.188 | 8.05 |
| 35 | 1.11 | 0.451 | 0.219 | 9.14 |
| 215 | 1.06 | 0.461 | 0.238 | 12.46 |
| 32 | 1.10 | 0.452 | 0.238 | 9.34 |
| 33 | 1.10 | 0.453 | 0.259 | 10.26 |
| 214 | 1.07 | 0.460 | 0.278 | 16.30 |
| 34 | 1.09 | 0.455 | 0.279 | 13.02 |
| 36 | 1.32 | 0.413 | 0.188 | 4.61 |
| 37 | 1.33 | 0.413 | 0.218 | 5.15 |
| 38 | 1.34 | 0.411 | 0.238 | 5.54 |
| 39 | 1.35 | 0.409 | 0.258 | 6.01 |
| 40 | 1.33 | 0.412 | 0.279 | 7.86 |

AUSWERTUNG DER MODELLVERSUCHE 'HAPAG-OSTASIEN-CONTAINER-SCHIFF'

=====

ERMITTLUNG DER UEBERTRAGUNGSFKT. DER WIDERSTANDSERHOEHUNG IM SEEGANG
 DURCH MESSUNG DES ZUSAETZLICHEN WIDERSTANDES IM MODELLVERSUCH

| VERSUCH NR | LA/L | DM (1/S) | FN | YRW |
|------------|------|----------|-------|------|
| 42 | 1.61 | 0.374 | 0.188 | 1.76 |
| 43 | 1.61 | 0.374 | 0.219 | 2.29 |
| 44 | 1.61 | 0.374 | 0.238 | 2.53 |
| 112 | 1.62 | 0.374 | 0.258 | 3.04 |
| 46 | 1.62 | 0.374 | 0.279 | 3.58 |
| 106 | 1.99 | 0.336 | 0.189 | 0.73 |
| 107 | 2.01 | 0.335 | 0.219 | 1.13 |
| 108 | 1.98 | 0.338 | 0.238 | 1.27 |
| 109 | 1.97 | 0.338 | 0.258 | 1.55 |
| 110 | 1.98 | 0.338 | 0.279 | 2.51 |

AUSWERTUNG DER MODELLVERSUCHE 'HAPAG-OSTASIEN-CONTAINER-SCHIFF'

ERMITTLUNG DER UEBERTRAGUNGSFKT. DER WIDERSTANDSERHOEHUNG IM SEEANG
 DURCH MESSUNG DER TAUCH- UND STAMPFBEWEGUNGEN IM MODELLVERSUCH
 UND FOTOGRAFISCHE ERFASSUNG DER RELATIVBEWEGUNGEN

