

259 | März 1970

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

P. Boese

# Modellversuche zur Steuerfähigkeit eines Schiffes im achterlichen Seegang

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 259

Modellversuche zur Steuerfähigkeit eines Schiffes  
im achterlichen Seegang

von

P. Boese

Hamburg, März 1970

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 259

Modellversuche zur Steuerfähigkeit eines Schiffes  
im achterlichen Seegang

Bericht zum Forschungsvorhaben T 01-856-I-205  
'Sicherheit des Schiffes im Seegang, Steuern im achterlichen Seegang'

Auftraggeber: Bundesminister der Verteidigung

Bearbeiter:  
Dr.-Ing. P. Boese

Leiter der Forschungsaufgabe:  
Prof. Dr.-Ing. O. Grim

Hamburg, März 1970

## Gliederung

### Einführung

#### 1.-----Modellbeschreibung

#### 2.-----Theorie der Längsbewegung

#### 3.-----Versuchsbeschreibung

3.1. Widerstands- und Über- bzw. Unterlastversuch im glatten Wasser

3.2. Ausschwingversuch

3.3. Messung der Längskraft in regelmäßigen Wellen

3.4. Freifahrtversuch im regelmäßigen achterlichen Seegang

#### 4.-----Versuchsergebnisse und Vergleich mit der Theorie

4.1. Dämpfung der Längsbewegung aus Überlast- und Ausschwingversuch

4.2. Längskraft der Wellen

4.3. Längs- und Gierbewegung in regelmäßigen Wellen

### Schlußfolgerungen

### Literatur

## Einführung

Bekanntlich werden an die Steuerfähigkeit eines Schiffes im Seegang die höchsten Ansprüche gestellt, wenn die Wellen von achtern kommen. Aus einer Reihe von Untersuchungen dieses Problems [ 1, 2, 3, 4, 5 ] hat sich mittlerweile herausgeschält, daß es vor allem zwei Einflüsse sind, die die Kursstabilität eines Schiffes im Seegang beeinträchtigen. Diese sind:

- a) Die Abhängigkeit der Seegangskräfte (Giermoment und Querkraft) von der Richtung des Schiffes zu den Wellen und
- b) die Längsbewegung des Schiffes.

In der letztgenannten Arbeit [ 5 ] war durch theoretische Rechnungen der Beweis erbracht worden, daß sich der Effekt a) allerdings erst dann ungünstig auf die Steuerfähigkeit eines Schiffes auswirken kann, wenn die Längsbewegung ein extremes Ausmaß erreicht. In diesem Fall haben die querdrehenden Kräfte ausreichend Zeit, sich auf das Schiff auszuwirken.

Ein in Seegangsrichtung fahrendes Schiff kann, wenn der Propellerschub und die Wellensteilheit ausreicht, von den Wellen derart geschoben werden, daß es mit ihnen mitläuft. Es fährt dann mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit als beim gleichen Propellerschub im glatten Wasser. Dabei hängt es von der Dauer dieses Zustandes und von der Steuerfähigkeit des Schiffes ab, ob es auf Kurs gehalten werden kann oder ob es querschlägt. Obwohl im unregelmäßigen Seegang eine Wellenformation ausreichender Steilheit immer nur für begrenzte Zeit existiert, kann die Zeitspanne groß genug sein, sodaß das Schiff unzulässig große Kursabweichungen erreicht.

Man erkennt hieraus die Bedeutung der Längsbewegung für die Steuerfähigkeit im achterlichen Seegang.

## 1. Modellbeschreibung

Um den Aufwand dieser Untersuchung zu beschränken, wurde ein am IfS vorhandenes Modell mit umfangreichen Einrichtungen zur Untersuchung der Rollstabilität im Seegang [ 6 ] benutzt. Zwar handelt es sich um ein Series-60 Modell größerer Völligkeit ( $c_B = 0.70$ ), das nicht typisch für die schnelleren schlanken Schiffstypen ist, die einer Gefährdung im Hinblick auf das Steuern im Seegang ausgesetzt sind. Aber es kann angenommen werden, daß die hiermit gewonnenen Erkenntnisse - insbesondere bei der Überprüfung des mathematischen Modells - auch auf andere Schiffstypen übertragbar sind. Was außerdem für die Wahl dieses Modells spricht ist, daß es sich um ein sog. Standard-Modell der Versuchsanstalten handelt, mit dem u.a. bereits Versuche im Hinblick auf die Steuerfähigkeit unternommen wurden [ 7 ] .

Die wichtigsten Daten des Modells sind:

$$L_{pp} = 2.80 \text{ m}$$

$$B = 0.40 \text{ m}$$

$$(T = 0.16 \text{ m})$$

$$(D = 125 \text{ kp})$$

Um die Ergebnisse nach [ 7 ] benutzen zu können, wurden die Versuche mit folgenden Werten gefahren:

$$T = 0.149 \text{ m}$$

$$D = 117 \text{ kp}$$

$$c_B = 0.70$$

$$B/T = 2.5 \quad (\text{Series-60-Form Nr. 4212 W})$$

$$L/B = 7$$

$$i = 0.255$$

Propeller:  $D = 100 \text{ mm}$        $H/D = 0.9$        $A_D/A_O = 0.35$        $z = 3$   
(Typ Wageningen 3.35, IfS Nr. 4.02)

Ruder : 120 x 59 mm

## Antrieb

Als Stromquelle für das Modell dient ein Satz Akku-Zellen mit 32 V. Diese Stromversorgung reicht aus, um das Modell mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1.93 m/s zu betreiben.

Im einzelnen sind folgende Fahrtstufen vorgesehen:

Fahrtstufe	v [m/s]	F <sub>N</sub>
I	0,96	0,183
II	1,33	0,253
III	1,42	0,271
IV	1,57	0,299
V	1,93	0,368

(Manövrier-Stufe)

Die jeweilige Drehzahl wird über einen Regler konstant gehalten. Nur bei großen Belastungsänderungen (Austauschen des Propellers im See-gang) war eine geringe Drehzahländerung festzustellen. Über Funk können folgende Funktionen ausgelöst werden:

Manövrierstufe (I) ein  
von Manövrierstufe auf vorgewählte Fahrtstufe (I→V)  
Antrieb aus

### Ruderanlage und Kursregelung

Das Modell ist mit einer Kursregelanlage ausgerüstet, die es auf einem vorgegebenen Kurs hält. Hierzu sind ein Potentiometer am Kurskreisel und ein Potentiometer an der Rudermaschine über eine Brückenschaltung miteinander verbunden. Die Schleiferspannung steuert über einen Verstärker die Rudermaschine. Da es hierbei weniger darauf ankam, eine wirkliche Kursregelanlage nachzubilden, als eine mathematisch einfach definierbare Regelung zu simulieren, wurden sowohl die 'Trägheit' als auch die 'Lose' der Regelung möglichst niedrig gehalten.

Die Regelung hat also mit guter Genauigkeit P-Verhalten, wobei der Proportionalitätsfaktor zwischen Kursabweichung und Ruderwinkel zwischen den Werten  $\gamma = 0.25$  bis 2 in Stufen wählbar ist.

Zum Manövrieren kann über Funk das Potentiometer im Kurskreisel in 3<sup>o</sup>-Schritten verstellt werden, sodaß der Kursregelung ein beliebiger Kurs vorgegeben werden kann.

Um vor Beginn einer Meßfahrt dem Modell den gewünschten Kurs vorzugeben (z.B. parallel zur Tankwand) muß das Modell in die gewünschte Richtung gebracht, und über einen Stellmotor das Kreiselpotentiometer

mit seiner Nullstellung in Schiffslängsrichtung ausgerichtet werden. Die Funktion der Kursregelung wurde statisch und dynamisch (bifilare Aufhängung) getestet.

#### Aufnahme und Registrierung der Bewegungen

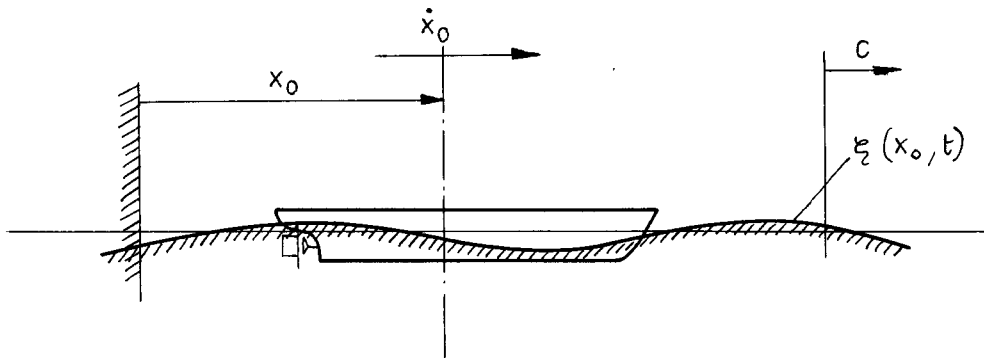
Von den Bewegungen interessiert vor allem die Gierbewegung. Als Aufnehmer wurde am Kreisel ein zusätzliches Meßpotentiometer angebracht. Hiermit kann die jeweilige Kursabweichung vom Sollkurs aufgenommen werden. Auf die gleiche Weise wird der Ruderwinkel zur Kontrolle der Steuerung aufgenommen. An einem Horizontalkreisel können der Stampf- und der Rollwinkel aufgenommen werden.

Die Bewegungen werden an Bord des Modells mit einem Lichtstrahloszillographen registriert, der über Funk in Betrieb gesetzt werden kann. Zur Synchronisierung der Schriebe an Bord mit denen an Land kann über Funk eine Zeitmarke auf den Schrieb im Modell gegeben werden.

## 2. Theorie der Längsbewegung

Eine eingehende Abhandlung zu diesem Thema findet sich in [ 5 ] . Daher soll hier auf das Problem nur in soweit eingegangen werden, wie für das Verständnis der Aufgabenstellung und Schlußfolgerungen nötig ist.

Die Längsbewegung des Schiffes wird durch die ortsfeste Koordinate  $x_0$  beschrieben:



Auf das Schiff wirken folgende Kräfte in Längsrichtung:

Widerstand	$R(\dot{x}_0)$
(Netto-)Propellerschub	$T(\dot{x}_0)$ ( $n = \text{const}$ )
Längskraft des Seegangs	$X(x_0, t)$
Massenreaktion	$m_{xx}\ddot{x}_0$

$m_{xx}$  ist die Schiffsmasse einschließlich der hydrodynamischen Masse. Das Gleichgewicht der Kräfte lautet:

$$m_{xx}\ddot{x}_0 + R(\dot{x}_0) - T(\dot{x}_0) = X(x_0, t)$$

Für das stationär im glatten Wasser fahrende Schiff ist  $\dot{x}_0 = v = v_{GW}$ . Widerstand und Schub stehen im Gleichgewicht:

$$R(v_{GW}) = T(v_{GW})$$

Werden Widerstandsverlauf und Schubverlauf durch die Tangenten im Punkt  $\dot{x}_0 = v$  angenähert, so kann folgender Ansatz gemacht werden:

$$m_{xx}\ddot{x}_0 + \left[ \left( \frac{\partial R(\dot{x}_0)}{\partial \dot{x}_0} \right)_{\dot{x}_0=v} - \left( \frac{\partial T(\dot{x}_0)}{\partial \dot{x}_0} \right)_{\dot{x}_0=v} \right] \dot{x}_0 = X(x_0, t)$$

Der Koeffizient von  $\dot{x}_0$  ist der Dämpfungskoeffizient  $N$  [kps/m]

Die Längskraft des Seeganges wird als harmonische Funktion des Ortes und der Zeit angesetzt:

$$X(x_0, t) = X_A \cos\left(\frac{\omega^2}{g} x_0 - \omega t + \varepsilon_x\right)$$

Die Amplitude der Längskraft wird oft in dimensionsloser Form angegeben:

$$f_{XX} = \frac{X_A}{2\pi \xi_A / \lambda D}$$

$\xi_A$  ist die Wellenamplitude

$f_{XX}$  ist in erster Linie eine Funktion von  $\lambda/L$

Die Gleichung der Längsbewegung lautet somit:

$$m_{XX} \ddot{x}_0 + N \dot{x}_0 = X_A \cos\left(\frac{\omega^2}{g} x_0 - \omega t + \varepsilon_x\right)$$

### Periodische Lösung

Solange die Längsbewegung klein ist, kann  $x_0$  im Argument der cos-Funktion vernachlässigt werden. Die Lösung lautet dann [9] :

$$\dot{x}_0(t) = \frac{X_A / m_{XX}}{\sqrt{\omega_e^2 + (N/m_{XX})^2}} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\dot{x}_0}) \quad ; \quad \omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} v$$

Eine eingehendere Betrachtung würde ergeben, daß sich bei Berücksichtigung des Gliedes  $x_0$  auf der rechten Seite, eine mittlere Geschwindigkeitserhöhung  $v > v_{GW}$  berechnen läßt. Die periodische Lösung bedeutet, daß das Schiff ständig von den Wellen überholt wird.

Unter extremen Bedingungen kann das Geschwindigkeitsmaximum in den Bereich der Wellengeschwindigkeit  $c$  geraten und die zweite Lösung stellt sich ein:

### Stationäre Lösung

Für  $\dot{x}_0 = c$  wird die rechte Seite zeitlich unabhängig

$$Nc = X_A \cos \varepsilon_x \quad *)$$

das Schiff läuft stationär mit den Wellen in einer stabilen Gleichgewichtslage mit.

---

\*) N muß jetzt besser aus dem Tangentenanstieg im Punkte  $\dot{x}_0 = c$  bestimmt werden.

Für Kursstabilität ist insbesondere die Übergangsphase von der periodischen zur stationären Bewegung kritisch. Eine Berechnung dieses Bewegungsablaufes ist nur durch numerische Integration der Bewegungsgleichung möglich [ 9 ] .

