

**HSVA**

# REPORT

HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHS-ANSTALT ■ THE HAMBURG SHIP MODEL BASIN

HSVA-Bericht S 460 / 03

## **Abschlußbericht zum Teilvorhaben**

Bestimmung von Bewegungen und globalen  
Seegangslasten im Rahmen von  
rechnergesteuerten Kenterversuchen

## **im BMBF Verbundprojekt SinSee**

Beurteilung der Schiffssicherheit  
in schwerem Seegang

Juni 2006

# Abschlußbericht

## **Vorhabensbezeichnung**

Verbundprojekt SinSee – Beurteilung der Schiffssicherheit in schwerem Seegang

## **Teilvorhaben**

Bestimmung von Bewegungen und globalen Seegangslasten  
im Rahmen von rechnergesteuerten Kenterversuchen

## **Zuwendungsempfänger**

Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH

## **Förderkennzeichen**

03SX145A

## **Laufzeit (verlängert)**

01.09.2002 bis 31.12.2005

## **Berichtszeitraum**

01.09.2002 bis 31.12.2005

## **Projektleiter**

Dr.-Ing. W. Kuehnlein

## **Sachbearbeiter**

Dipl.-Ing. K.-E. Brink  
Dipl.-Ing. A. Schumacher

Hamburg, Juni 2006

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>KURZDARSTELLUNG DES TEILVORHABENS .....</b>	<b>3</b>
1.1	AUFGABENSTELLUNG .....	3
1.2	VORAUSSETZUNGEN .....	4
1.3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	5
1.4	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS .....	7
1.5	ZUSAMMENARBEIT MIT DEN VORHABENSPARTNERN .....	8
<b>2</b>	<b>DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER MODELLUNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>9</b>
2.1	MODELLBESCHREIBUNG.....	9
2.1.1	<i>Modellbeschreibung</i> .....	11
2.1.2	<i>Modelldatenblatt UND RoRo Schiff</i> .....	12
2.1.3	<i>Modelldatenblatt DFDS RoRo Einschrauber</i> .....	13
2.1.4	<i>Modelldatenblatt DFDS RoRo Zweischrauber</i> .....	14
2.1.5	<i>Modelldatenblatt SinBad</i> .....	15
2.2	6-KOMPONENTEN KRAFTMESSWAAGE.....	16
2.3	EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER WIRKSAMEN ROLLDÄMPFUNGSKOEFFIZIENTEN .....	18
2.3.1	<i>Versuchsbeschreibung</i> .....	20
2.3.2	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	21
2.3.3	<i>Versuchsauswertung</i> .....	22
2.3.4	<i>Ergebnisse der Rolldämpfungsuntersuchungen</i> .....	23
2.3.5	<i>Vergleich der Rolldämpfungscharakteristiken</i> .....	25
2.4	BESTIMMUNG VON BEWEGUNGEN UND GLOBALEN SEEGANGSLASTEN IM RAHMEN VON RECHNERGESTEUERTEN KENTERVERSUCHEN .....	27
2.4.1	<i>Weiterentwicklung der Versuchstechnik</i> .....	27
2.4.2	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	28
2.4.3	<i>Versuchsauswertung</i> .....	30
2.4.4	<i>Ergebnisse der Kenterversuche</i> .....	31
2.4.5	<i>Neuronale Netze</i> .....	32
2.5	GROßAUSFÜHRUNGSMESSUNGEN .....	33
2.6	NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE .....	35
2.7	FORTSCHRITT DER FORSCHUNGEN AUF DEM GEBIET DER SCHIFFSSICHERHEIT .....	36
2.8	VERÖFFENTLICHUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE .....	37
<b>3</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS IM ANHANG .....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>LITERATURQUELLEN .....</b>	<b>39</b>

Die diesem Bericht zugrunde liegende Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen 03SX145A). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

# 1 Kurzdarstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Entwicklung zweckmäßiger Stabilitätskriterien, die eine ausreichende Kentericherheit von Schiffen gewährleisten, setzt das Verständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten voraus, die ein in schwerer See fahrendes Schiff erfährt. Dabei ist die Kenntnis gefährlicher Seegangszustände ebenso von Bedeutung wie die Bewertung unterschiedlicher Schiffsformparameter und deren Einfluß auf das Bewegungsverhalten von Schiffen.

Eine gezielte Untersuchung der Schiffs- und Ladungssicherheit verschiedener Schiffstypen in schwerer See hat in den vergangenen Jahren bereits im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundvorhaben ROLL-S stattgefunden. Hierbei spielte nicht die statistische Auswertung von Kenterereignissen eine Rolle, wie sie zuerst von Rahola [1] eingeführt wurde und noch heute in der aktuellen IMO-Resolution A 167 [2] fortentwickelt wird. Vielmehr wurden die Bewegungen der unterschiedlichen Schiffsmodelle als direkte Reaktion des Seegangs ermittelt.

Ziel des hier beschriebenen SinSee Teilvorhabens war es, im Rahmen von Modellversuchen sowohl die Bewegungsreaktionen des Schiffs in schwerer See zu erfassen, als auch die am Schiffskörper wirkenden globalen Lasten zu ermitteln. Zu diesem Zweck war die in der HSVA eingeführte Modellversuchstechnik zunächst weiter zu entwickeln und zu erproben. Nachfolgend sollten die Schiffsreaktionen der unterschiedlichen Schiffstypen in systematischen Serien rechnergesteuerter Kenterversuche ermittelt werden.

Da die Ergebnisse der Modelluntersuchungen insbesondere der Validierung numerischer Berechnungsmethoden dienen sollen, sind besonders hohe Anforderungen an die Versuchs- und Meßtechnik zu erfüllen. Letztendlich sollen anerkannte Seegangsberechnungsmethoden mittels der gewonnenen Versuchsergebnisse weiter verbessert werden, um einen aktuellen Beitrag für die Entwicklung zukünftiger Stabilitätskriterien leisten zu können.

Die technischen Arbeitsziele des Teilvorhabens umfassen weiterhin das Erarbeiten der Anforderungen an eine bei der TU Berlin entstehenden Datenbank zur Erfassung der gewonnenen Meßdaten und der Konditionierung eines neuronalen Netzes.

Weiterhin hat die HSVA die für das Teilvorhaben des Projektpartners OceanWaveS GmbH notwendigen Bewegungsmessungen an einem Frachtschiff durchgeführt.

## 1.2 Voraussetzungen

Die HSVA hat in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Kenteruntersuchungen gerade auch durch Förderung des BMBF durchgeführt und damit wesentliche Beiträge zur internationalen Diskussion der Schiffssicherheit geliefert. Insbesondere sind hier die Versuchsserien in den 80er Jahren erwähnenswert, die zur Entwicklung veränderter Intaktstabilitätskriterien durch Einbeziehung von individuellen Formparametern der Schiffe führte und in einige IMO-Empfehlungen einfließen. Weiter sind Modellversuche zur Überlebensfähigkeit von RoRo Passagierfähren zu nennen.