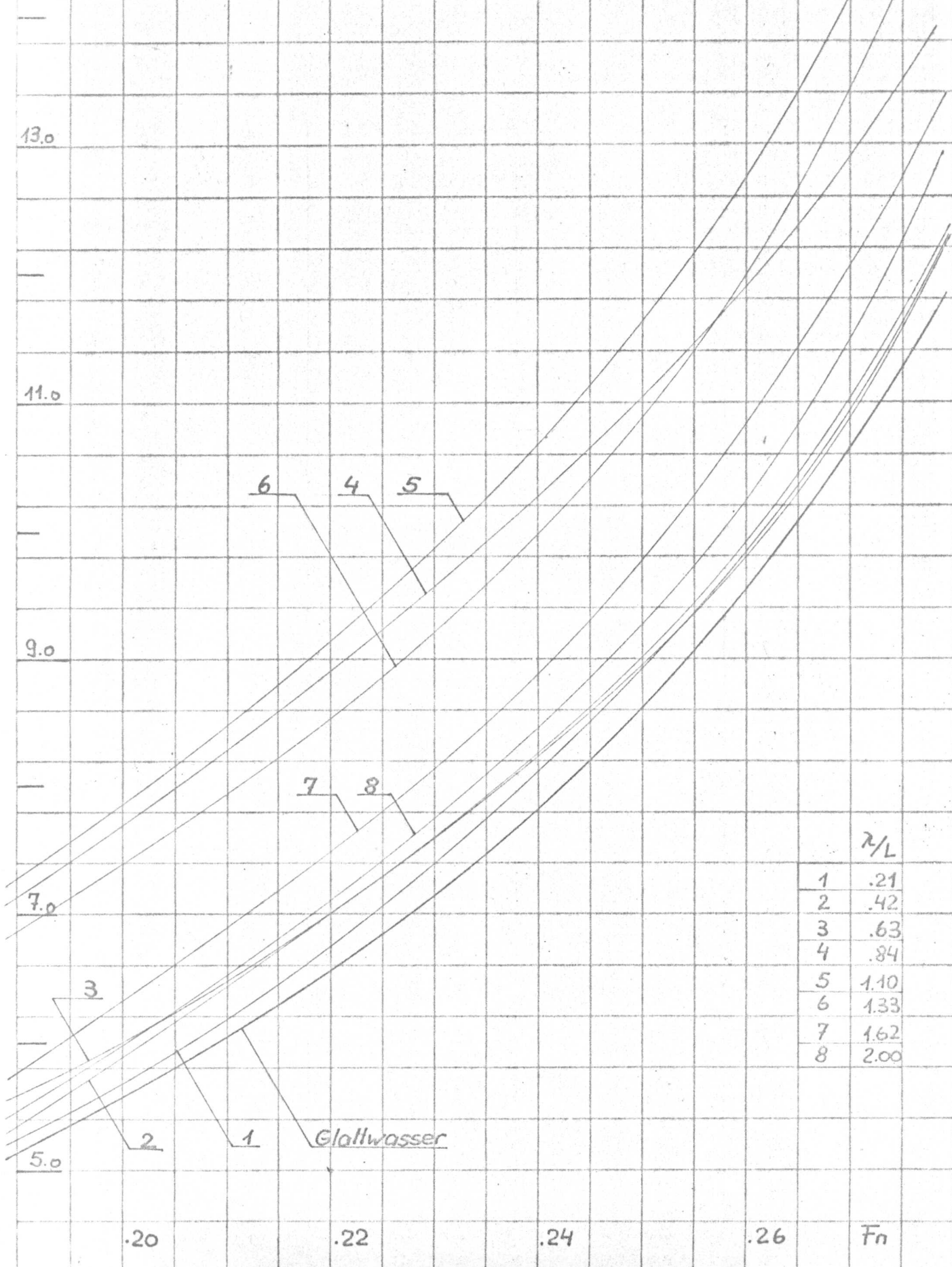
(UNTERE EINHUELLENDE - GLATTWASSERWELLENKONTUR)

| VERSUCH NR | LA/L | OM (1/S) | FN | YPXS | YPXSS | YPW |
|------------|------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 29 | 0.84 | 0.519 | 0.278 | -1.99 | 14.64 | 12.65 |
| 214 | 1.07 | 0.459 | 0.278 | -4.50 | 21.64 | 17.14 |
| 34 | 1.09 | 0.455 | 0.279 | -4.12 | 21.28 | 17.16 |
| 40 | 1.33 | 0.412 | 0.279 | -2.34 | 11.60 | 9.26 |
| 46 | 1.62 | 0.374 | 0.279 | -1.01 | 5.91 | 4.90 |
| 110 | 1.98 | 0.338 | 0.279 | -0.84 | 4.96 | 4.12 |

Bild 1

R_T
[kp]

Ergebnisse der Widerstandsversuche
in Glattwasser und in regelmäßigen
von vorn kommenden Wellen.



| | λ/L |
|---|-------------|
| 1 | .21 |
| 2 | .42 |
| 3 | .63 |
| 4 | .84 |
| 5 | 1.10 |
| 6 | 1.33 |
| 7 | 1.62 |
| 8 | 2.00 |

Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung
in regelmäßigen, von vorn kommenden Wellen
bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Bild 2