Um die Zuverlässigkeit der hier beschriebenen Ansätze zu prüfen ist es nötig, zunächst die Koeffizienten der Bewegungsgleichung (d.h., den Dämpfungsfaktor  $N$  und die Längskraftamplitude  $X_A$ ) experimentell zu bestimmen, und mit diesen Werten anschließend die Bewegung zu berechnen. Ein Vergleich der berechneten mit der gemessenen Bewegung ermöglicht eine Beurteilung der Brauchbarkeit des hier beschriebenen mathematischen Modells.

Die Kraftmessungen müssen am gefesselten und die Bewegungsmessungen möglichst am freifahrenden Modell vorgenommen werden.

### 3. Versuchsbeschreibung

#### 3.1. Widerstands- und Über- bzw. Unterlastversuch im glatten Wasser

Die Berechnung der Längsbewegung geht davon aus, daß die auf das im Seegang oszillierende Schiff wirkenden Kräfte quasistationär, d.h. wie für das mit konstanter Geschwindigkeit im glatten Wasser fahrende Schiff ermittelt werden können. Um die Ausgangsdaten für diese Rechnung zu gewinnen, wurde zunächst ein Widerstands- und anschließend ein Über- bzw. Unterlastversuch am angetriebenen Modell vorgenommen. Den Versuchsaufbau mit der üblichen Meßeinrichtung Pendeldraht und Vorgewicht zeigt Abb.1.

Beim Über- und Unterlastversuch wurde mit verschiedenen Geschwindigkeiten gefahren, die im Bereich der zu der jeweiligen Fahrtstufe gehörenden Freifahrtgeschwindigkeit lagen. Je nachdem, ob die Wagen- geschwindigkeit unter oder über der Freifahrtgeschwindigkeit lag, war eine zusätzliche negative oder positive Zugkraft nötig, die von Gewichten am Zugdraht aufgebracht wurden.

Die zusätzliche Zugkraft enthält sowohl die Widerstandsänderung als auch die Schubänderung des Propellers mit der Geschwindigkeit. Hieraus kann die Dämpfung der Längsschwingung abgeschätzt werden.

#### 3.2. Ausschwingversuch

Um die nach dieser stationären Methode gewonnene Dämpfung mit der wirklichen am oszillierenden Schiff wirkenden Dämpfung zu vergleichen, wurde ein Ausschwingversuch unternommen.

Hierzu mußte das Modell zu einem - bezogen auf den Wagen - schwingungsfähigen System gemacht werden. Die dazu notwendige Rückstellkraft bekannter Größe wurde von einem Pendeldraht (12kg Pendelgewicht) erzeugt. Die Schwingungsperiode wurde in etwa so abgestimmt, wie sie bei den späteren Seegangsversuchen erwartet wurde. Der Wagen wurde mit der zu der jeweiligen Fahrtstufe gehörenden Freifahrtgeschwindigkeit gefahren, sodaß etwa Gleichgewicht zwischen Propellerschub und Widerstand herrschte.

Nach einer Anfangsauslenkung konnte das Modell während der Meßfahrt ausschlagen. Der Weg des Modells bezogen auf den Wagen wurde mit Hilfe eines Meßpotentiometers aufgenommen und registriert (Abb.2). Das Dämpfungsmaß ergab sich über das logarithmische Dekrement aus der Registrierung.

Aus der gleichen Messung konnte die mitschwingende Wassermasse bestimmt werden, nachdem alle übrigen Trägheiten, wie die der Ellenbogenführung und der Seilscheiben berücksichtigt worden waren. Wegen des großen Dämpfungsmaßes bei den höheren Geschwindigkeiten, mußte bei der Auswertung darauf geachtet werden, daß die Schwingungsperiode spürbar von der Periode der ungedämpften Schwingung abweicht.

### 3.3. Messung der Längskraft in regelmäßigen Wellen

Zur Messung der Längskraft der Wellen mußte das Modell fest an den Wagen gefesselt werden, damit es seine Phasenlage bezüglich der Wellen nicht ändert. Hierzu war es nötig, ein Meßglied mit geringem Meßweg, z.B. eine Ringfedermeßwaage, zu benutzen. Um die Wagenerschütterungen von der Meßwaage fernzuhalten, wurde ein Dämpfungstopf und eine Schraubenfeder zwischengeschaltet (s. Abb.3).

Anders als bei früheren Versuchen von Grim [ 2 ] wurden hier die auf das Modell wirkenden Kräfte in den verschiedenen Lagen zur Wellenkontur gemessen, indem der Wagen etwas langsamer als mit Wellengeschwindigkeit fuhr. Auf diese Weise wurde das Modell entlang der Meßstrecke von einigen Wellen überholt, sodaß für eine Auswertung genügend Werte entlang der Wellenkontur zur Verfügung standen. Da die Begegnungsfrequenz zwischen Modell und Wellen auf diese Weise sehr klein war, konnte mit guter Genauigkeit angenommen werden, daß das Modell die gleiche Lage zur Welle wie beim stationären Mitlaufen mit den Wellen einnahm.

Da sich bei den Freifahrtversuchen im Seegang herausstellte, daß die schiebende Wirkung der Wellen geringer als erwartet war, wurde später der Versuch zur Messung der Längskraft am angetriebenen Modell wiederholt. Hierbei sollte kontrolliert werden, ob durch das zeitweise Austauschen des Propellers ein nennenswerter Anteil des Propellerschubes verloren geht.

### 3.4. Freifahrtversuch im regelmäßigen achterlichen Seegang

Da die Bewegungen des Modells nicht durch irgendeine Versorgungs- oder Registriereinrichtung beeinflusst werden sollten, war es erforderlich, den Weg des Modells optisch aufzunehmen. Wegen der Bedeutung der Längsbewegung interessierte vor allem der Weg des Modells in Richtung der Tankachse, d.h. senkrecht zu den Wellenfronten.

Zu diesem Zweck wurde eine Kette von Lichtschranken entlang der Tankwand aufgebaut. Bei einem Abstand von 2.60 m konnte mit 21 Scheinwerfern und Aufnehmern eine Registrierstrecke von 52 m Länge im großen Tank der HSVA errichtet werden (s. Abb.4).

Um die Auflösung der Bahn des Modells zu verfeinern, wurden auf dem Modell nicht ein, sondern vier Kulissenbleche angebracht (s. Abb.5). Auf diese Weise ergaben sich bei jedem Durchgang des Modells an einer Lichtschranke vier Unterbrechungen, wobei ihr Abstand der Wegstrecke  $1/4 \cdot 2.60 = 0.65$  m entsprach.

Neben dem Weg des Modells wurde der Seegang mit Hilfe einer Ultraschallsonde, die am feststehenden Wagen montiert war, aufgenommen. Die Bewegungen des Modells, von denen besonders die Gierbewegung interessierte, wurden an Bord des Modells registriert.

Bei einer Versuchsserie fuhr das Modell immer genau in Tankrichtung. Damit es im Falle einer plötzlichen Kursabweichung genügend Raum nach beiden Seiten hatte, wurde die Fahrt in der Tankmitte durchgeführt. Die Fahrten schräg zu den Wellen wurden an einer Tankseite parallel zur Tankwand begonnen. Über Funk wurde dann der neue Sollkurs in Richtung der gegenüberliegenden Tankseite vorgegeben. Leider reichte für diesen Versuch die Tankbreite nicht aus, sodaß der Einschwingvorgang auf den neuen Kurs noch nicht abgeklungen war, bevor das Modell aus Sicherheitsgründen wieder in Tankrichtung manövriert werden mußte. Aus diesem Grunde konnte nicht die hier interessierende, nur durch den Seegang verursachte periodische Gierschwingung dem Modellschrieb entnommen werden.

Das größte Problem dieser Versuchsreihe war die Sicherung des Modells vor einer Kollision mit der Tankwand. Selbst ein parallel zur Tankwand gespanntes Seil bot kaum Schutz, sodaß es gänzlich vom Geschick der dort postierten Person abhing, ob das Modell abgefangen wurde.

#### 4. Versuchsergebnisse und Vergleich mit der Theorie

##### 4.1. Dämpfung der Längsbewegung aus Überlast- und Ausschwingversuch

Die Ergebnisse des Widerstandsversuchs zeigt Abb.7. Die Meßergebnisse stimmen gut mit der Vorausberechnung nach der Series-60-Modellsreihe [ 8 ] überein. Gleichzeitig ist in die Widerstandsauftragung der Schubverlauf über der Geschwindigkeit unter Voraussetzung konstanter Drehzahl für die einzelnen Fahrtstufen eingetragen. Dieser Schubverlauf ist aus dem Freifahrtprogramm des Modellpropellers Abb.6 berechnet worden. Dargestellt ist der Netto-Schub, d.h., der Propellerschub abzüglich Sogkraft. Sog- und Nachstromziffer für die einzelnen Geschwindigkeitsstufen wurden den Series-60-Versuchen [ 8 ] entnommen.

Die aus Widerstands- und Propellerfreifahrtversuch vorhergesagten Ergebnisse des Über- bzw. Unterlastversuchs sind entlang der Geschwindigkeitsachse in Abb.7 aufgetragen. Der auf diese Weise vorhergesagte Kraftverlauf über der Geschwindigkeit stimmt ebenfalls befriedigend mit den gemessenen Werten überein.

Wie in der Einführung zum Problem der Längsbewegung gezeigt wurde, kann aus dem Widerstands- und Schubverlauf über der Geschwindigkeit der Dämpfungskoeffizient ermittelt werden. Er entspricht der Steigung der Tangenten an dem Kurvenverlauf im Punkte der mittleren Geschwindigkeit. Um den quasistationär gewonnenen Dämpfungsfaktor mit der wirklichen Dämpfung zu vergleichen, sind in Abb.7 für die untersuchten Geschwindigkeitsstufen die Ergebnisse des Ausschwingversuchs eingetragen. Die Steigung der eingezeichneten Geraden entspricht dem Dämpfungskoeffizienten. Wegen der Unregelmäßigkeiten in der Wagen- geschwindigkeit (kleiner Tank der HSVA) ist das Ergebnis mit relativ großer Unsicherheit behaftet. Trotz der Streuung (schraffierter Bereich) kann man jedoch erkennen, daß die eingezeichneten Geraden etwa mit den Tangenten an den Kurvenverlauf übereinstimmen.

Abb.8 zeigt eine Auftragung des Dämpfungskoeffizienten über der Geschwindigkeit, wie er sich nach der quasistationären Methode (mit gerechneten oder gemessenen Werten) und nach dem Ausschwingversuch ergibt. Trotz der großen Streuung ist zu erkennen, daß die Dämpfungs-

werte in der gleichen Größenordnung liegen. Das Maximum im Bereich von  $F_N = 0.3$  ist auf den steilen Widerstandsanstieg zurückzuführen. Reicht die Amplitude der Längsschwingung über einen größeren Geschwindigkeitsbereich, so kann näherungsweise mit einer quasilinearen Dämpfung gerechnet werden, die höher als der zu der betreffenden mittleren Geschwindigkeit gehörende lineare Dämpfungswert liegt. Hieraus ist auch zu erklären, daß der im Ausschwingversuch ermittelte Dämpfungswert im Bereich  $F_N = 0.35$  über dem quasistationären Wert liegt. Die quasistationäre Methode stellt also ein brauchbares Verfahren zur Abschätzung der Dämpfung der Längsbewegung dar.

#### 4.2. Längskraft der Wellen

In Abb.9 sind die gemessenen dimensionslosen Amplitudenwerte der Längskraft (bezogen auf Wellenschräge  $2\bar{u} \zeta_A/\lambda$  und Verdrängung D) den Ergebnissen theoretischer Rechnungen gegenübergestellt.

Die gemessenen Werte liegen durchweg niedriger als die theoretisch ermittelten, und zwar sind die Abweichungen für kurze Wellen am größten. Da die nach der Froude-Kryloff-Hypothese berechneten Werte für ein Elementarschiff mit parabolischer Wasserlinie ( $c_B = 0.666$ ;  $c_X = 1$ ) gelten, wurde die gleiche Rechnung für ein Schiff mit der Form eines Series-60-Modells wiederholt. Gleichzeitig wurde eine Abschätzung des Smith-Effektes vorgenommen und zwar derart, daß statt der hydrostatischen Druckverteilung in der Welle die hydrodynamische Druckverteilung auf halbem Tiefgang benutzt wurde. Diese Verfeinerung der Methode brachte eine bessere Übereinstimmung mit den Messungen bei längeren aber kaum bei kürzeren Wellen, sodaß also anzunehmen ist, daß die hydrodynamischen Effekte stärkere Auswirkungen als angenommen haben.

Da bei den späteren Versuchen mit dem freifahrenden Modell festgestellt wurde, daß bei kürzeren Wellen der Propeller austauchte, und zwar dann, wenn sich das Modell an der vorderen schiebenden Wellenflanke befand, wurde die Längskraft nochmals am angetriebenen Modell gemessen. Die derart gemessene Längskraft enthält also zusätzlich den periodisch schwankenden Schubverlust im Seegang, der bei einer Berechnung der Längskraft berücksichtigt werden müßte.

Man erkennt aus den Ergebnissen, daß zumindest bei  $\lambda/L \approx 1$  ein spürbarer periodischer Schubverlust eintritt.

Demgegenüber war aus den Registrierungen nur ein kaum merkbarer Verlust an mittlerem Schub zu entnehmen.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, daß die Längskraft des Seeganges bei kürzeren Wellen ( $\lambda/L < 2$ ) z.T. erheblich geringer als nach der hydrodynamischen Theorie ist. Die in [5] mitgeteilten Ergebnisse, die basierend auf den hydrostatischen Werten der Längskraft gewonnen wurden, dürften also bezüglich der Längsbewegung in Wirklichkeit weniger effektiv sein. Gleichzeitig dürften sich die Wellenlängen mit den stärksten Effekten mehr zu den langen Wellen verlagern.