In den letzten Jahren hat die HSVA im Rahmen des Forschungsvorhabens ROLL-S große Anstrengungen unternommen mit Hilfe des Instituts für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin das Problem der direkten Zuordnung von Schiffsbewegung zu erregender Welle versuchstechnisch zu lösen und somit Daten mit hoher Genauigkeit bereit stellen zu können. Dabei wurde ein System zur rechnergesteuerten Durchführung von Kenterversuchen mit völlig freifahrenden Schiffsmodellen entwickelt. Herzstück der Anlage ist dabei ein optisches System, welches berührungslos die Modellbewegung in sechs Freiheitsgraden erfaßt und damit die Modellantwort in den Wellen und gleichzeitig die genaue Position des Modells im Tank bestimmt. Auf dieses System gestützt ist es möglich, die Versuchsfahrten komplett computergesteuert ablaufen zu lassen, wobei der Rechner über Funk die Datenübertragung und die Steuerung von Wellenmaschine, Schleppwagen und Modell koordiniert.

Als weitere Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsvorhabens kann die langjährige Erfahrung der HSVA bei der Bestimmung von äußeren Lasten an Schiffsmodellen genannt werden. Hierbei kommen sowohl Standardverfahren für die Ermittlung von hydrodynamischen Lasten zum Einsatz als auch besondere, für spezielle Meßaufgaben entwickelten Methoden.

Weiterhin ist die HSVA mit der Bestimmung von Rolldämpfungsbeiwerten für Schiffsmodelle und der Durchführung von Probefahrtmessungen bestens vertraut.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Tätigkeiten im Rahmen des Teilvorhabens lassen sich grob in zwei Arbeitsschwerpunkte aufteilen. Zum einen die Durchführung der Modellversuche mit Bereitstellung der benötigten Meßsysteme und der Kentermodelle sowie die Bewegungsmessungen an der Großausführung. Zum anderen die Weiterentwicklung der Wellengenerierung und der Aufbau eines neuronalen Netzes.

Im einzelnen läßt sich das Teilvorhaben in folgende Arbeitsschritte gliedern:

- Vor der Durchführung systematisch variiertener Kenterversuche waren zunächst die vorhandenen Meßsysteme derart zu erweitern daß die Messung globaler Seegangslasten möglich wurde. Hierbei war einerseits der Einsatz einer zusätzlichen Funkverbindung zwischen dem Modell und der Datenerfassungselektronik notwendig. Darüber hinaus wurde ein weiteres Meßsystem zur Erfassung der globalen Schiffskräfte in den Versuchsaufbau integriert, das eine ausreichend hohe Datenerfassungsrate aufwies. Sämtliche Komponenten des Mess- und Erfassungssystems waren schließlich vor Versuchsbeginn auf ihre Funktion hin zu erproben.
- Die Möglichkeit einer parallelen Daten- und Videoerfassung ist in den Versuchsablauf eingebunden und erprobt worden. Hierbei wurde die Steuerung des Wellenerzeugers, des Modells und des Datenerfassungssystems mit Videoaufzeichnungen zeitlich synchronisiert.
- Die zu untersuchenden Modelle wurden zur Messung der am Hauptspant wirkenden Kräfte und Momente in vollständig wasserdichte Vor- und Hinterschiffsteile getrennt. Im Bereich des Hauptspants sind die Modellhälften dabei mittels einer speziellen Meßwaage miteinander verbunden worden. Diese ermöglichte die Messung der Schnittkräfte und Momente in den bzw. um die drei Hauptachsen des Modells.
- Konstruktion und Bau einer 6-Komponenten Waage. Diese wurde derart ausgeführt, daß sie problemlos in alle zu untersuchenden Schiffsmodelle montiert werden konnte.
- Durchführung der Kenterversuche in enger Kooperation mit dem Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin, das die Steuersignale für den Wellenerzeuger zur Generierung regelmäßiger Wellen, unregelmäßiger Seegänge sowie transientser Wellenpakete bereitstellte und die Wellenberechnungen durchführte. Die Weiterentwicklung des vorhandenen Wellengenerierungsverfahren und dessen Validierung in der Versuchseinrichtung war einen weiterer gemeinsamer Arbeitspunkt der TU Berlin und der HSVA.
- Nach Durchführung der Kenterversuche mit systematisch variierten Parametern, wie z.B. Anfangsstabilität, Begegnungswinkel und Modellgeschwindigkeit, wurden die gesammelten Meßdaten für die weitere Validierung von numerischen Methoden aufbereitet.

- Ausarbeiten der Anforderungen an die entstehende Datenbank sowie der Aufbau und das Training des neuronalen Netzes in Kooperation mit der TU Berlin. Als Software für die Generierung des Netzes wurde hierbei das kommerzielle Programm MATLAB verwendet.
- Neben den Kenterversuchen in schwerer See wurden die Rolldämpfungseigenschaften der verschiedenen Schiffstypen in Glattwasser bestimmt.
- Weiterhin führte die HSVA eine Langzeitmessung der Schiffsbewegungen an Bord der Großausführung eines der untersuchten RoRo Schiffe durch.
- Einen weiteren Arbeitspunkt stellt die allgemeine Projektkoordination sowie die kontinuierliche Berichterstellung dar.

#### 1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Bis vor ein paar Jahren wurden bei Forschungen zur Sicherheit gegen das Kentern von Schiffen hauptsächlich experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten freifahrender Kentermodelle in schweren Seegängen nur durch einige wenige Größen, wie z.B. der Rollwinkel über der Zeit beschrieben. Eine direkte Messung der Wellen am Ort des Modells war nicht möglich. Der Wellenbewegung konnte keine genau daraus resultierende Schiffsantwort zugeordnet werden. Deshalb konnte man aus den Versuchen nur statistische Ergebnisse gewinnen. Die aus diesen statistischen Ergebnissen, Versuchsbeobachtungen und empirischen Korrekturen entwickelten Bewertungen für Intakt- und Leckstabilität sind heute nach wie vor gültig, tragen allerdings den individuellen Eigenschaften eines Schiffes nur sehr begrenzt Rechnung.

Erst ein erneutes Interesse an den Ursachen für Unfälle in schweren Seegängen und die Entwicklung von leistungsfähigeren numerischen Simulationsprogrammen zur Vorhersage von Schiffsbewegungen und Kentervorgängen gab den Anstoß dazu, die Versuchstechnik auf diesem Gebiet weiter zu entwickeln. Zur Validierung dieser Programme benötigte man nun zwingend notwendig Messungen der Schiffsbewegung mit den dazugehörigen Wellendaten. Durch die weiterentwickelte Möglichkeit, gezielt entworfene deterministische Modellseegänge mit Hilfe transienter Wellenpakete in einen Versuchstank zu erzeugen, ist man in der Lage, dieses Problem - Zuordnung von Wellenbewegung zu Schiffsantwort - zu lösen. Es können reproduzierbare Modellseegänge im Tank generiert werden, die nach Ort und Zeit mathematisch beschreiben werden können. Durch ein geeignetes Steuerungssystem wird das Schiffsmodell nun zu einem bestimmten Zeitpunkt mit vorgegebener Geschwindigkeit an einen festgelegten Ort geführt, und dort die Reaktion des Modells direkt mit der erregenden Welle in Zusammenhang gebracht. Da für die genaue Zuordnung die absolute Position des Modells im Tank zu jeder Zeit bekannt sein muß.