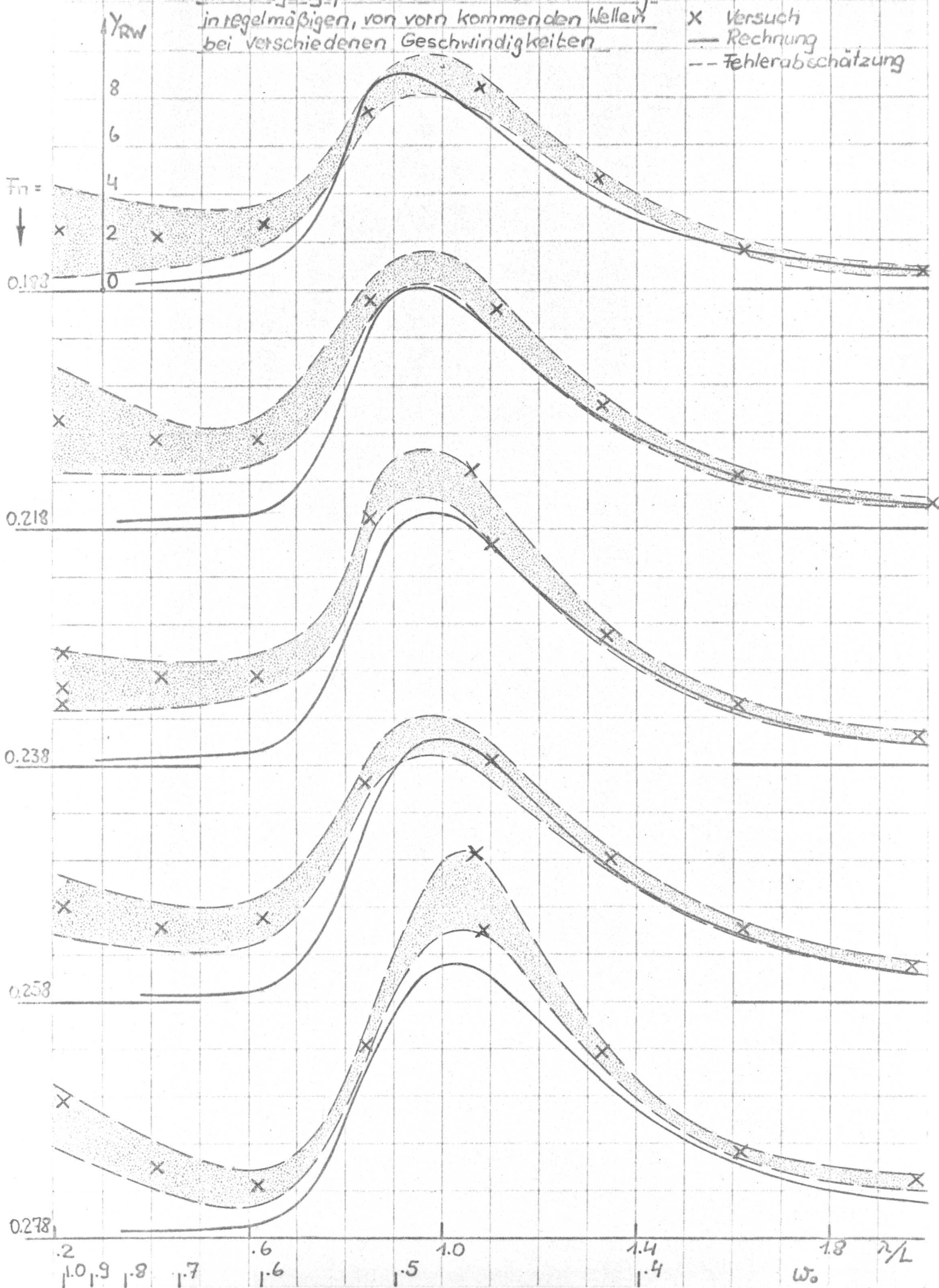


Bild 3

Flusschnitt aus einem
U-V-Schrieb einer