#### 4.3. Längs- und Gierbewegung in regelmäßigen Wellen

Da für die Registrierung der Längsbewegung des freifahrenden Modells nur eine Meßstrecke begrenzter Länge zur Verfügung stand, mußte versucht werden, den Anfahrvorgang des Modells in den vor der Meßstrecke liegenden Bereich zu legen. Auf diese Weise konnte innerhalb der Meßstrecke die reinperiodische Längsbewegung registriert werden.

In den Fällen, in denen das Modell von den Wellen mitgenommen wurde, interessierte auch der Anfahrvorgang, sodaß die Erhöhung der Fahrtstufe (z.B. von I auf IV oder V) in den Bereich der Meßstrecke gelegt werden mußte. Aus diesem Grunde reichte die Meßstrecke nicht aus, um den vollen Bewegungsablauf - einschließlich eines längeren Mitlaufens mit einer Welle - zu registrieren. Hinzu kam, daß das Modell in allen Fällen in denen es von einer Welle mitgenommen wurde, weder von der Kursregelung noch durch hartes Gegenruderlegen über Funk auf Kurs zu halten war. Die einzige Maßnahme zur Vermeidung einer Kollision mit der Tankwand war das Abstellen des Modellantriebs. Hierdurch blieb das Modell hinter der betreffenden Welle zurück und konnte bei anschließendem Wiederauffahren auf Kurs gebracht werden.

Wegen der begrenzten Tankbreite konnte also nicht der gesamte Ablauf des 'Mitgenommen - Werdens' und 'Querschlagens' registriert werden.

Aus den Beobachtungen scheint aber hervorzugehen, daß die Kursabweichung zunächst langsam und dann immer schneller vor sich geht.

Die momentane Geschwindigkeit des Modells wurde aus dem Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Unterbrechungen jeder Lichtschranke gewonnen. Aufgetragen über der jeweiligen Lichtschranke erhält man die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Weg (Abb.10 bis 14). Die Auftragung über der Zeit liefert die Zeitabhängigkeit der Geschwindigkeit, wie sie mit der theoretischen Rechnung verglichen werden soll (Abb.15 und 17 bis 19).

### Periodische Längsbewegung

Solange die Glattwassergeschwindigkeit klein genug ist (Fahrstufen I + IV) führt das Modell eine periodische Längsbewegung aus, d.h., es erreicht nicht die Wellengeschwindigkeit (Abb.10 bis 15). Leider ist nicht eindeutig zu erkennen, ob die mittlere Geschwindigkeit über der Glattwassergeschwindigkeit liegt. Die Werte liegen teils darüber und teils darunter. Nach theoretischen Untersuchungen [ 5 ] müßte sich eine etwas höhere Geschwindigkeit ergeben. Daß sich dies nicht eindeutig im Versuch nachweisen ließ, mag an einem mittleren Schubverlust durch das Austausch des Propellers liegen.

In Abb.15 ist zum Vergleich mit dem Experiment die theoretisch berechnete Längsbewegung mit experimentell gewonnenen Dämpfungs- und Längskraftbeiwerten eingetragen. Die berechnete Amplitude stimmt relativ gut mit der gemessenen überein. Demgegenüber zeigt die mittlere Geschwindigkeit und damit auch die (Begegnungs-)Periode eine größere Abweichung. Das kann, wie bereits erwähnt an einem mittleren Schubverlust liegen, der in der Rechnung nicht berücksichtigt wurde. Ein weiterer Grund kann aber auch in einer falschen Abschätzung der Dämpfung liegen. Die Rechnung für eine kleinere angenommene Dämpfung zeigt eine Verschiebung des Mittelwertes nach unten. Die mittlere Geschwindigkeitserhöhung ist also stark von der Dämpfung abhängig, da sie durch Phasenverschiebung zwischen Längskraft der Wellen und Längsbewegung verursacht wird.

Die dimensionslose, auf die Wellenschräge und Glattwassergeschwindigkeit bezogene Amplitude der Geschwindigkeitsschwankung über der

Wellenlänge zeigt Abb.16. Für einen Fall (Fahrtstufe IV) sind die gemessenen Werte den theoretisch berechneten gegenübergestellt. Die Übereinstimmung ist nur für  $\lambda/L = 1.5$  gut.

### Aperiodische Längsbewegung

Bei allen Fahrten mit der höchsten Glattwassergeschwindigkeit (Fahrtstufe V,  $F_N = 0.368$ ) trat der Effekt des 'Mitgenommen-Werdens' ein, wenn die Wellenlänge größer als die Schiffslänge war.

Aus theoretischen Untersuchungen war angenommen worden, daß  $\lambda/L = 1$  etwa den ungünstigsten Fall darstellt. Wie schon erwähnt ist aber in diesem Fall die Längskraft des Seeganges zu gering und der Verlust an Propellerschub zu groß.

Ferner war aus theoretischen Untersuchungen erwartet worden, daß ein 'Mitgenommen-Werden' bei der hier benutzten Steilheit bereits unter  $F_N = 0.30$  eintritt. Die Grenze für 'Mitgenommen-Werden' liegt aber für dieses Modell nach den Versuchen zwischen  $F_N = 0.30$  und  $0.37$ . In Abb.17 bis 19 ist der Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit für die Fälle, in denen das Modell mitgenommen wurde, aufgetragen.

Die Geschwindigkeitsschwankungen, verursacht durch die überholenden Wellen, schwellen schnell an, bis das Modell schließlich Wellengeschwindigkeit erreicht und von einer Welle mitgenommen wird. Die Photoserie Abb.20a, b, c, d zeigt das Modell in den einzelnen Bewegungsphasen. Wie auch aus der Auftragung Abb.19 zu erkennen ist, wird das Modell fast von einer Welle mitgenommen, Photo a, bleibt dann aber zurück b, um von der nächsten endgültig mitgenommen zu werden c und d. Das Heck liegt dabei etwa im Wellenberg.

Die Photos Abb.21 a und b (s.a. Diagramm Abb.18) zeigt das Modell ebenfalls in der Phase des Mitlaufens. Dabei weicht das Modell trotz harten Gegenruders in zunehmendem Maße vom vorgeschriebenen Kurs nach Backbord ab und nähert sich der Tankwand. In diesem Fall hatte das Modell bereits innerhalb der Registrierstrecke Wellengeschwindigkeit erreicht, sodaß der Anlaufvorgang nicht gezeigt werden kann.

In den Diagrammen Abb.17 bis 19 sind die Ergebnisse der theoretischen Rechnung mit empirischen Koeffizienten mit eingetragen. Zumindest in einem Fall ist gute Übereinstimmung festzustellen. Das Einpendeln auf die Gleichgewichtslage in der Welle kann den Versuchsergebnissen nicht entnommen werden, da kurz nach Erreichen der Wellengeschwindigkeit die Fahrt abgebrochen werden mußte. Aus Abb.18 ist jedoch zu erkennen, daß die wirkliche Pendelbewegung stärker gedämpft ist, als nach der Rechnung. Das liegt daran, daß bei der Rechnung eine Erhöhung des Dämpfungskoeffizienten beim Erreichen der Wellengeschwindigkeit nicht berücksichtigt wurde.

Ein Nachvollziehen des gemessenen Bewegungsablaufs ist auch insofern erschwert, als die Anfangsbedingungen - besonders die Phasenlage in den Wellen bei der die Drehzahlstufe erhöht wurde - nicht genau genug bekannt sind.

Da aber der prinzipielle Bewegungsablauf durch die Rechnung gut erfaßt ist, kann man den Schluß ziehen, daß das mathematische Modell der Längsbewegung brauchbar ist.

### Gierbewegung

Die nach den theoretischen Untersuchungen zu erwartenden Bewegungsmöglichkeiten sind:

- a) Schiff wird von den Wellen überholt und führt eine periodische Gierbewegung aus.
- b) Schiff wird von den Wellen überholt und wird mit seiner Eigenfrequenz der Gierschwingung (das Schiff ist gesteuert) angeregt. Je nach den Verhältnissen kann die Resonanzschwingung instabil werden.
- c) Schiff wird von einer Welle mitgenommen und dreht quer.

Die periodische Gierbewegung nach a) konnte wegen der begrenzten Tankbreite nicht registriert werden. Das Photo Abb.22 zeigt das Modell vor dem Erreichen der Tankwand bei schrägem Sollkurs zur See (auf dem Bild sind ferner die Aufnehmer der Lichtschranken und der Registrierstand zu erkennen).

Die Giereigenperiode des gesteuerten Modells beträgt nach den hydrodynamischen Koeffizienten von Eda [7]  $T_0 = 11.5$  sec für eine Proportionalsteuerung  $\gamma = 2$  und Fahrtstufe V. Eine Reihe von Ausschwenkversuchen mit dem Modell im glatten Wasser ergab in guter Übereinstimmung die Periode  $T_0 = 10.5$  sec.

Die erste und wichtigste Resonanzstelle liegt dann vor, wenn die Erreger-(Begegnungs-)Periode  $T_e = 1/2 T_0$  beträgt. Diese Bedingung wäre nur mit Fahrtstufe V etwa bei  $\lambda/L = 2$  zu erreichen gewesen. In diesem Fall wurde aber das Modell von den Wellen mitgenommen. Für eine schwächere Proportionalregelung ( $\gamma < 2$ ) liegen die Fälle ähnlich, sodaß daraus geschlossen werden kann, daß Kursinstabilität durch Gierresonanz zumindest für dieses Modell keine praktische Bedeutung besitzt.

In allen Fällen, in denen das Modell von einer Welle mitgenommen wurde, konnte es nicht auf Kurs gehalten werden. In Abb.18 ist der gemessene Verlauf der Kursabweichung  $\psi$  in der Phase des Mitlaufens mit einer Welle aufgetragen.

### Schlußfolgerungen

In Übereinstimmung mit bisherigen theoretischen Ergebnissen ergibt sich aus dieser Untersuchung, daß Schwierigkeiten beim Steuern in achterlicher See insbesondere dann zu erwarten sind, wenn das Schiff von einer Welle mitgenommen wird. Es kommt also vor allem darauf an, die Bedingungen unter denen ein 'Mitgenommen-Werden' eintritt zu erforschen.

Das schon früher benutzte mathematische Modell zur Beschreibung der Längsbewegung scheint geeignet, sowohl die periodische Bewegung als auch das 'Mitgenommen-Werden' zu beschreiben, wenn die hydrodynamischen Koeffizienten genau genug bekannt sind. Die Dämpfung der Längsbewegung kann ausreichend genau quasistationär bestimmt werden. Demgegenüber reicht die hydrostatische Berechnung der Längskraft des Seeganges nicht aus, da die Messungen niedrigere Werte ergeben.

Verbesserungen der Rechenmethode können erzielt werden, wenn die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Dämpfung und der Schubverlust des Propellers berücksichtigt werden.

Mit Hilfe einer derart erweiterten Methode ist es vermutlich möglich, zumindest für den regelmäßigen Seegang, die Bedingungen unter denen ein gefährliches Mitlaufen mit den Wellen eintritt, vorherzusagen. Wie erreicht werden kann, daß das Schiff auch dann, wenn es von einer Welle mitgenommen wird, auf Kurs gehalten werden kann, muß noch durch weitere experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung bisheriger theoretischer Ergebnisse geklärt werden.

## Literatur

- [ 1 ] Davidson, K.S.M. : A Note on Steering of Ships in Following Seas.  
VII Intern. Congress of Applied Mechanics, London 1948
- [ 2 ] Grim, O.: Das Schiff in von achtern auflaufender See.  
STG-Jahrbuch, Bd.45, 1951
- [ 3 ] Grim, O.: Surging Motion and Broaching Tendencies in a Severe Irregular Sea.  
Deutsche Hydrographische Zeitsch., Bd.16, 1963
- [ 4 ] Du Cane, P. and G.J. Goodrich: The Following Sea, Broaching and Surging.  
TRINA Trans., Vol.104, 1962
- [ 5 ] Boese, P.: Das Steuern eines Schiffes in schwerer achterlicher See.  
STG-Jahrbuch. Bd.63, 1969
- [ 6 ] Kastner, S.: 1. Zwischenbericht zum DFG-Forschungsvorhaben: Über den Einfluß der Rolldämpfung auf die Kenter-sicherheit im Seegang.  
Institut für Schiffbau, Hamburg, 1966
- [ 7 ] Eda, H. and Crane, C.L.: Steering Characteristics of Ships in Calm Water and Waves  
SNAME Trans., Vol.73, 1965
- [ 8 ] Todd, F.H.: Some Further Experiments on Single-Srew Merchant Ship Forms - Series 60.  
SNAME Trans., Vol.61, 1953
- [ 9 ] Boese, P.: Die Längsbewegung im achterlichen Seegang.  
IfS - Bericht Nr. 179, 1966