Die Bestimmung globaler Schiffslasten durch das Teilen von Schiffsmodellen und Aufnahme der dortigen Kräfte durch ein Messwaagensystem an der Trennfuge kann schon fast als Stand der Versuchstechnik bezeichnet werden. Völlig neu ist jedoch bei diesem Forschungsvorhaben die Verarbeitung und Digitalisierung von Meßsignalen der einzelnen Kraftmessdosen an Bord und die sich anschließende berührungslose Übertragung an den Hauptrechner, da das Schiffsmodell völlig frei, d.h. ohne jede Kabelverbindung durch den Seegang fahren muss, um Beeinträchtigungen des Bewegungsverhaltens des Modells auszuschließen.

Die generelle Möglichkeit, Problemstellungen mit Hilfe von neuronalen Netzen zu bearbeiten und zu lösen, ist schon seit mehr als zehn Jahren bekannt. Da für die Konditionierung (Training) eines solchen Netzes aber Computer mit einer sehr hohen Rechenleistung notwendig sind, wurden neuronale Netze bis vor kurzem vorwiegend an Universitäten zu Forschungszwecken betrieben. Erst durch die rasante Leistungssteigerung der PCs wird diese Technik immer mehr zur Lösung von komplizierteren Problemstellungen in der Praxis eingesetzt.

Zum besseren Verständnis sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass zwar die Konditionierung von neuronalen Netzen eine sehr hohe Rechnerleistung benötigt, die anschließenden Simulationen mit dem konditionierten Netz jedoch auf jedem herkömmlichen PC mit immenser Geschwindigkeit durchgeführt werden können.

## 1.5 Zusammenarbeit mit den Vorhabenspartnern

Während der gesamten Laufzeit des Forschungsvorhabens hat ein kontinuierlicher Austausch zwischen allen beteiligten Partnern stattgefunden. Dieser betraf sowohl wissenschaftlich-technische Belange als auch zeitliche und organisatorische Gesichtspunkte.

Die Schwerpunkte der Zusammenarbeit zwischen der HSVA und den beteiligten Partnern lag auf folgenden Gebieten:

- FSG:  
Schiffbauliche Aspekte bei Planung, Bau und Untersuchung der verschiedenen Schiffsmodelle.  
Definition der zu untersuchenden Modell- und Seegangszustände.  
Planung, Vorbereitung und Durchführung der Großausführungsmessung.
- TUB:  
Fortentwicklung der Wellengenerierung im großen Tank der HSVA.  
Gemeinsame Durchführung der Kenterversuchsserien.  
Planung und Aufbau eines Datenbanksystems sowie eines neuronalen Netzes.
- TUHH/OWS:  
Allgemeiner Daten- und Informationsaustausch.

Sämtliche der im Rahmen der Modellversuche durch die HSVA gewonnenen Meßergebnisse wurden den Projektpartnern in elektronischer Form zur Verfügung gestellt.

## 2 Detaillierte Beschreibung der Modelluntersuchungen

### 2.1 Modellbeschreibung

Im Rahmen von SinSee sind fünf verschiedene Schiffsentwürfe untersucht worden. Zwei Schiffstypen wurden bereits zuvor im Rahmen von Roll-S untersucht. Dabei handelte es sich um die C-Box und das UND RoRo Schiff. Die erneute Untersuchung dieser Schiffe wurde angestrebt, um die globalen Seegangslasten dieser Schiffe zu ermitteln. Da das Bewegungsverhalten der beiden Schiffe in schwerer See bereits weitestgehend bekannt war, konnten die kritischen Seegangs- und Fahrtzustände im Rahmen des aktuellen Vorhabens besonders schnell reproduziert werden, was eine effiziente Versuchsdurchführung ermöglichte.

Darüber hinaus sind zwei Entwurfsvarianten eines weiteren RoRo Schiffes untersucht worden, das als DFDS Schiff bezeichnet wurde. Dabei sind zwei Versuchsserien mit dem Schiffsmodell als Einschrauber und als Zweischauber absolviert worden.

Letztlich kam der Entwurf eines mittelgroßen Passagierschiffs im Rahmen von SinSee zum Einsatz, das den Namen „SinBad“ erhielt. Dieses Schiff wurde eigens für das Forschungsvorhaben entworfen, wobei bewusst unvorteilhafte Entwurfsmerkmale eingesetzt wurden, um deutliche Schiffsreaktionen in schwerer See hervorzurufen.

Die drei neu herzustellenden Modelle wurden aus GfK in unterschiedlichen Maßstäben gefertigt, die bereits vorhandenen Modelle wurde derart modifiziert, dass sie den Anforderungen der weiterentwickelten Versuchstechnik gerecht wurden. Die Länge zwischen den Loten lag bei allen Modellen zwischen 5,0 m und 5,6 m.

Die Schiffe wurden bis zur Wetterdeckhöhe wasserdicht gebaut. Deckshäuser, Schanzkleider oder andere wichtige Aufbauteile wie z.B. die Back wurden maßstäblich nachgebildet.

Um die Messung der globalen, auf die Modelle wirkenden Kräfte und Momente ermitteln zu können, wurden sämtliche Modelle in einer geteilten Bauweise ausgeführt. Zu diesem Zweck wurden jeweils wasserdichte Vor- und Hinterschiffsmodellteile hergestellt. Die Modellteilung befand sich jeweils mittig zwischen vorderem und hinterem Lot, wobei die in Spantebene befindliche Trennfuge eine Breite von 10 mm aufwies. Zur Feststellung der auf das Modell wirkenden Kräfte sind die beiden Modellhälften mit einer 6-Komponenten Kraftmesswaage verbunden worden.

Neben der Einhaltung sämtlicher geometrischer Schiffsdaten kam der Bestimmung der Massenträgheitseigenschaften der Modellteile eine besondere Bedeutung bei. Da zur Bestimmung der hydrodynamischen Lasten eine Korrektur der gemessenen Kräfte und Momente um die Massenträgheitsanteile des Modells vorzunehmen war, sind die Massenträgheitseigenschaften sämtlicher Modellteile exakt bestimmt worden. Dabei sind die Massenträgheitsradien der leeren Rumpfschalen um die vertikale Hochachse und die horizontal Querachse zunächst durch einen Ausschwingversuch festgestellt worden. Nachfolgend wurde eine detaillierte Gewichtsrechnungen unter Einbeziehung sämtlicher Ausrüstungskomponenten erstellt und die zugehörigen Massenträgheitsradien berechnet.

Der Ursprung der schiffsfesten, rechtshändigen Koordinatensysteme lag bei allen Modellen in der Hauptspantebene, auf Mitte Schiff und in Höhe der Basis. Die positive Orientierung der Koordinatenachsen weist jeweils nach vorne, nach backbord und nach oben.