Versuchsfahrt

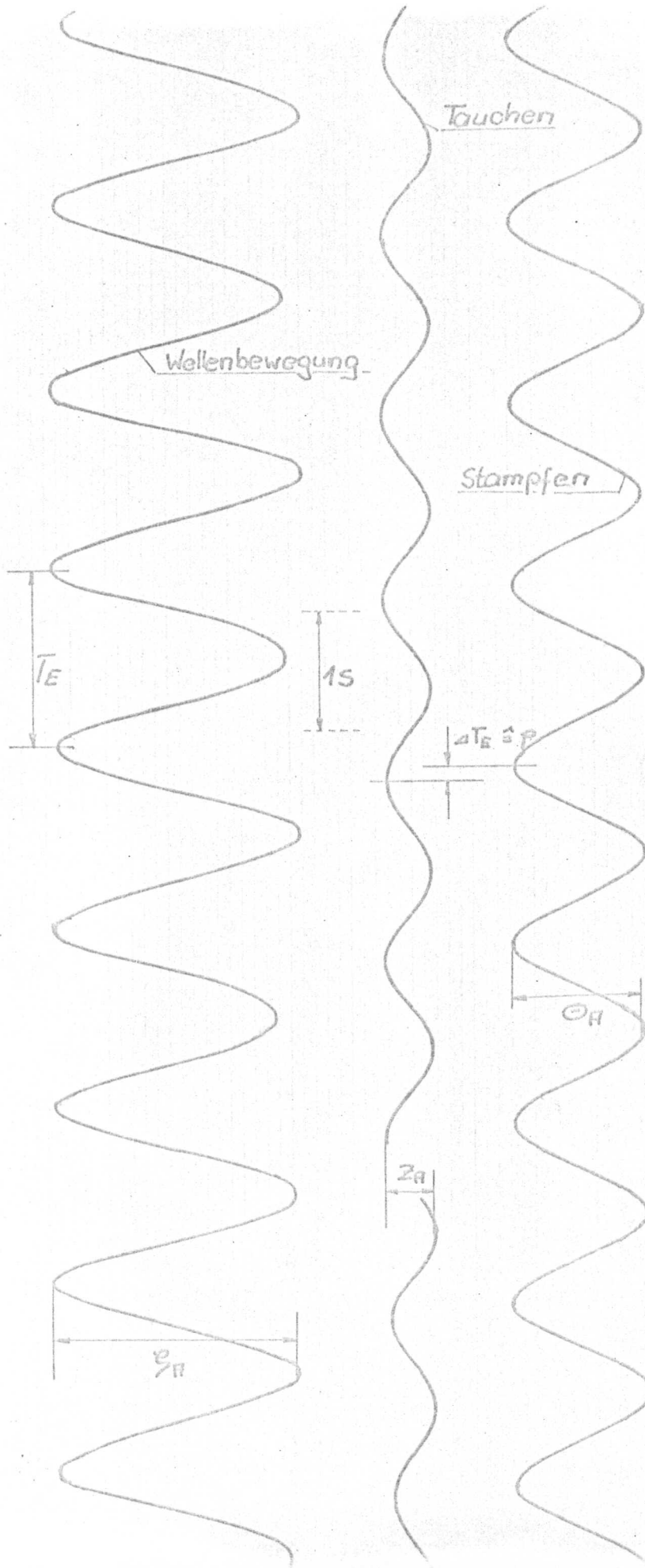
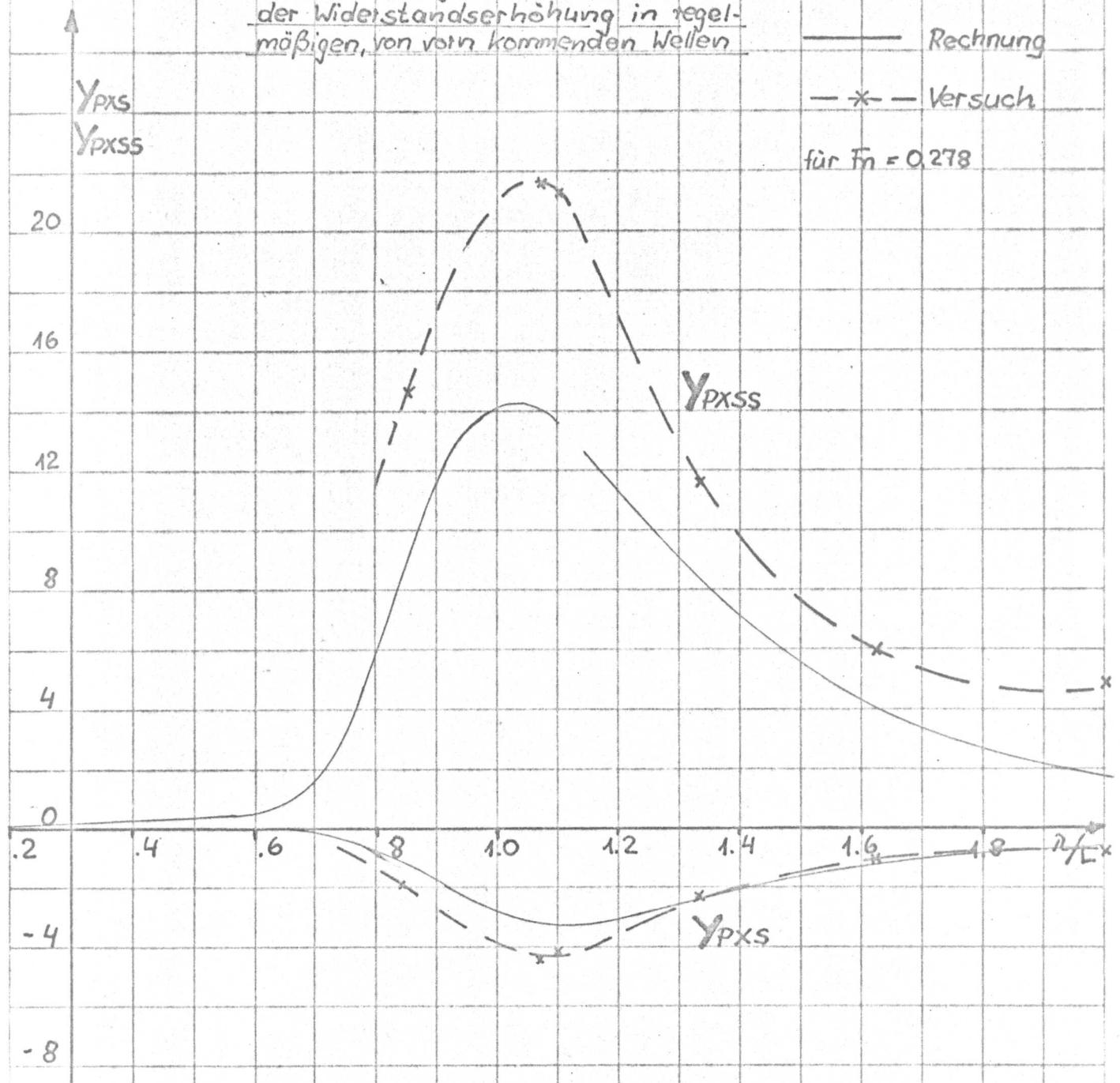