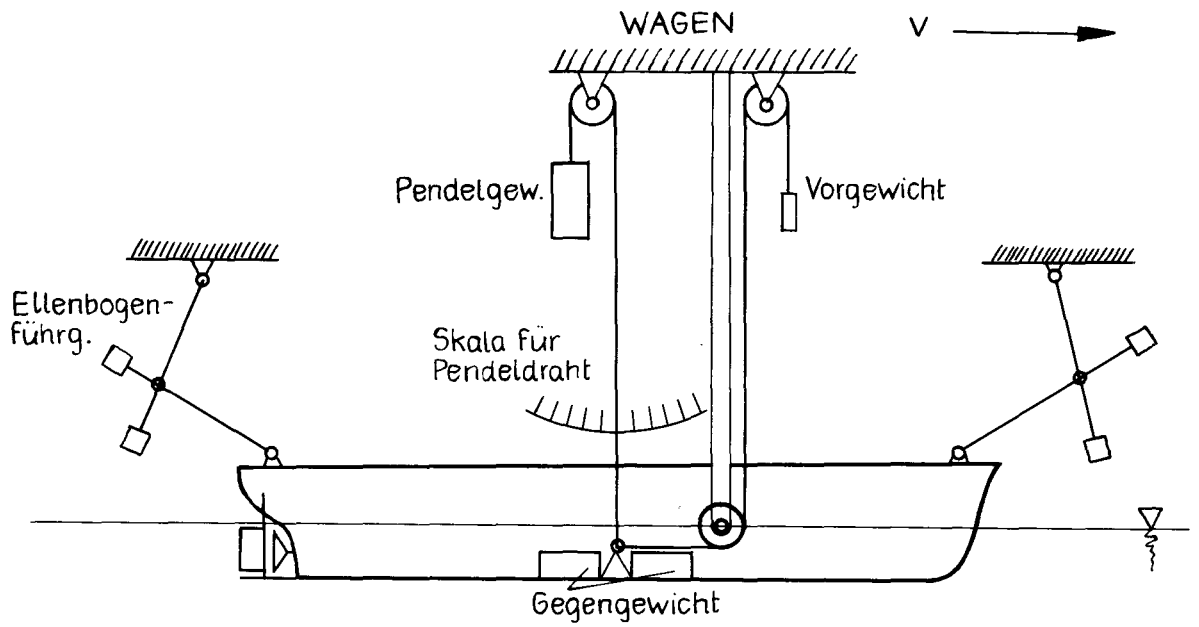


Abb. 1 Versuchsaufbau  
Über- und Unterlastversuch im glatten Wasser

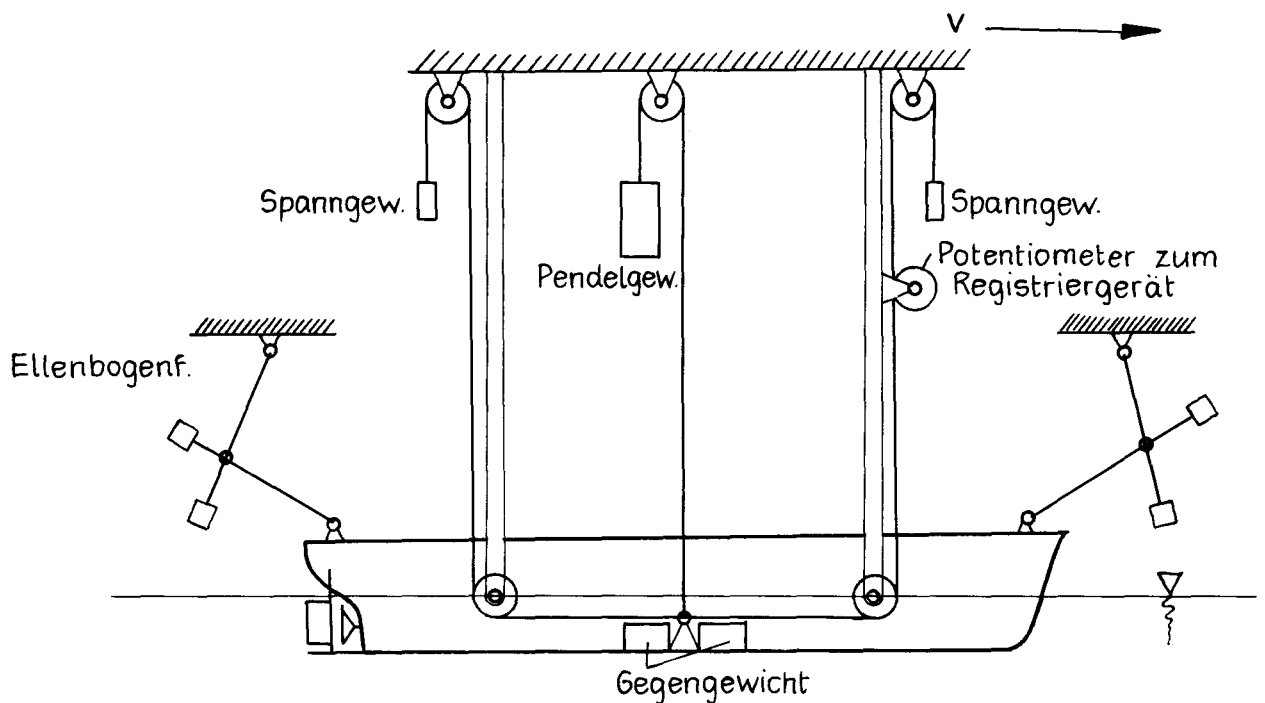
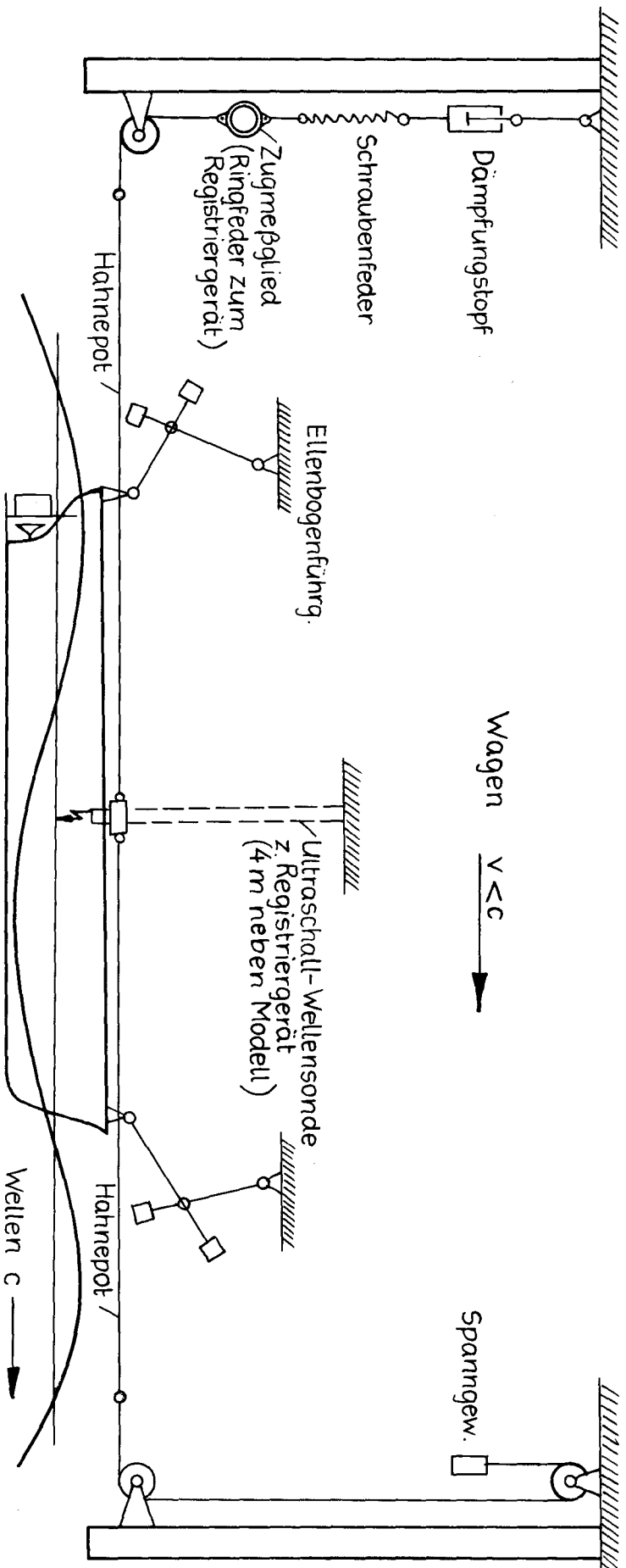
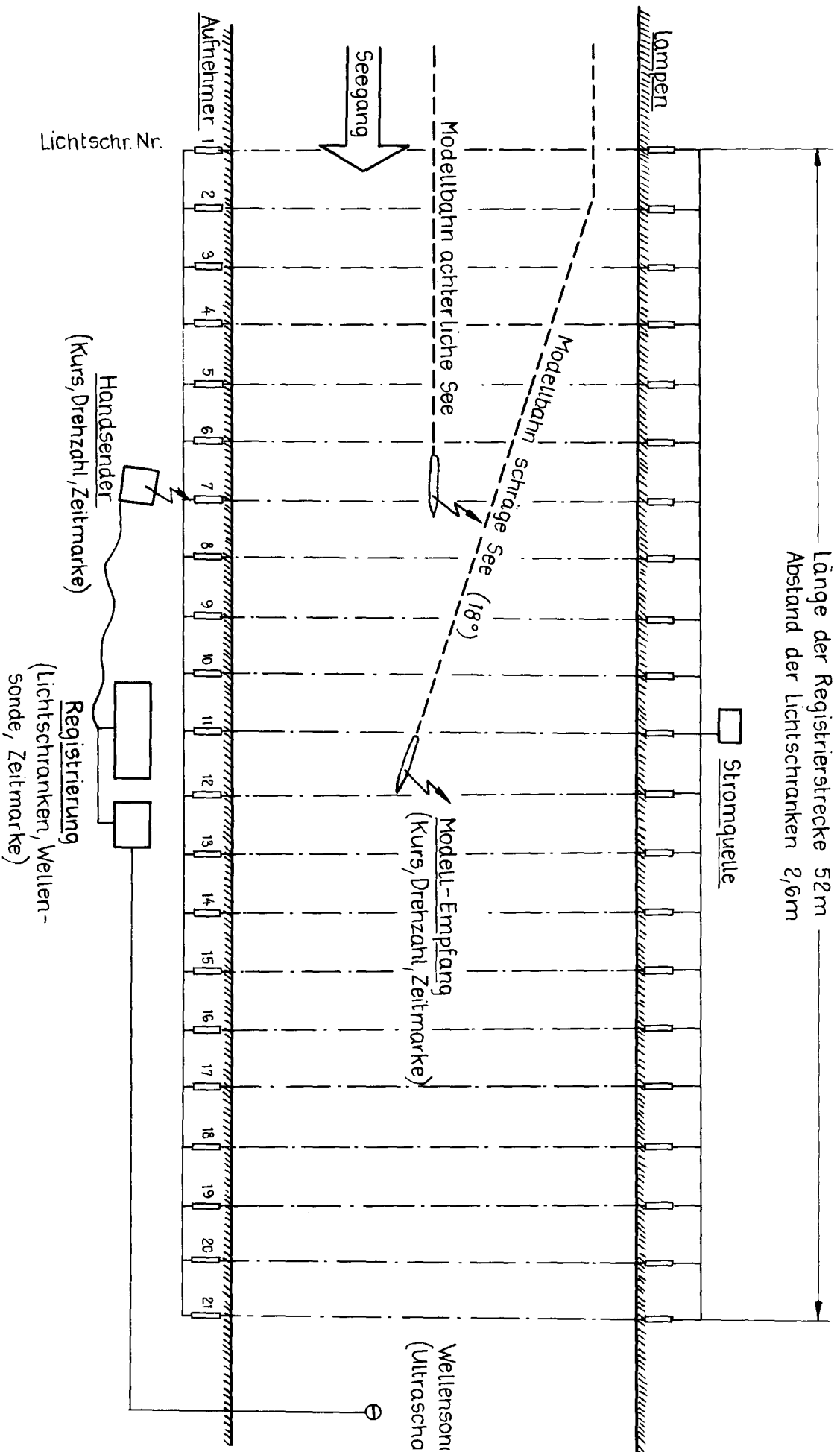