Alle Modelle wurden jeweils auf einem gleichlastigen Tiefgang untersucht. Ein Teil des in den Modellen befindlichen Ballastes konnte in verschiedenen Höhenlagen montiert werden, so daß auf einfache Weise verschiedene Werte für die Schwerpunkthöhen bzw. metazentrische Höhe eingetrimmt werden konnten.

Die resultierenden Werte für die metazentrische Höhe GM wurden jeweils mit Hilfe von Krängungsversuchen bestimmt. Darüber hinaus wurden für jeden Ladefall Rollausschwingversuche in glattem Wasser durchgeführt und die Rolleigenperioden  $T_{\phi}$  gemessen.

Die Abbildungen 1 bis 15 des Berichtsanhangs zeigen neben dem Spantenriss perspektivische Ansichten der Vor- und Hinterschiffe aller fünf Schiffsentwürfe.

## 2.1.1 Modellbeschreibung

Die wichtigsten Schiffs- bzw. Modelldaten des C-Box Entwurfs sind der nachfolgenden Datentabelle zu entnehmen.

		C-Box	
Schiffstyp		4029	
HSVA Modell Nr.		1 : 29	
Maßstab			
		Schiffsdaten	Modelldaten
Länge zwischen den Loten	[m]	145.75	5.026
Breite	[m]	23.60	0.814
Tiefgang	[m]	9.00	0.310
Verdrängung	[m <sup>3</sup> ]	22892	0.939
LCB	[m]	71.59	2.469
VCB	[m]	4.79	0.165
$C_W$	[-]		0.8701
$C_B$	[-]		0.7395
$C_M$	[-]		0.9930
KM	[m]	10.10	0.348
$i_{YY}$	[m]	37.21	1.283

Tabelle 2.1: Hauptdaten des C-Box Schiffstyps

Das Modell der C-Box wurde bei fünf verschiedenen Höhenlagen des Gewichtsschwerpunktes untersucht. Aus den zusammengehörigen Werten für GM und  $T_\phi$  wurden die Massenträgheitsradien um die Schiffslängsachse  $i_{xx}$ , die jeweils hydrodynamische Massenträgheitsanteile enthalten, rechnerisch ermittelt.

Die untersuchten Werte für GM,  $T_\phi$  und  $i_{xx}$  sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt:

C-Box	Schiffsdaten			Modelldaten		
	GM [m]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	GM [mm]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]
	1,49	15.5	9.45	51.5	2.9	0.326
	0.84	23.6	10.83	29.1	4.4	0.373
	0.63	28.0	11.04	21.6	5.2	0.381
	0.52	33.4	11.96	17.8	6.2	0.412
	0.42	47.4	15.26	14.4	8.8	0.526

Tabelle 2.2: Kennwerte der untersuchten Ladefälle für die C-Box

## 2.1.2 Modelldatenblatt UND RoRo Schiff

Die wichtigsten Schiffs- bzw. Modelldaten des UND RoRo Schiffes sind der nachfolgenden Datentabelle zu entnehmen.

		UND RoRo	
		Schiffsdaten	Modelldaten
Schiffstyp		4030	
HSVA Modell Nr.		1 : 34	
Maßstab			
Länge zwischen den Loten	[m]	182.39	5.364
Breite	[m]	26.00	0.765
Tiefgang	[m]	7.20	0.212
Verdrängung	[m <sup>3</sup> ]	20927.3	0.532
LCB	[m]	84.04	2.472
VCB	[m]	4.06	0.119
$C_W$	[-]	0.8312	
$C_B$	[-]	0.6129	
$C_M$	[-]	0.9290	
KM	[m]	12.99	0.382
$i_{YY}$	[m]	42.50	1.250

Tabelle 2.3: Hauptdaten des UND RoRo Schiffes

Die untersuchten GM-Werte, die zugehörigen Rolleigenperioden sowie die daraus resultierenden Massenträgheitsradien sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

UND RoRo	Schiffsdaten			Modelldaten		
	GM [m]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	GM [mm]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]
	2.25	13.6	10.16	66.2	2.3	0.299
	1.39	19.0	11.14	40.9	3.3	0.328
	1.28	19.8	11.18	37.7	3.4	0.329
	1.15	21.8	11.61	33.7	3.7	0.341

Tabelle 2.4: Kennwerte der untersuchten Ladefälle für das UND RoRo Schiff

## 2.1.3 Modelldatenblatt DFDS RoRo Einschrauber

Die wichtigsten Schiffs- bzw. Modelldaten der Einschraubervariante des DFDS RoRo Schiffes sind der nachfolgenden Datentabelle zu entnehmen.

Schiffstyp		DFDS Einschrauber	
HSVA Modell Nr.		4268-1001	
Maßstab		1 : 34	
		Schiffsdaten	Modelldaten
Länge zwischen den Loten	[m]	189.69	5.579
Breite	[m]	26.50	0.779
Tiefgang	[m]	7.30	0.215
Verdrängung	[m <sup>3</sup> ]	21067.7	0.536
LCB	[m]	87.00	2.559
VCB	[m]	4.11	0.121
$C_W$	[-]		0.8013
$C_B$	[-]		0.5741
$C_M$	[-]		0.9610
KM	[m]	14.01	0.412
$i_{YY}$	[m]	51.00	1.500

Tabelle 2.5: Hauptdaten des DFDS Einschraubers

Die untersuchten GM-Werte, die zugehörigen Rolleigenperioden sowie die daraus resultierenden Massenträgheitsradien sind in Tabelle 2.6 zusammengefasst.

DFDS Einschrauber						
Schiffsdaten			Modelldaten			
GM [m]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	GM [mm]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	
1.58	19.2	12.03	46.5	3.3	0.354	
1.42	20.4	12.12	41.8	3.5	0.357	
1.24	22.7	12.62	36.5	3.9	0.371	
1.09	26.8	13.98	32.2	4.6	0.411	

Tabelle 2.6: Kennwerte der untersuchten Ladefälle für das DFDS Einschraubers

## 2.1.4 Modelldatenblatt DFDS RoRo Zweischrauber

Die wichtigsten Schiffs- bzw. Modelldaten der Zweischraubervariante des DFDS RoRo Schiffes sind der nachfolgenden Datentabelle zu entnehmen.

		DFDS Zweischrauber	
		4268-1011	
Schiffstyp		1 : 34	
HSVA Modell Nr.			
Maßstab			
		Schiffsdaten	Modelldaten
Länge zwischen den Loten	[m]	189.69	5.579
Breite	[m]	26.50	0.779
Tiefgang	[m]	7.30	0.215
Verdrängung	[m <sup>3</sup> ]	20665.1	0.526
LCB	[m]	87.94	2.586
VCB	[m]	4.15	0.122
$C_W$	[-]		0.7977
$C_B$	[-]		0.5632
$C_M$	[-]		0.9610
KM	[m]	14.18	0.417
$i_{YY}$	[m]	50.59	1.488

Tabelle 2.7: Hauptdaten des DFDS Zweischraubers

Die untersuchten GM-Werte, die zugehörigen Rolleigenperioden sowie die daraus resultierenden Massenträgheitsradien sind in Tabelle 2.8 zusammengefasst.