Bild 4

Übertragungsfunktion der Anteile
Vertikalbewegung (Y_{pxs})
Relativbewegung (Y_{pxss})
der Widerstandserhöhung in regel-
mäßigen, von vorn kommenden Wellen

— Rechnung
- * - Versuch
für $F_n = 0.278$



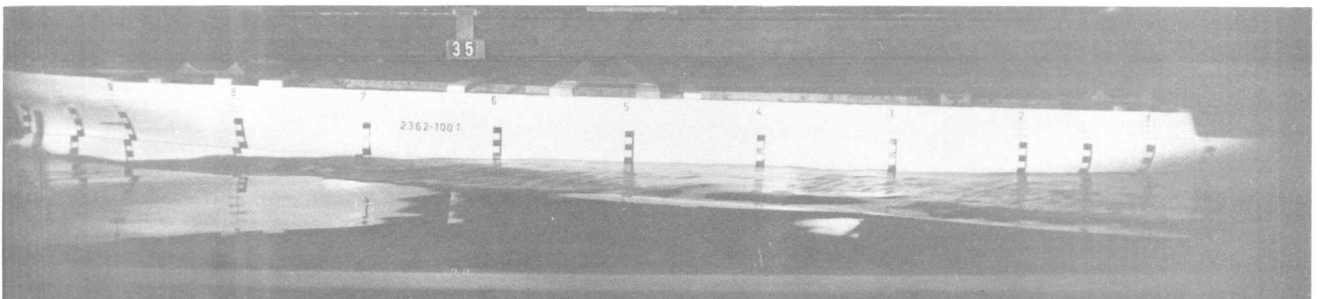
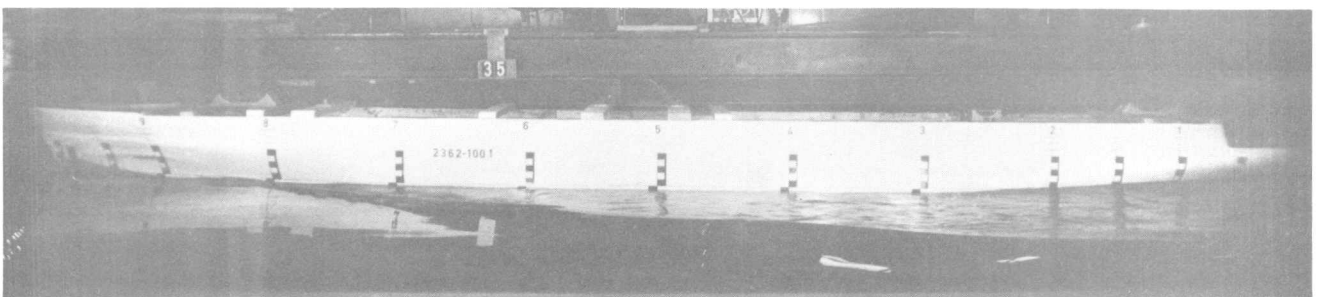
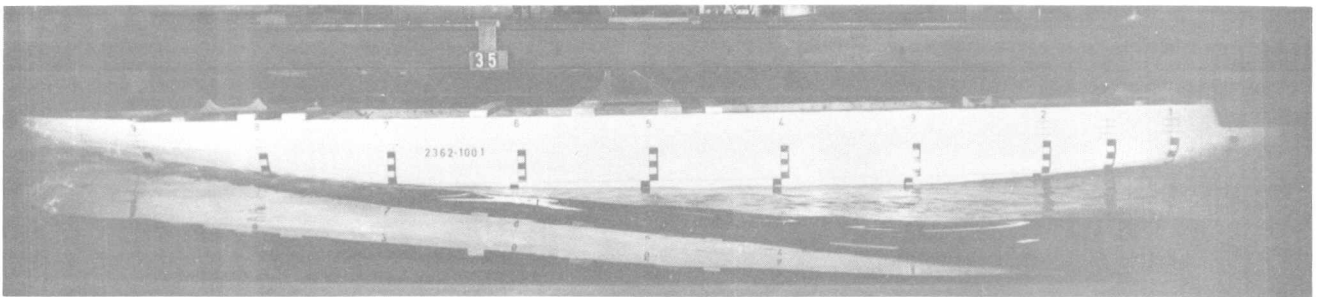
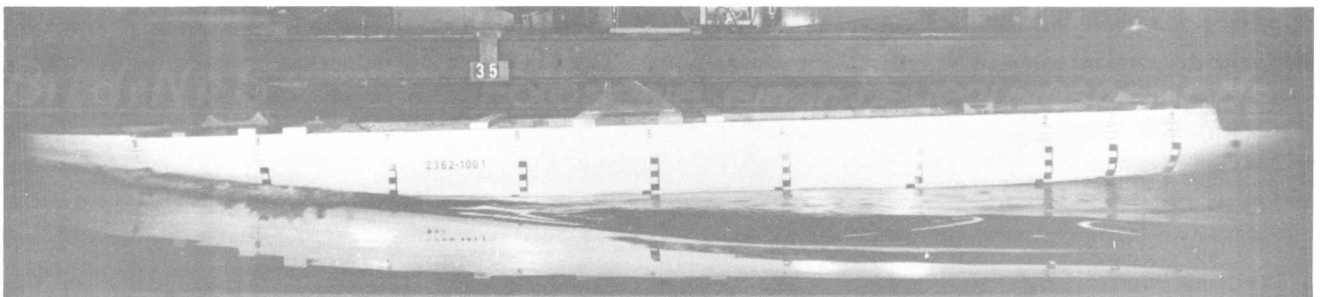
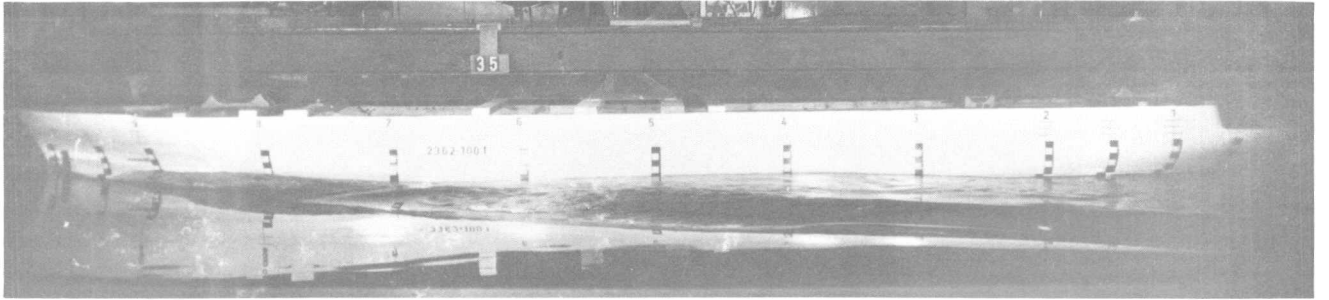
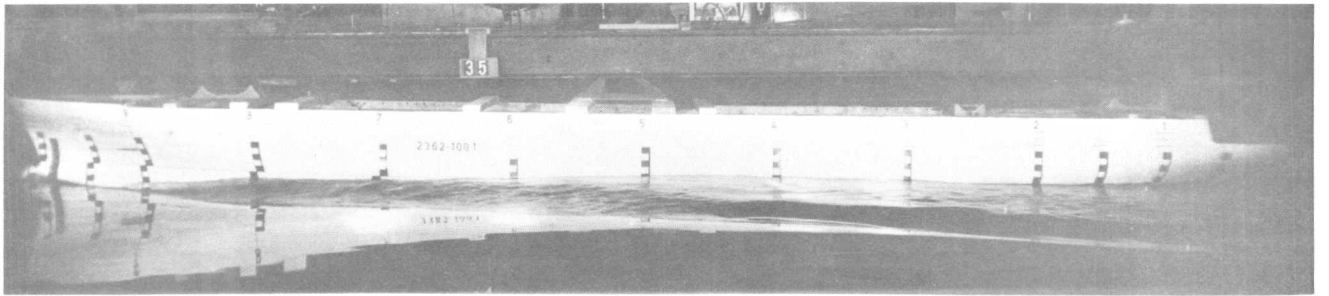