Abb. 2 Versuchsaufbau  
Ausschwingversuch im glatten Wasser



**Abb. 3 Versuchsaufbau : Längskraftmessung im achterlichen Seegang**



Länge der Registrierstrecke 52m  
 Abstand der Lichtstranken 2,6m

**Abb. 4** Versuchsaufbau : Freifahrendes Modell im achterlichen Seegang

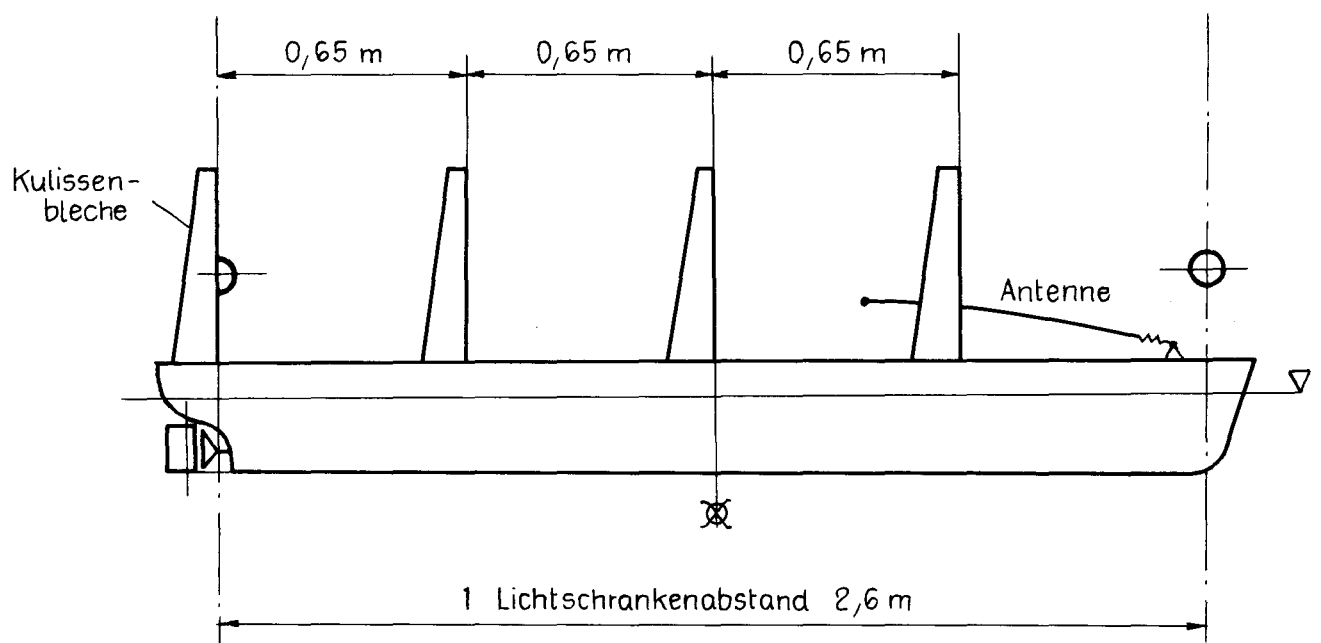


Abb.5 Anordnung der Kulissenbleche am Modell

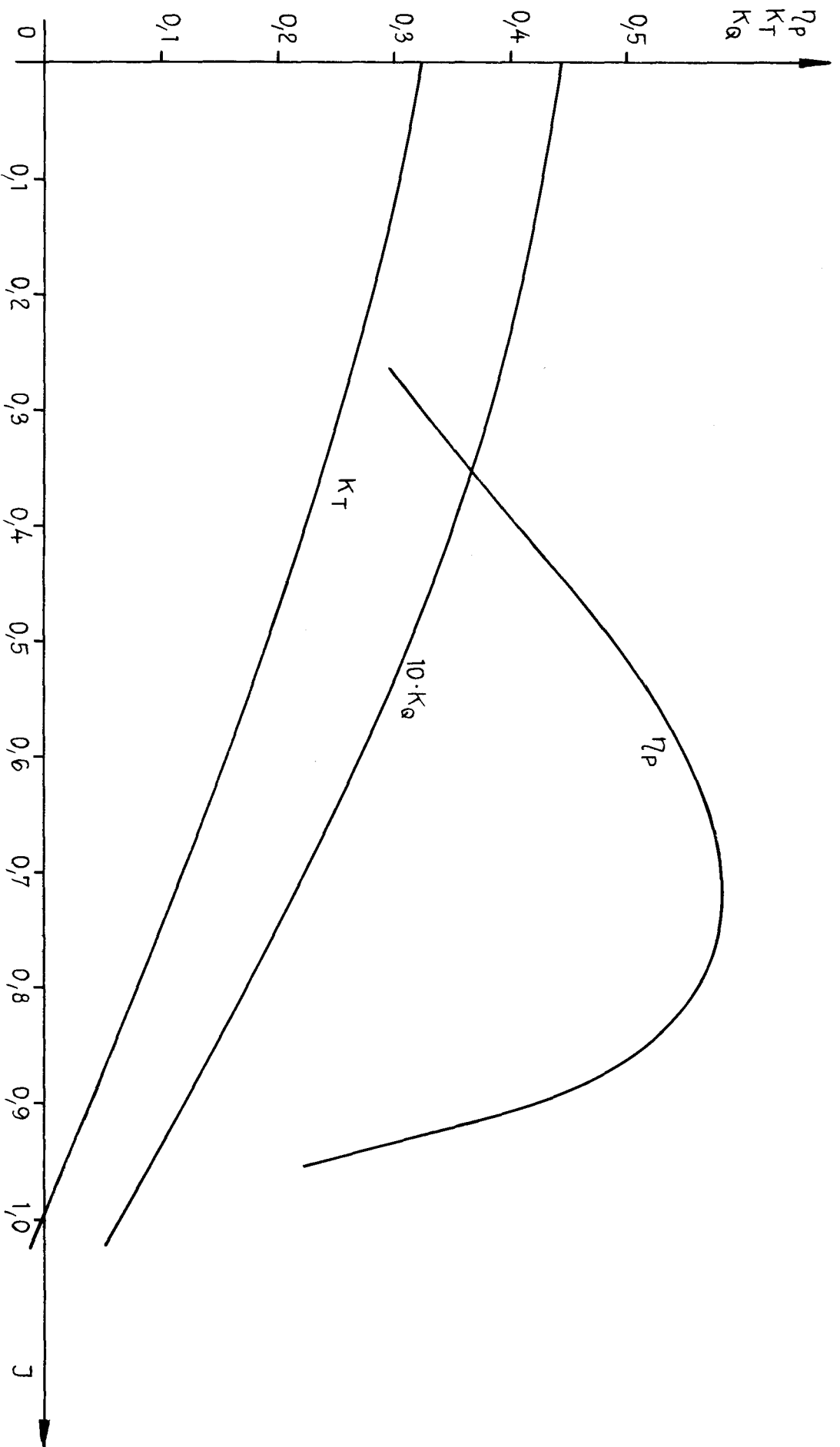
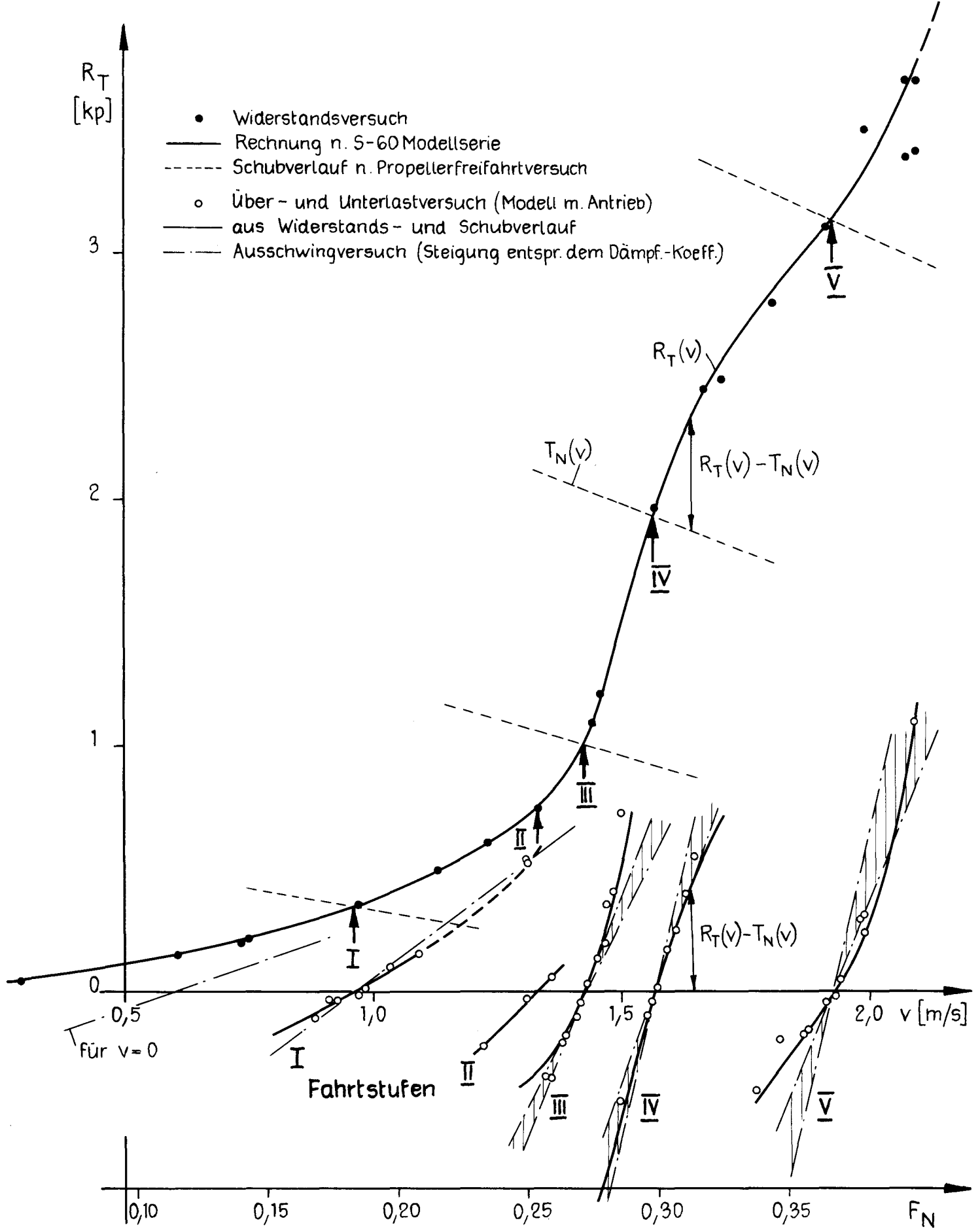
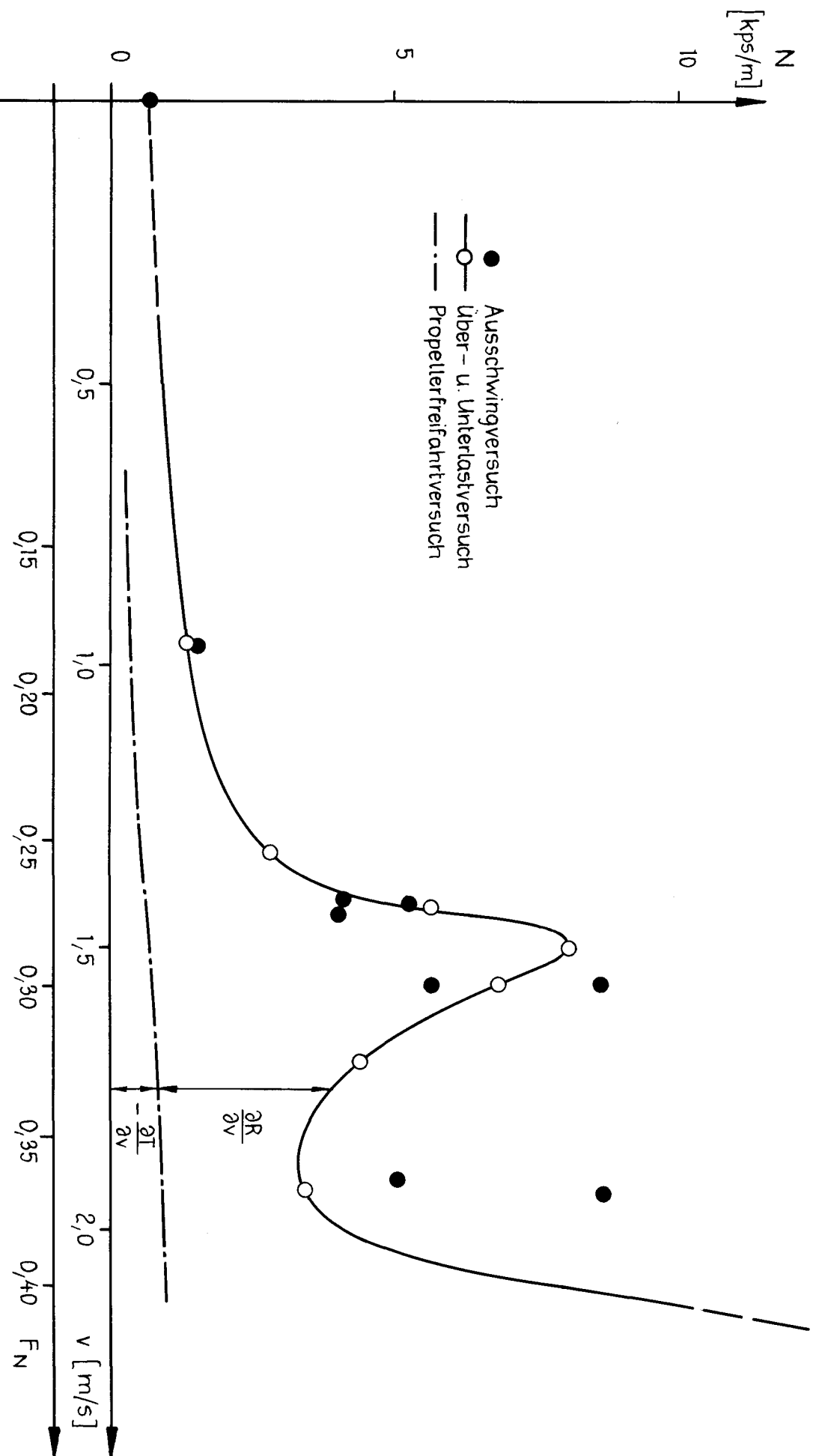