DFDS Zweischrauber						
Schiffsdaten			Modelldaten			
GM [m]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	GM [mm]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	
1.63	19.7	12.52	47.8	3.4	0.368	
1.27	23.8	13.37	37.4	4.1	0.393	
1.08	27.6	14.27	31.7	4.7	0.420	

Tabelle 2.8: Kennwerte der untersuchten Ladefälle für das DFDS Zweischraubers

## 2.1.5 Modelldatenblatt SinBad

Die wichtigsten Schiffs- bzw. Modelldaten des SinBad Passagierschiffes sind der nachfolgenden Datentabelle zu entnehmen.

		SinBad Passagierschiff	
Schiffstyp		4269	
HSVA Modell Nr.		1 : 29	
Maßstab			
		Schiffsdaten	Modelldaten
Länge zwischen den Loten	[m]	156.00	5.379
Breite	[m]	28.00	0.966
Tiefgang	[m]	6.00	0.207
Verdrängung	[m <sup>3</sup> ]	14937.3	0.612
LCB	[m]	73.505	2.535
VCB	[m]	3.386	0.117
$C_W$	[-]		0.8082
$C_B$	[-]		0.5700
$C_M$	[-]		0.9260
KM	[m]	16.305	0.562
$i_{YY}$	[m]	39.411	1.359

Tabelle 2.9: Hauptdaten des SinBad Passagierschiffes

Das SinBad Schiffsmodell wurde mit nur einem GM-Wert getestet. Die zugehörige Rolleigenperiode sowie der daraus resultierende Massenträgheitsradius sind in Tabelle 2.10 gegeben.

SinBad Passagierschiff						
Schiffsdaten			Modelldaten			
GM [m]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	GM [mm]	$T_\phi$ [s]	$i_{xx}$ [m]	
2.20	17.5	12.93	75.9	3.3	0.446	

Tabelle 2.10: Kennwerte des untersuchten Ladefalls für das SinBad Passagierschiff

## 2.2 6-Komponenten Kraftmesswaage

Ein Kernpunkt des SinSee Vorhabens betraf die Messung globaler Seegangslasten an den verschiedenen Modellen. Zu diesem Zweck war eine spezielle Kraftmesswaage zu konzipieren, konstruieren und herzustellen, welche die folgenden Anforderungen zu erfüllen hatte:

- Messmöglichkeit von Längs-, Quer-, und Vertikalkräften zwischen den beiden Modellhälften
- Erfassung von Momenten um die Längs-, Quer-, und Vertikalachse des Schiffsmodells
- Ausführung der Waage als komplett wasserdichte Konstruktion
- Montagemöglichkeit der Waage auf allen zu untersuchenden Modellen
- Notwendigkeit einer möglichst leichten und dennoch steifen Konstruktion

Zu Beginn des Vorhabens wurde eine Herstellung der Kraftmesswaage durch ein auf dem Gebiet der Meßtechnik spezialisiertes Unternehmen angestrebt. Diesbezüglich sind Planungsgespräche mit den Firmen Kistler Instrumente GmbH und Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH durchgeführt worden. Nachdem die genannten Firmen kein Komplettsystem mit den komplexen Anforderungen an die Meßtechnik anbieten konnten, wurde die Meßwaage in Eigenfertigung durch die HSVA hergestellt.

Die konstruktive Ausführung der Kraftmesswaage ist durch zwei horizontal liegende Waagenrahmen gekennzeichnet. Jeder einzelne Rahmen ist jeweils mit nur einer Modellhälfte verbunden. Die zwischen den Modellhälften wirkenden Kräfte und Momente werden aus sechs Kraftmessdosen ermittelt, welche die beiden Waagenrahmen miteinander verbinden. Durch die zweckmäßige Anordnung der Kraftmessdosen (ein Messglied in Schiffslängsrichtung, zwei Messdosen quer zur Fahrtrichtung sowie drei Elemente in vertikaler Richtung) lassen sich alle sechs gewünschte Kräfte und Momente aus den Einzelsignalen der Messglieder rechnerisch ermitteln. Die am Modell montierte Kraftmesswaage ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

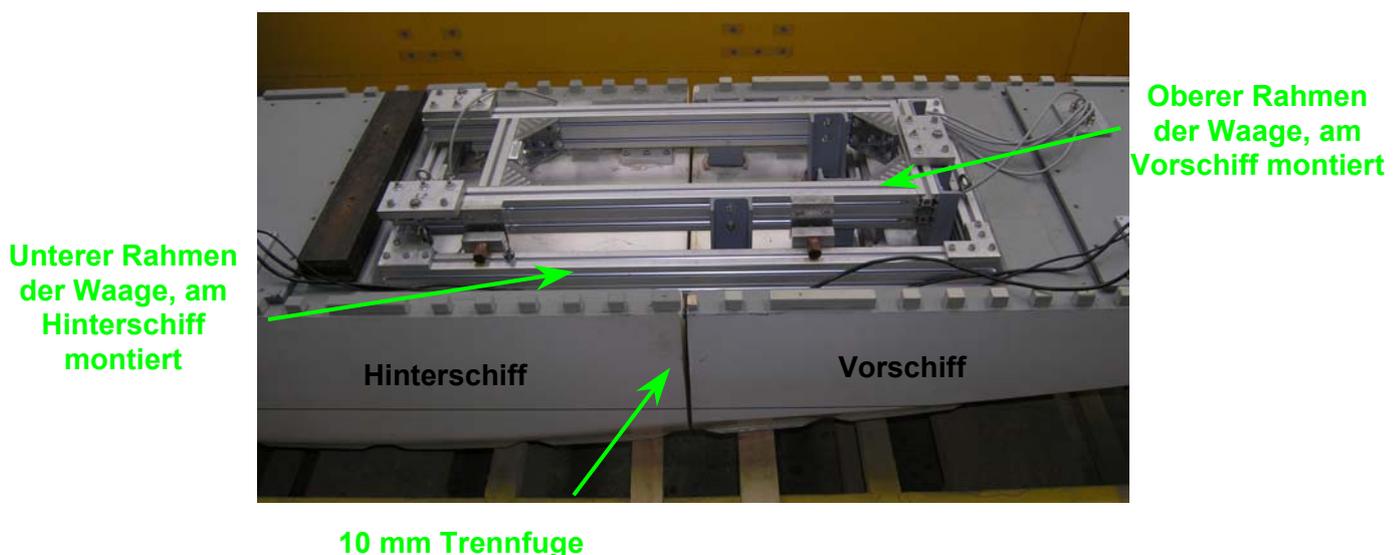


Abbildung 2.1: Mittschiffsbereich eines Modells mit Kraftmesswaage.