Bild Nr. 5

Fotoserie einer Bewegungsperiode

$F_n = 0.219$ $\lambda/L = 1.1$ $g_H = 10.0 \text{ cm}$

Auswertungsgrafik zur Bestimmung
der Relativbewegung zwischen Schiff
und Wasseroberfläche (siehe auch Bild 5)

Bild 6

$Fr = 0.219$
 $\lambda/L = 1.1$
 $\varphi_R = 10.0 \text{ cm}$

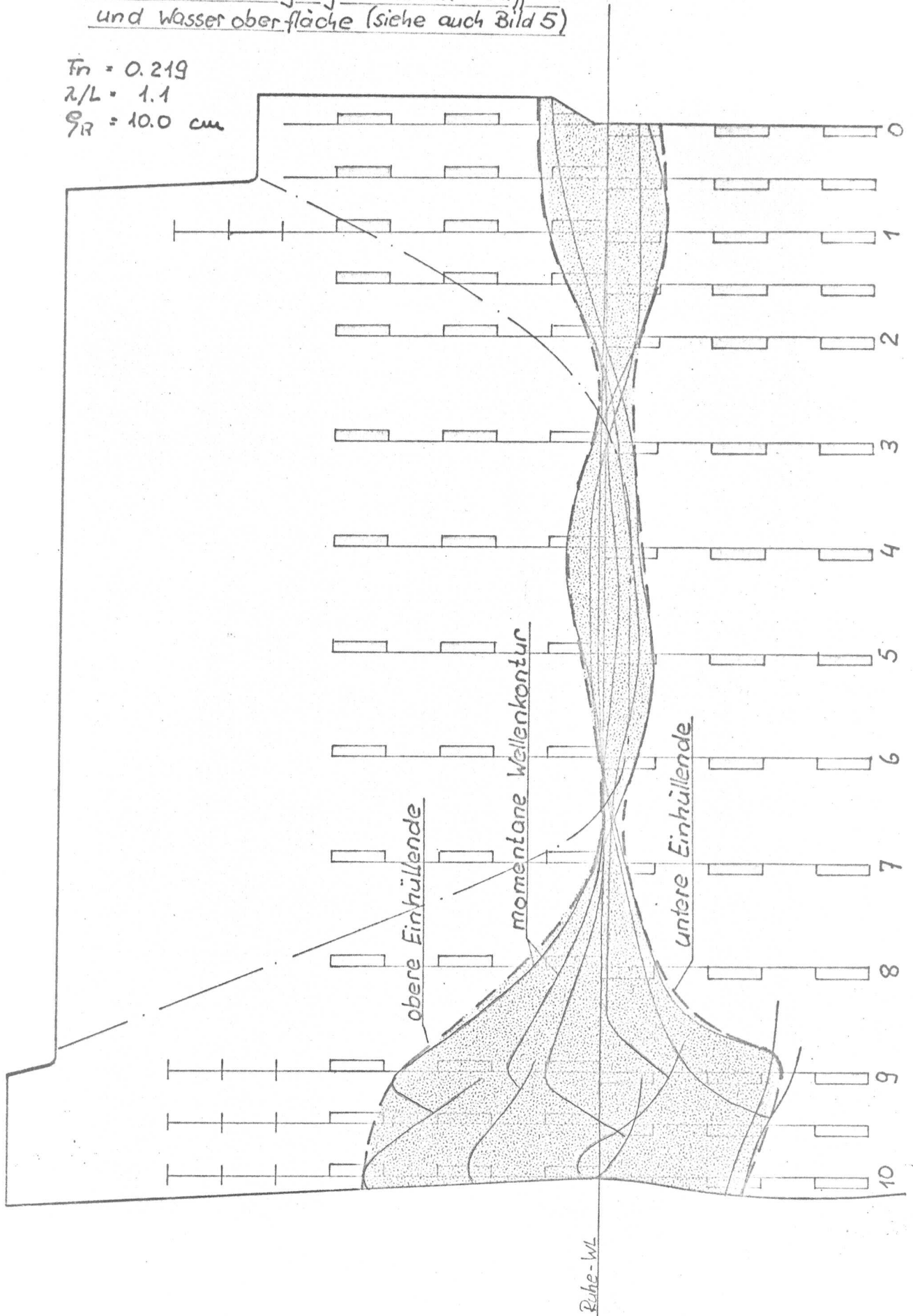
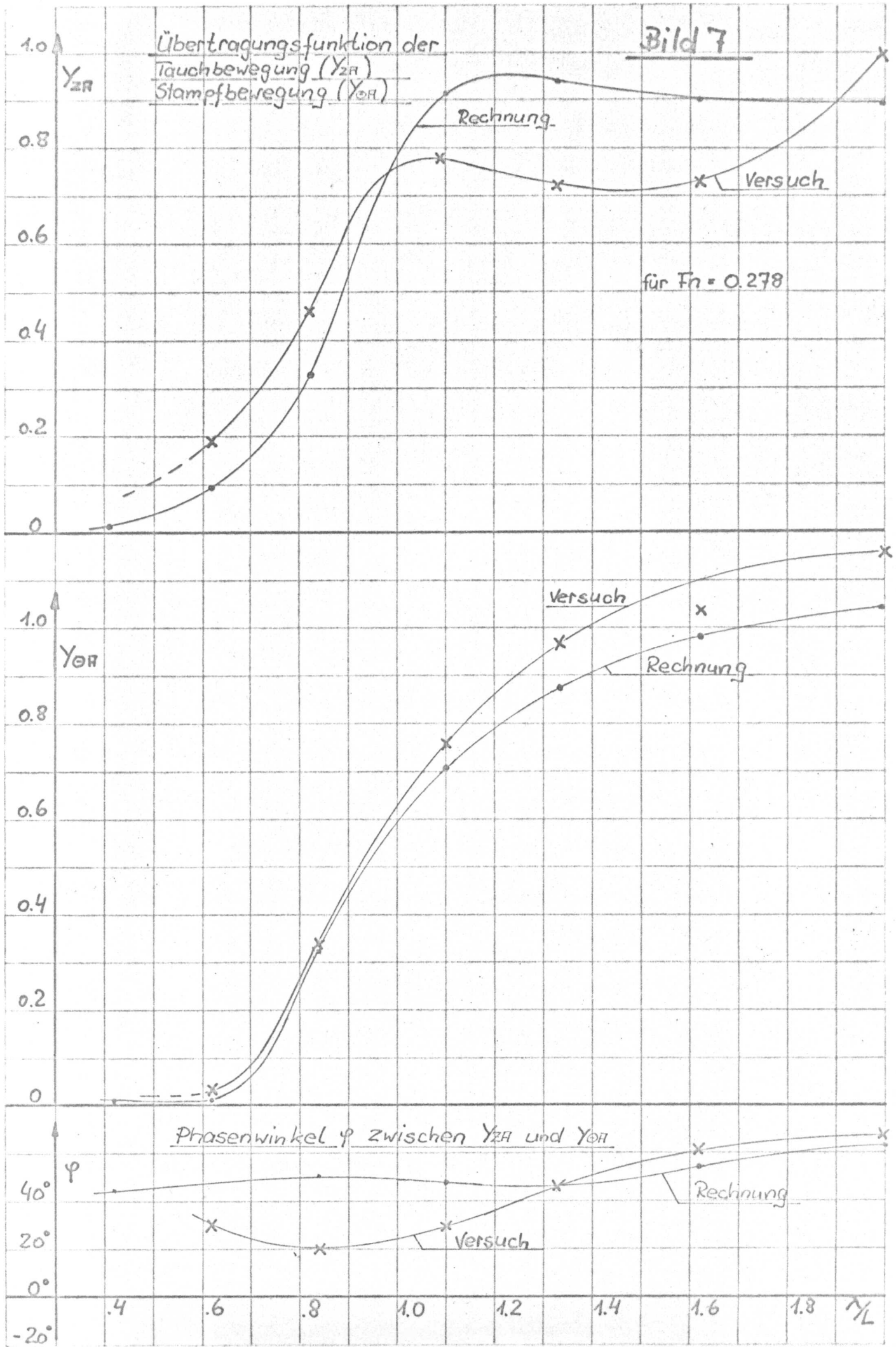


Bild 7



Verlauf der Übertragungsfunktion der
Relativbewegung über der Schiffslänge

Bild 8

$F_n = 0.278$

$\lambda/L = 1.3$

$\rho_R = 11.8 \text{ cm.}$