Abb. 6    Freifahrt diagramm des Modellpropellers



**Abb.7** Widerstands- und (Netto-)Schubverlauf aus Widerstands- und Über- und Unterlastversuch



**Abb. 8** Dämpfungskoeffizienten der Längsbewegung nach Über- und Unterlastversuch und nach Ausschwingversuch

$$F_{xx} = \frac{X_A}{2\pi \zeta_A / \lambda D}$$

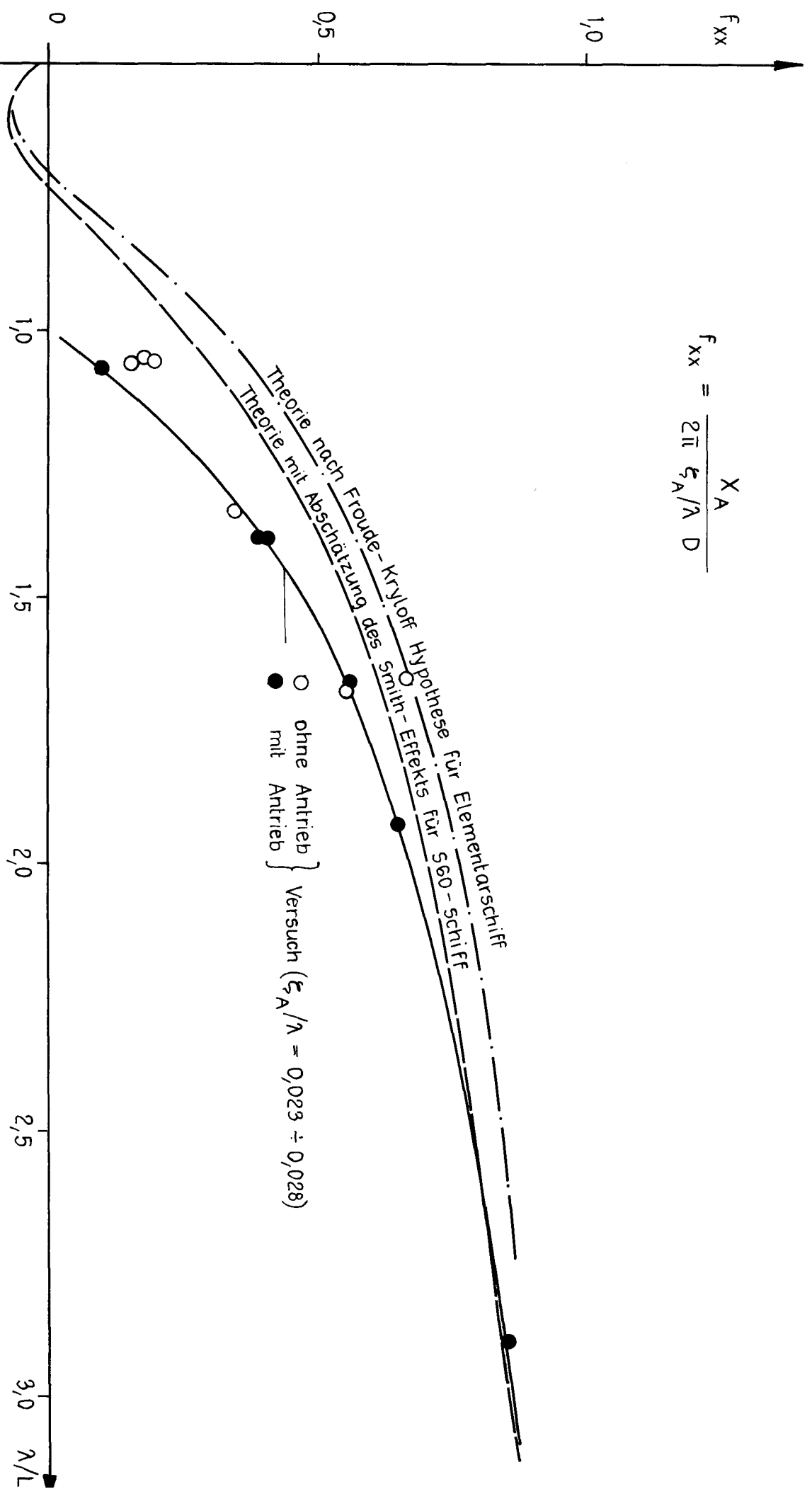
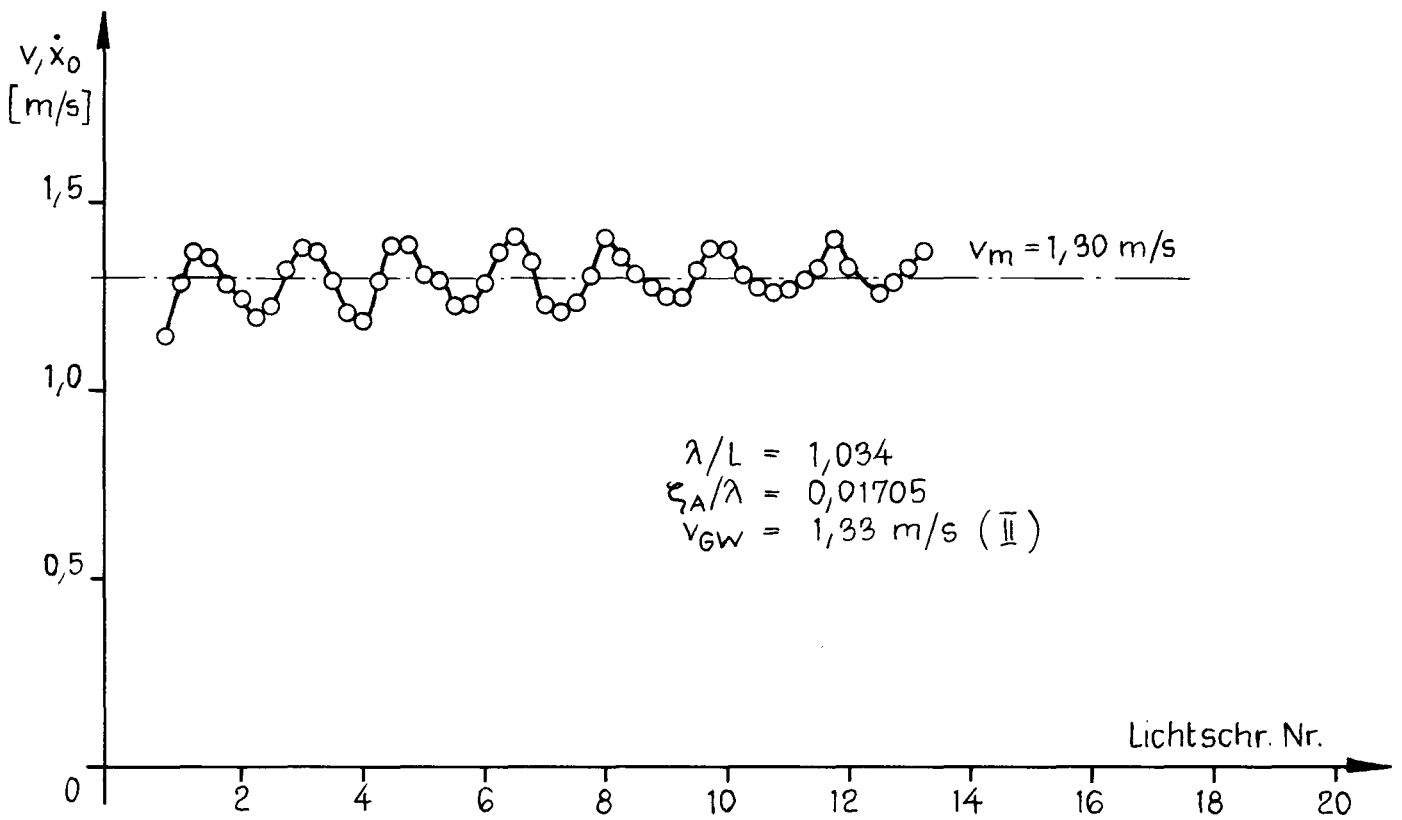
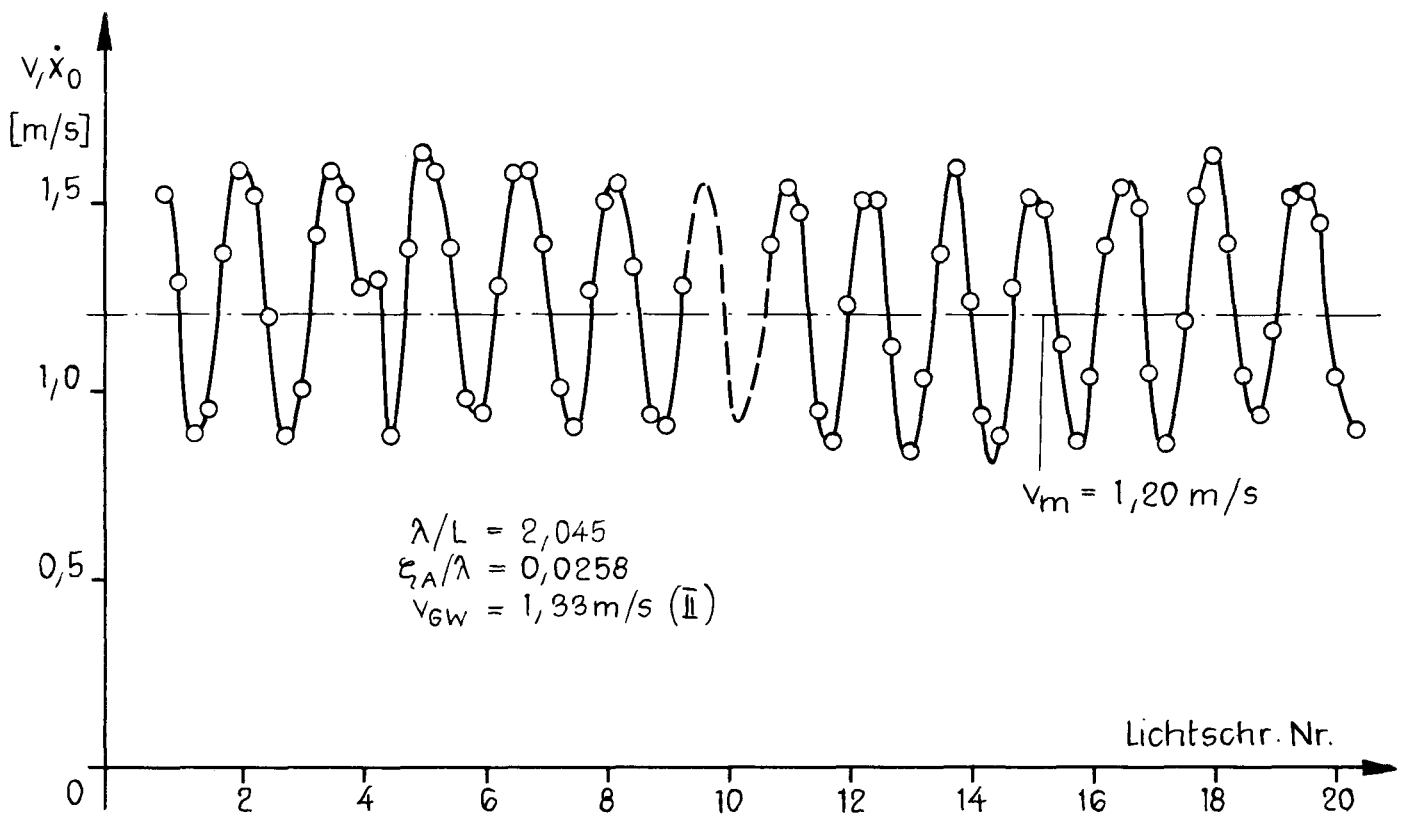


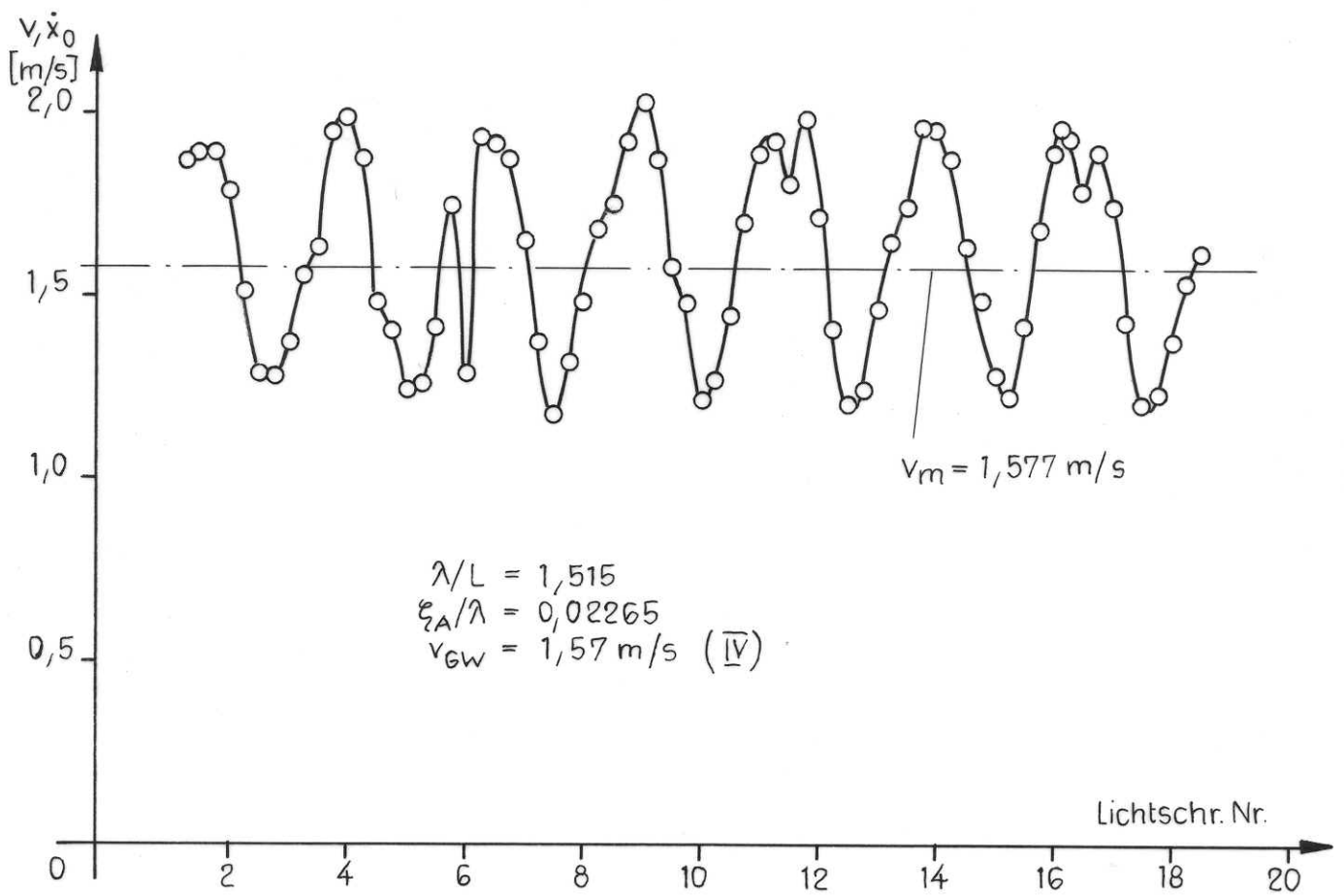
Abb. 9 Längskraftkoeffizient nach Theorie und Versuch