Zur Erfassung der am frei fahrenden Schiffsmodell wirkenden Kräfte und Momente ist die vorhandene Meßtechnik im Rahmen des Forschungsvorhabens erweitert worden. Somit konnten die Signale der sechs Kraftmessdosen während der Modellversuche zeitsynchron aufgezeichnet werden. Die globalen Schnittkräfte und – Momente wurden dann nach Versuchsende rechnerisch ermittelt und ausgewertet.

Vor Beginn der Kraftmessungen erfolgte eine sorgfältige Kalibrierung des Meßgeräts, in der die Kalibrierwerte der einzelnen Meßdosen ermittelt und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Signalen bestimmt wurden.

### 2.3 Experimentelle Ermittlung der wirksamen Rolldämpfungskoeffizienten

Ein Ziel des BMBF-Verbundvorhabens SinSee besteht darin, numerische Verfahren zur Simulation der Schiffsbewegungen weiter zu entwickeln und mit Hilfe von Modellversuchsergebnissen zu validieren. Hierfür ist es wichtig, das Rollverhalten der Schiffe eingehend zu untersuchen und nachfolgend korrekt numerisch zu modellieren.

Rollbewegungen von Schiffen werden durch nichtlineare Rückstellkräfte infolge von Wellenabstrahlung und verschiedenen viskosen Effekten gedämpft. Dämpfende viskose Effekte sind Reibungskräfte an der Schiffsaußenhaut und vor allem Wirbelablösungen an Rumpf, Schlingerkielen und Anhängen. Die Rolldämpfung von Schiffen steigt mit zunehmender Fahrtgeschwindigkeit stark an, da zusätzliche dämpfende Auftriebskräfte an Anhängen, z.B. Rudern, Wellenböcken, oder Stabilisatorflossen, auftreten. Darüber hinaus wirken am fahrenden Schiff weiterhin dämpfende Kräfte aufgrund von Schräganströmungen des Rumpfes, die sich aus der Überlagerung der in Längsschiffsrichtung wirkenden Fahrtgeschwindigkeitskomponente und der aus Rollbewegungen resultierenden Queranströmung des Rumpfes bilden.

Um die Zielsetzung der FSG zu erreichen, nach Weiterentwicklung der numerischen Simulationswerkzeuge auch quantitative Aussagen über Schiffsbewegungen in schwerer See treffen zu können, ist eine genaue Kenntnis der wirksamen Rolldämpfung der fünf untersuchten Schiffe für die Validierung der Rechenergebnisse unerlässlich. Daher wurden mit allen Modellen ausführliche Rolldämpfungsversuche durchgeführt, um nicht auf ungenauere Rolldämpfungsbeiwerte von Vergleichsschiffen zurückgreifen zu müssen.

Alle Modelle wurden im Rahmen der Rolldämpfungsversuche bei gleichlastigem Tiefgang untersucht. Die Massenschwerpunkte der Modelle sind durch Höhenverlagerung der Ballastmassen eingestellt und die metazentrische Höhe GM mit einem Krängungsversuch ermittelt worden. Zur Bestimmung der zugehörigen Rolleigenperioden  $T_\phi$  sind vor Versuchsbeginn zusätzlich Rollauschwingversuche in glattem Wasser absolviert worden. Mit den ermittelten Werten für GM und  $T_\phi$  wurden die Massenträgheitsradien um die Längsachse  $i_{xx}$  rechnerisch ermittelt, welche hydrodynamische Massenanteile enthalten.

Die im Rahmen der Rolldämpfungsversuche untersuchten Modellparameter sind in Tabelle 2.11 zusammengefaßt. Dabei ist anzumerken, dass geringfügige Abweichungen gegenüber den in Tabelle 2.1 bis 2.10 gegebenen Daten bestehen können, da die Modellausrüstung während der Rolldämpfungsversuche von dem Ausrüstungszustand während der Seegangversuche abwich.

		<b>C-Box</b>	<b>UND RoRo</b>	<b>DFDS RoRo</b> Einschrauber	<b>DFDS RoRo</b> Zweischrauber	<b>SinBad</b> Passagier- schiff
<b>GM</b>	[m]	0.58	1.80	1.47	1.50	2.20
<b>T<sub>φ</sub></b>	[s]	21.3	16.9	19.1	18.7	17.5
<b>i<sub>xx</sub></b>	[m]	8.08	11.27	11.54	11.41	12.90
<b>Lpp/ B</b>	[-]	6.18	7.02	7.16	7.16	5.57
<b>B/ T</b>	[-]	2.62	4.41	3.63	3.63	4.67
<b>C<sub>B</sub></b>	[-]	0.740	0.574	0.574	0.574	0.570
<b>ω<sub>0</sub><sup>2</sup>B/(2 g)</b>	[-]	0.105	0.184	0.147	0.153	0.185

Tabelle 2.11: Modellparameter während der Rolldämpfungsversuche.

Je nach Schiffsgeschwindigkeit kann die Rolldämpfung von Schlingerkielen den Großteil der Gesamtdämpfung eines Schiffes ausmachen. Schiffe werden demnach zu deutlich größeren Rollbewegungen angeregt, wenn keine Schlingerkiel vorhanden sind. Sollen vergleichende Simulationen für das Schiff mit und ohne Schlingerkiel durchgeführt werden, muß die rolldämpfende Wirkung der Anhänge mit Hilfe geeigneter Verfahren (z.B. nach Gadd) vorgenommen werden. Dabei gehen die Abmaße der Schlingerkiel, die für die untersuchten Schiffsmodelle in Tabelle 2.12 zusammen gestellt sind, in die Berechnungen ein. Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Schlingerkielanordnung einer Schiffseite, die aus mehreren Teilstücken bestehen kann.

	Schlingerkiel- teilstücke [-]	Gesamt- länge [m]	Schlinger- kielhöhe [m]	Schlingerkiel- Fläche [m <sup>2</sup> ]
<b>C-Box</b>	6	46.60	0.34	15.84
<b>UND RoRo</b>	6	56.60	0.43	24.34
<b>DFDS RoRo 1-Schrauber</b>	6	53.75	0.43	23.11
<b>DFDS RoRo 2-Schrauber</b>	6	53.75	0.43	23.11
<b>SinBad Passagierschiff</b>	2	41.30	0.34	14.13

Tabelle 2.12: Hauptdaten der Schlingerkiel.

Neben Antriebsanlage, Rudermaschine, Rumpfanhängen und Schlingerkielen waren die selbstangetriebenen freifahrenden Modelle jeweils mit einem Kreisel zur Messung des Rollwinkels ausgerüstet.

## 2.3.1 Versuchsbeschreibung

Zur Bestimmung der wirksamen Rolldämpfung wurden die Schiffmodelle während der Versuche mittels umlaufender Massen zu Rollbewegungen angeregt. Durch eine bekannte Masse  $m_E$  und den gewählten Hebelarm  $r_E$  ist das erregende Moment  $M_{Err}$  bekannt. Im statischen Fall stellt sich durch das Rollmoment  $M_{Err}$  ein Krängungswinkel  $\Phi_K$  am Modell ein. Während der Versuche wird das erregende Moment nun mit verschiedenen Frequenzen aufgebracht und die sich im Resonanzpunkt einstellende Rollwinkelamplitude  $\Phi_{Res}$  ermittelt.