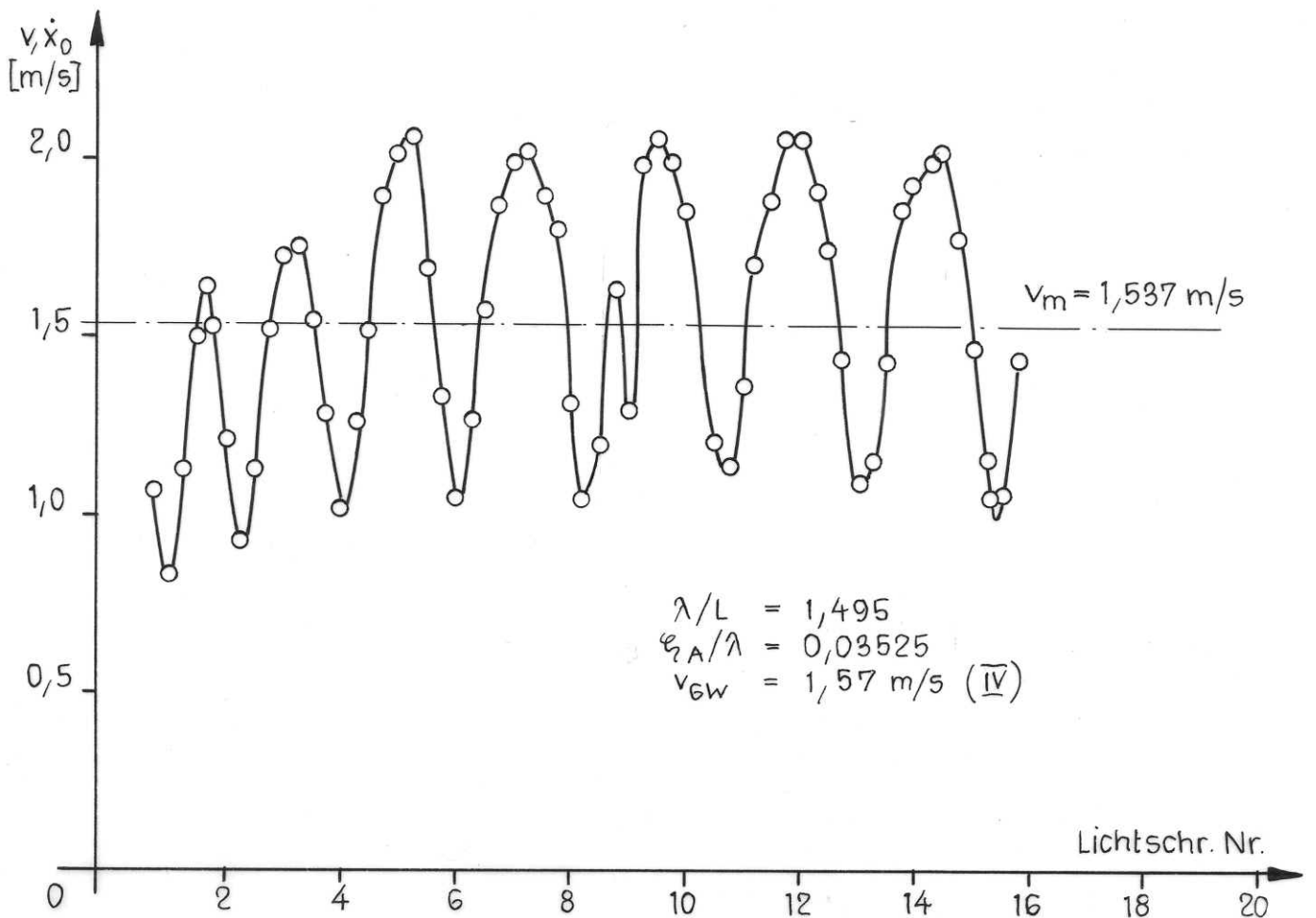
**Abb. 10** Geschwindigkeitsschwankung über dem Weg  
 $(\lambda/L \approx 1 ; F_N = 0,25)$



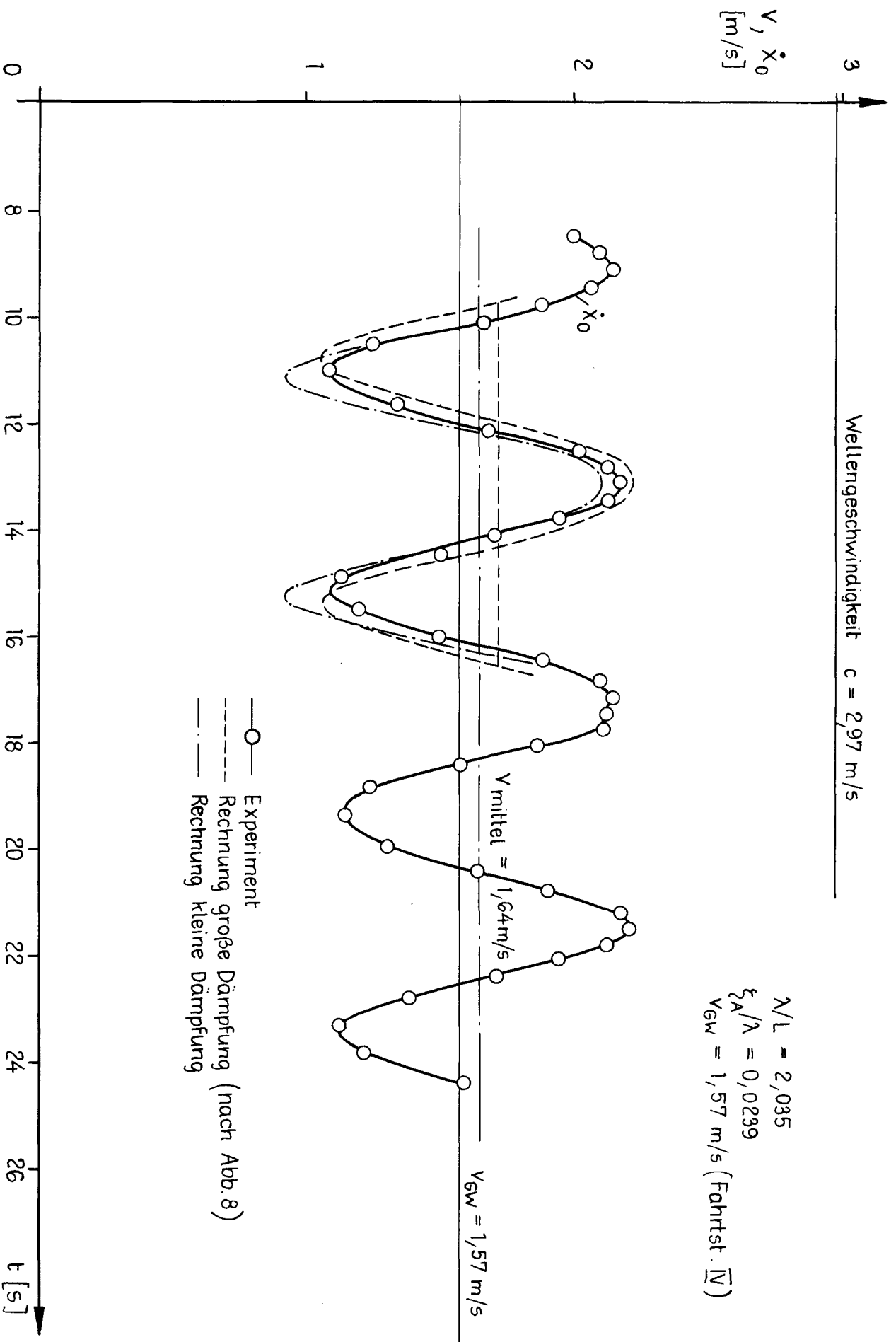
**Abb. 11** Geschwindigkeitsschwankung über dem Weg  
 $(\lambda/L \approx 2 ; F_N = 0,25)$



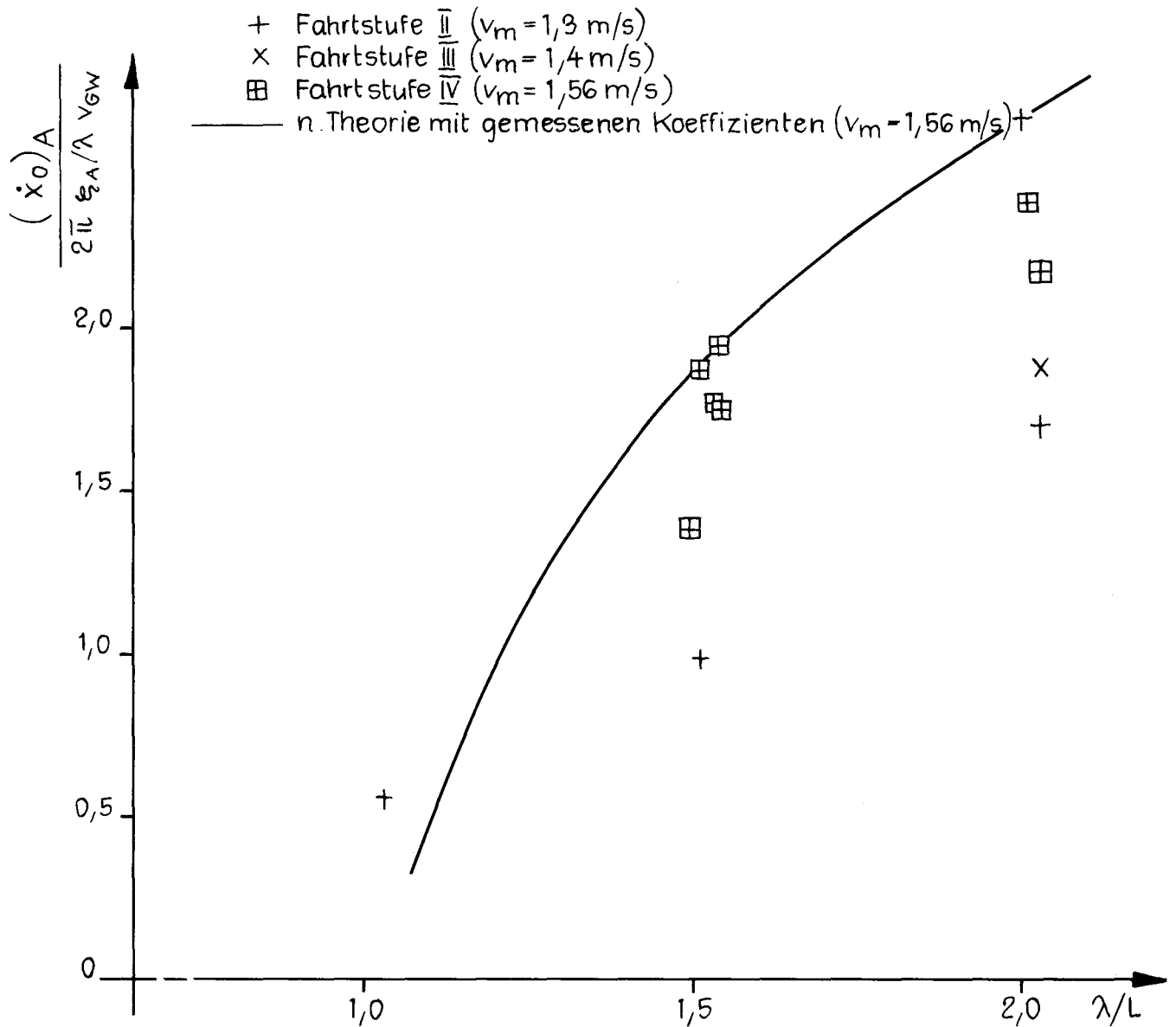
**Abb. 12** Geschwindigkeitsschwankung über dem Weg  
 $(\lambda/L \approx 1,5 ; F_N = 0,30)$