Der Quotient aus dem statischen Rollwinkel  $\Phi_K$  und dem Resonanzrollwinkel  $\Phi_{Res}$  ergibt dann den gesuchten dimensionslosen Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung.

Für die Versuche wurden die Schiffmodelle mit einem Erregermechanismus ausgerüstet, der Rollmomente durch zwei gegenläufig rotierende Massen hervorruft. Die Massen sind jeweils an einem Hebelarm befestigte, der um die vertikale Mittschiffsachse dreht (siehe Abbildung 2.2).

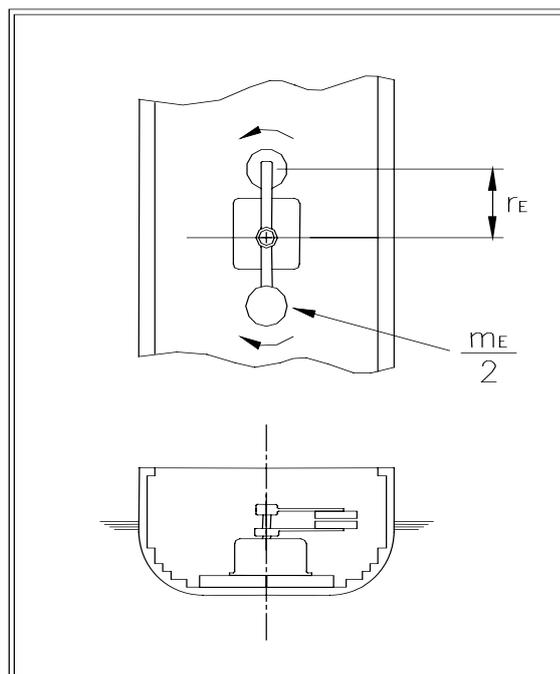


Abbildung 2.2: Prinzipskizze des Erregermechanismus für Rolldämpfungsversuche.

Der Erregermechanismus wurde immer so montiert, dass der gemeinsame Längenschwerpunkt beider Massen im Verdrängungsschwerpunkt lag. Da sich die umlaufenden Massen, bedingt durch die Bauart der Modelle, immer oberhalb der Rollträgheitsachse befanden, wirkte neben dem primären, durch Gravitationskräfte hervorgerufenen Rollmoment noch zusätzliche Fliehkraftanteile, die bei der Auswertung der Versuche korrigiert wurden.

Die Rolldämpfung von Schiffen verhält sich nichtlinear, d.h. mit wachsenden Resonanzrollwinkeln  $\Phi_{\text{Res}}$  nimmt die wirksame Rolldämpfung im allgemeinen zu. Daher sind zur Erfassung der Nichtlinearität Versuche mit verschiedenen großen Erregungsmomenten und damit mit verschiedenen großen Resonanzrollwinkeln durchzuführen. Durch eine gezielte Wahl von Massen und Hebelarmen sind für die verschiedenen Schiffsmodele jeweils vier verschiedene Rollmomente eingestellt worden, die zu Resonanzamplituden zwischen ca.  $5^\circ$  bis  $20^\circ$  führten. Zur Ermittlung der gesuchten Rollresonanzkurven und der Bestimmung der jeweiligen Resonanzspitze ist die Drehzahl der rotierenden Massen während der Versuche stufenlos geregelt worden.

### 2.3.2 Versuchsdurchführung

Die Rolldämpfungsversuche wurden im großem Schlepptank der HSVA mit den freifahrenden Modellen durchgeführt. Dabei wurden die Modelle durch einen Rudergänger gesteuert, der sich auf einem an der Vorderseite des Schleppwagens angeordneten Querwagen befindet. Zur Energieversorgung und Messwertübertragung war jedes Modell durch flexible Kabel mit dem Schleppwagen verbunden. Die Kabel werden über einen Ausleger am Querwagen von oben zum Modelle geführt. Während der Versuche werden Haupt- und Querwagen dem Modell nachgefahren, so dass die Kabel immer senkrecht über dem Modell hängen und die Modellbewegungen praktisch nicht beeinflussen.

Im Rahmen der SinSee Rolldämpfungsversuche sind alle Modelle ohne Geschwindigkeit sowie bei drei Fahrtgeschwindigkeiten untersucht worden. Die jeweils zu untersuchenden Geschwindigkeiten wurden dabei vor Beginn der eigentlichen Rollversuche durch Einstellen der Propellerdrehzahl im glatten Wasser eingefahren. Alle nachfolgenden Rollversuche fanden dann bei konstanten Propellerdrehzahlen statt.

Weiterhin wurde vor Versuchsbeginn durch sehr langsames Drehen des Erregermechanismus die sich einstellenden statischen Krängungswinkel  $\Phi_{\text{Stat}}$  für die verschiedenen erregenden Momente ermittelt.

Während der Rolldämpfungsversuche hielt der Rudergänger das fahrende Modell durch kleine Ruderkorrekturen auf Kurs. Die umlaufenden Massen regten das Modell zu Rollbewegungen an, die kontinuierlich gemessen wurden. Durch schrittweise Variation der Erregerfrequenz in der Nähe der Resonanzspitze, also im Bereich der Rolleigenfrequenz des Modells, ist je Erregungsmoment und Schiffsgeschwindigkeit eine Resonanzkurve ermittelt worden.

## 2.3.3 Versuchsauswertung

Anhand der aufgemessenen Resonanzkurven erfolgte eine Bestimmung der maximalen Rollwinkelamplituden im Resonanzpunkt und der zugehörigen Resonanzfrequenzen. Nachfolgend wurden die dimensionslosen Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung berechnet.

Darüber hinaus ist die bei jeder einzelnen Versuchsfahrt erreichte mittlere Schiffsgeschwindigkeit ermittelt worden. Durch die erzwungenen Rollbewegungen kam es zu teilweise deutlichen Geschwindigkeitsverlusten gegenüber den ungestörten Glattwasserfahrten. Diese können sowohl auf einen vergrößerten Schiffswiderstand als auch auf verschlechterte Propulsionseigenschaften der rollenden Schiffe zurückgeführt werden. Je nach Schiffstyp und Erregungsmoment wurden im Vergleich zu den ungestörten Glattwasserfahrten Geschwindigkeitsreduktionen von bis zu 2 Knoten gemessen.