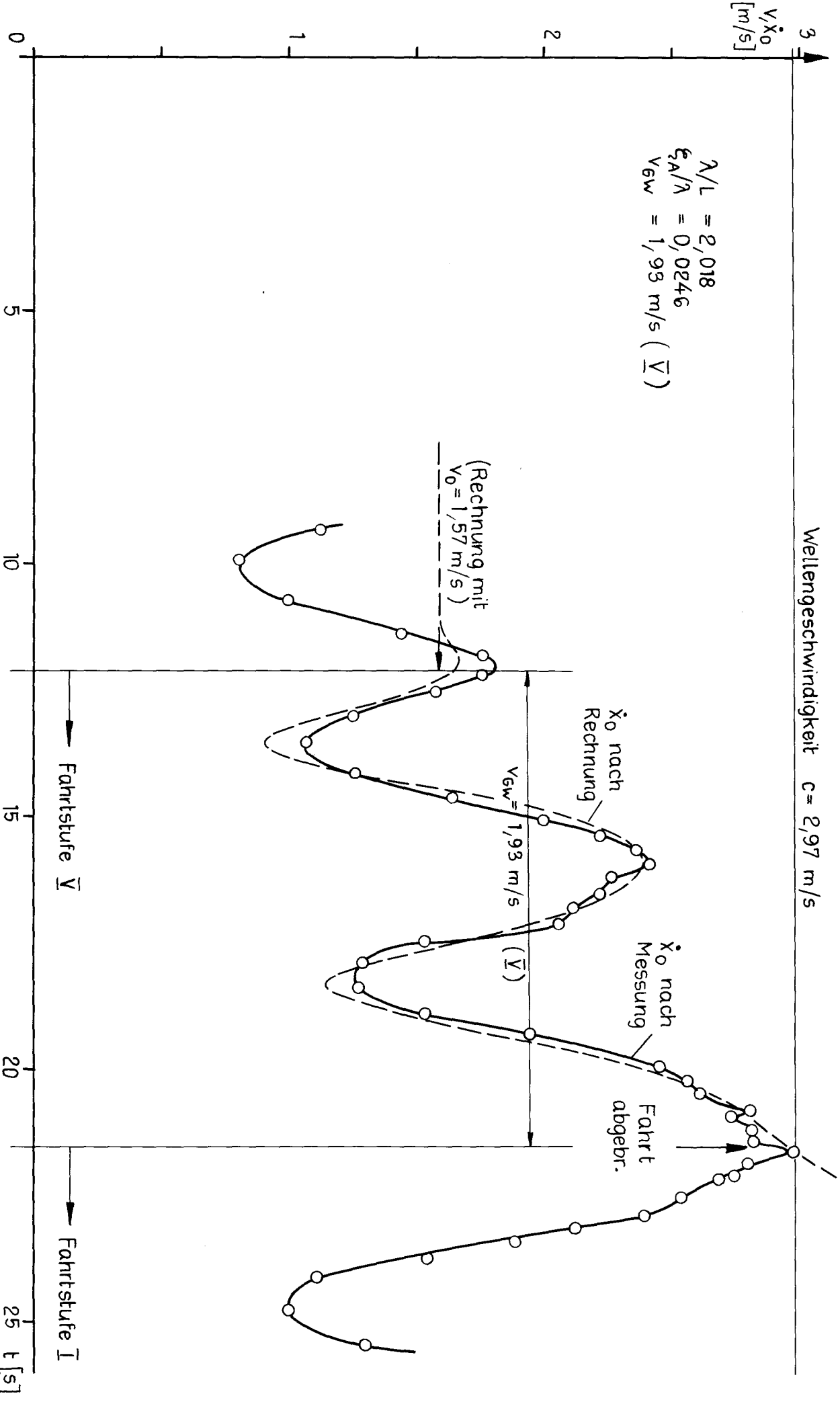
**Abb. 13** Geschwindigkeitsschwankung über dem Weg  
 $(\lambda/L \approx 1,5 ; F_N = 0,30)$



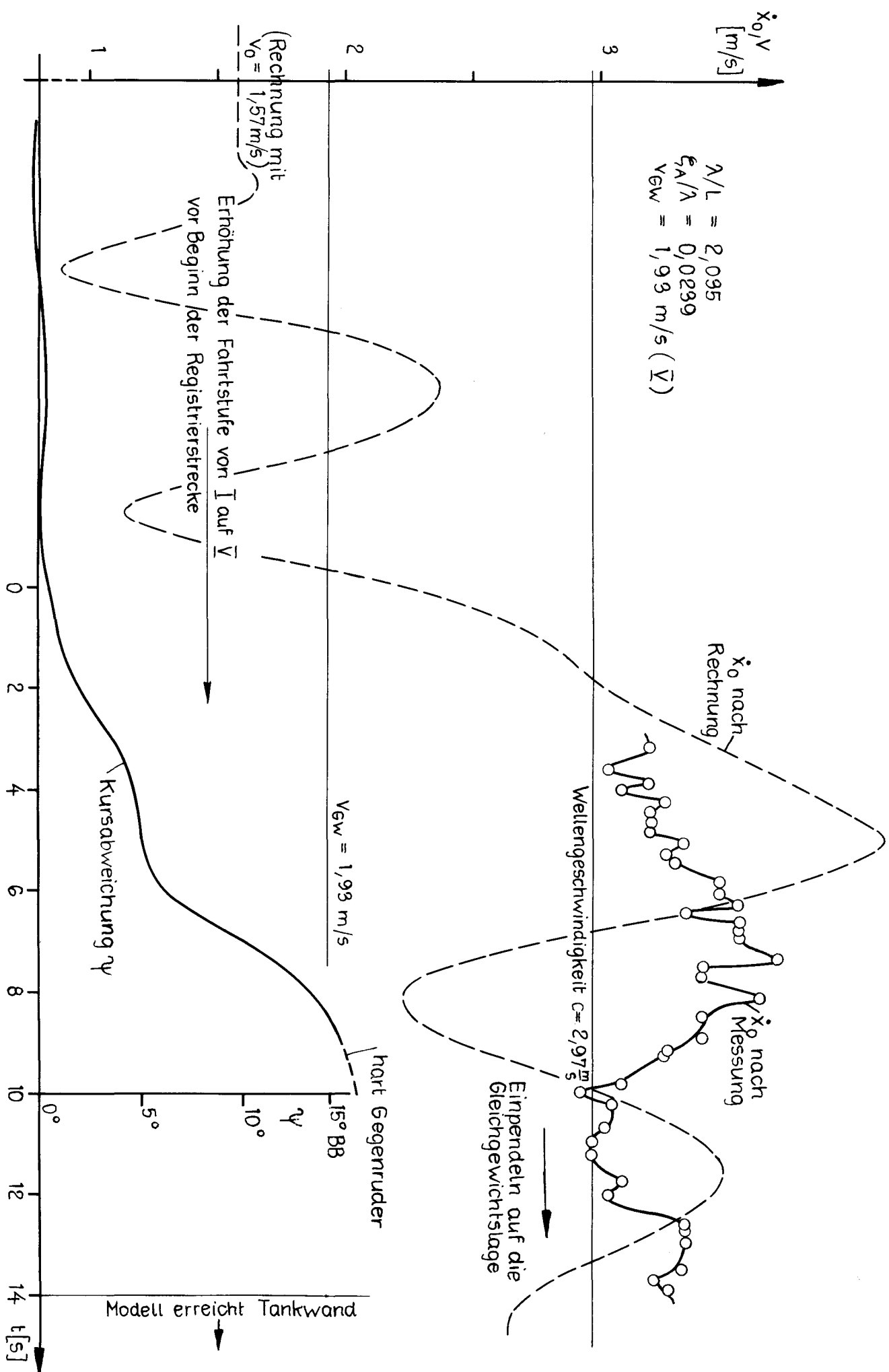
**Abb. 15** Periodische Geschwindigkeitsschwankung über der Zeit



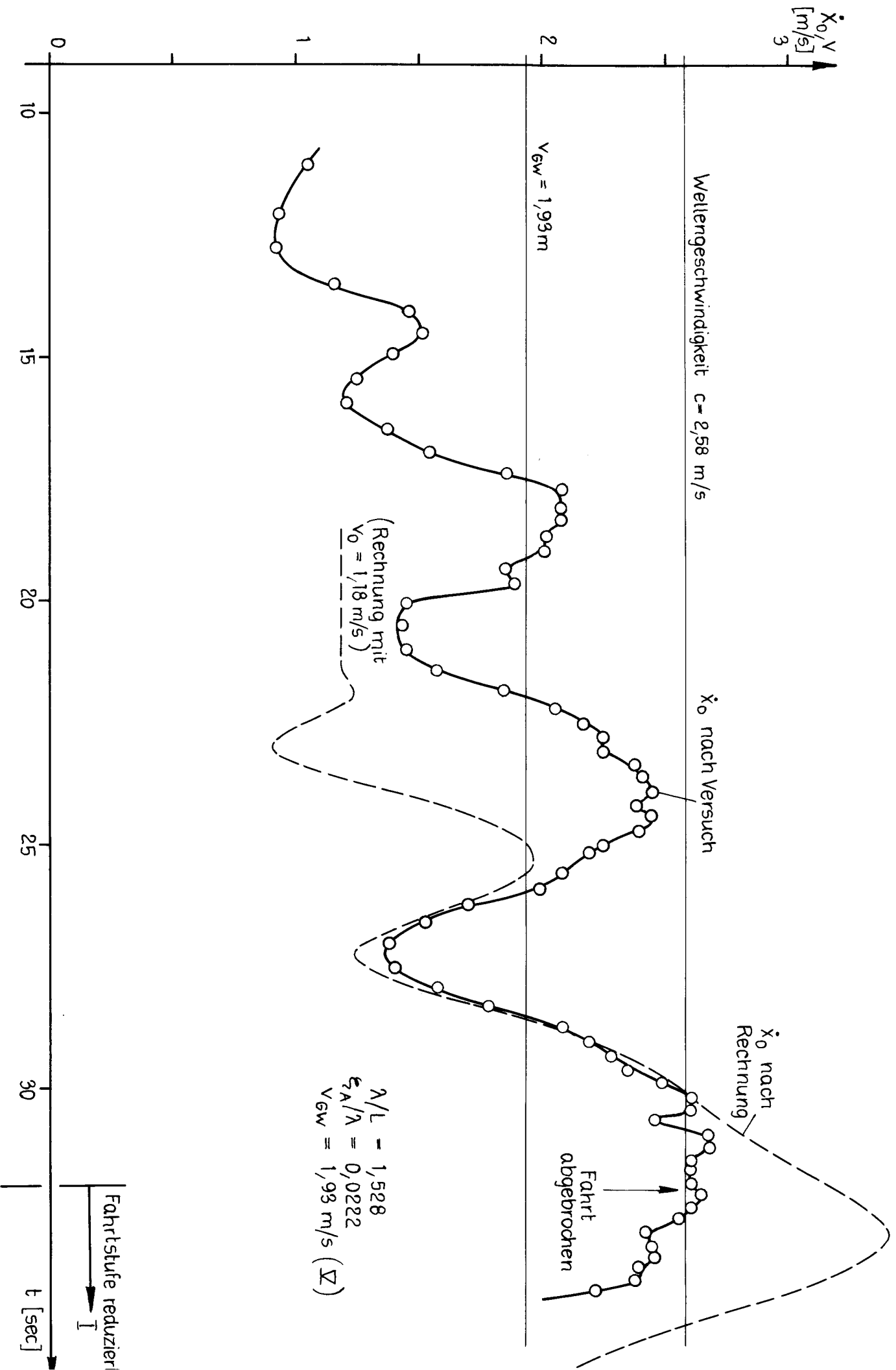
**Abb. 16** Dimensionslose Amplitude der Geschwindigkeitsschwankung, gemessen am freifahrenden Modell im achterlichen Seegang



**Abb.17** Geschwindigkeit im Anlaufvorgang (Modell erreicht kurz vor Abbruch der Fahrt Wellengeschwindigkeit)



**Abb. 18** Geschwindigkeit während des Mitlaufens mit einer Welle (Modell erreichte kurz vor Beginn der Meßstrecke Wellengeschwindigkeit)



**Abb. 19** Geschwindigkeit im Anlaufvorgang

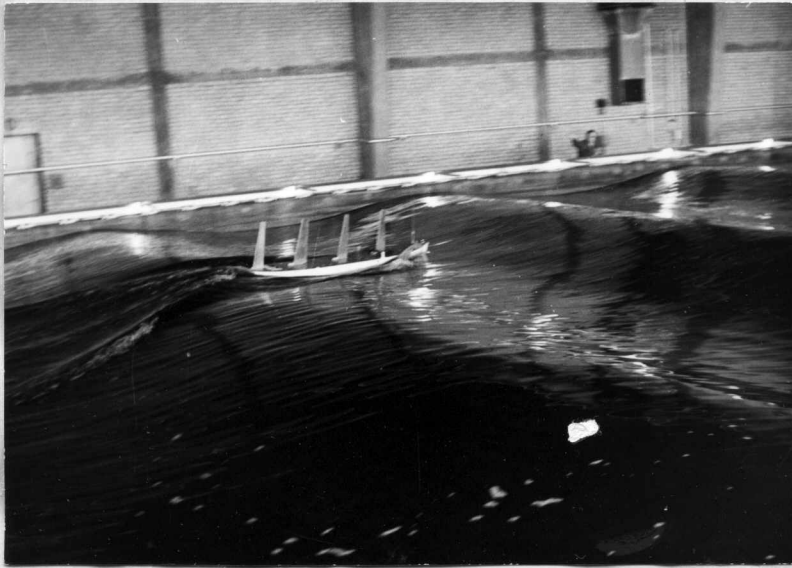


Abb. 21 a

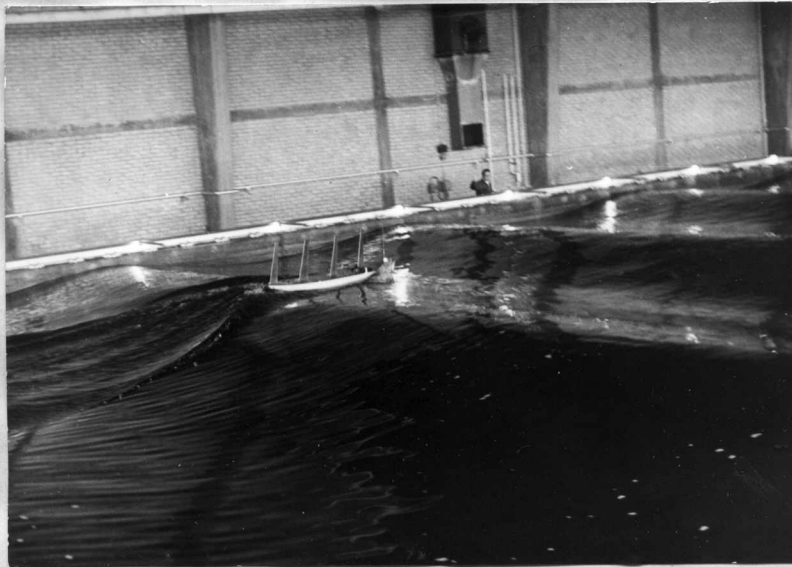


Abb. 21 b

Modell wird von  
einer Welle ( $\lambda=2$ )  
mitgenommen und  
dreht zur Tankwand



Abb. 22

Modell mit  
schrägem Kurs  
zur See

10,4 x 74



a)



b)



c)



d)

Abb. 20 Modell wird von einer Welle überholt a) u. b) und von der  
nach folgenden mitgenommene c) u. d).  
( $\alpha = 15^\circ$ )