Das erregende Moment entsteht hauptsächlich durch die Gravitationskraft. An beiden Massen wirken aber auch Fliehkräfte, die aufgrund der gegenläufig rotierenden Hebelarme eine immer querschiffs gerichtete Resultierende haben. Liegt der gemeinsame Schwerpunkt beider Massen nicht in der Rollträgheitsachse des Schiffes bewirkt diese Querkraft zum rein statischen Moment  $M_{Stat}$  ein zusätzliches Moment  $M_{Fl}$  mit dem Hebel  $h_{FL}$ . Der Hebel  $h_{FL}$  ist der Abstand der Rollträgheitsachse zur Wasserlinie. Damit läßt sich die erregende Momentenamplitude  $M_A$  mit der Resonanzkreisfrequenz  $\omega_{Res}$  wie folgt angeben:

$$\begin{aligned} M_A &= M_{Stat} + M_{Fl} \\ &= 2 \left( r_E m_E g + h_{Fl} \omega_{Res}^2 r_E m_E \right) \\ &= M_{Stat} \left( 1 + h_{Fl} \frac{\omega_{Res}^2}{g} \right) \end{aligned}$$

dazu analog für die Rollwinkel

$$\Phi_K = \left( 1 + \frac{\Phi_{Fl}}{\Phi_{Stat}} \right)$$

Liegt die Rollträgheitsachse unterhalb des gemeinsamen Schwerpunkts beider Massen vergrößert sich die Amplitude  $M_A$  des erregenden Momentes um den Fliehkraftanteil  $M_{Fl}$ . Liegt sie dagegen oberhalb des Schwerpunkts reduziert sich die Amplitude um den Fliehkraftanteil. Der Fliehkraftanteil wurde in der Auswertung gegebenenfalls berücksichtigt, wenn die Rollträgheitsachse – bestimmt in einem Ausschwingversuch mit kleinem Rollwinkel – nicht im Schwerpunkt lag. Er lag zwischen 0 und 10 Prozent.

## 2.3.4 Ergebnisse der Rolldämpfungsuntersuchungen

Mit Hilfe dieser Modellversuche wurden für alle fünf untersuchten Schiffe die dimensionslosen Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Resonanzrollwinkeln ermittelt. Zunächst wird hier der dimensionslose Koeffizient der wirksamen Rolldämpfung theoretisch hergeleitet.

Ausgehend von der Differentialgleichung der ungekoppelten linearisierten Rollbewegung

$$A_{\phi\phi} \ddot{\Phi} + B_{\phi\phi} \dot{\Phi} + C_{\phi\phi} \Phi = M_{ERR}(t)$$

mit  $A_{\phi\phi} = \rho V i_{\phi}^2 + m''_{\phi\phi}$

$$B_{\phi\phi} = N_{eff}$$

$$C_{\phi\phi} = \rho g V \overline{GM}$$

und  $M_{ERR}(t) = M_A e^{i(\omega t + \varepsilon)}$

$$\Phi(t) = \Phi_A e^{i\omega t}, \quad \dot{\Phi}(t) = \Phi_A i \omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{\Phi}(t) = -\Phi_A \omega^2 e^{i\omega t}$$

läßt sich der Koeffizient der wirksamen Rolldämpfung  $N_{eff}$  ermitteln. Im Resonanzfall stehen Trägheitsglied und Rückstellglied im Gleichgewicht, d.h. sie ergeben zusammen null. Damit müssen Dämpfungsglied und Erregung in Phase und gleich groß sein.

$$N_{eff} \dot{\Phi} = M_{ERR}(t)$$

$$N_{eff} \Phi_{Res} i \omega e^{i\omega t} = M_A e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

mit  $\omega = \omega_0$  (Rolleigenfrequenz) und  $\varepsilon = \pi/2$  ergibt sich daraus

$$\omega_0 N_{eff} \Phi_{Res} = M_A$$

Die Amplitude des erregenden Momentes  $M_A$  läßt sich durch den Krängungswinkel  $\Phi_K$  ausdrücken, den ein statisches Moment gleicher Größe erzeugen würde.

$$M_A = \rho g V \overline{GM} \Phi_K$$

Eingesetzt erhält man die folgende Gleichung für den Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung:

$$N_{eff} = \frac{\rho g V \overline{GM}}{\omega_0} \frac{\Phi_K}{\Phi_{Res}}$$

Der Quotient  $\Phi_K / \Phi_{Res}$  ist demnach der dimensionslose Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung.

Durch die in den Rollversuchen ermittelten Werte kann der dimensionslose Dämpfungskoeffizient für die untersuchten Geschwindigkeiten und Resonanzrollwinkel zwischen 5° und 20° leicht bestimmt werden. Der Resonanzrollwinkel  $\Phi_{Res}$  wird aus den aufgemessenen Resonanzkurven abgelesen und der Krängungswinkel  $\Phi_K$  wird aus dem gemessenen statischen Krängungswinkel  $\Phi_{Stat}$  und gegebenenfalls dem Fliehkraftanteil bestimmt. Somit ist die Rolldämpfungscharakteristik der untersuchten Schiffe bekannt und kann in den numerischen Simulationsprogrammen berücksichtigt werden.

Streng genommen gelten die ermittelten Werte nur für die in den Versuchen ermittelten Rolleigenfrequenzen, ausgedrückt durch den dimensionslosen Frequenzparameter

$$\omega_0^2 \frac{B}{2g}$$

Der Einfluß leicht abweichender Frequenzparameter auf die Rolleigendämpfung der Schiffe kann aber als gering angenommen werden.

Im Anhang zum vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse der Rolldämpfungsversuche in Abbildung 16 bis 25 in Form von Diagrammen zusammengefaßt. Dabei finden sich für jeden untersuchten Schiffstyp vier Diagramme mit den bei vier verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten gemessenen Rollwinkelamplituden. Darüber hinaus sind jeweils zwei Diagramme abgebildet, in denen die dimensionslosen Rolldämpfungsbeiwerte dargestellt sind.

### 2.3.5 Vergleich der Rolldämpfungscharakteristiken

Die Rolldämpfungsversuche wurden für alle untersuchten Schiffstypen in der selben Form durchgeführt, so daß sich die Rolldämpfungseigenschaften der verschiedenen Entwürfe direkt miteinander vergleichen lassen. Die Rolldämpfungscharakteristiken lassen sich dabei besonders anschaulich anhand der Diagramme vergleichen, in denen die dimensionslosen Rolldämpfungskoeffizienten für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten als Funktion des Resonanzrollwinkels aufgetragen sind.

Betrachtet man die Rolldämpfungseigenschaften der untersuchten Schiffe ohne Fahrtgeschwindigkeit, so weisen die drei RoRo Schiffe relativ ähnlich Charakteristiken auf. Die Rolleigendämpfung aller RoRo Schiffe steigt dabei mit zunehmendem Resonanzrollwinkel deutlich an. Die Dämpfungsbeiwerte bei 20 Grad Rollwinkel entsprechen hierbei etwa 175 bis 215 Prozent des jeweiligen Wertes für 10 Grad Rollwinkel. Ein Vergleich der RoRo Schiffe mit dem C-Box und dem SinBad Modell zeigt darüber hinaus, daß der C-Box Entwurf absolut größere Dämpfungsbeiwerte aufweist, während das SinBad Fahrgastschiff eine deutlich geringere Dämpfung besitzt als die drei RoRo Schiffe. Interessant ist dabei auch, daß die C-Box den stärksten Rolldämpfungszuwachs mit ansteigenden Rollwinkeln aufweist, während der SinBad Entwurf den geringsten Anstieg an Rolldämpfung von allen untersuchten Schiffen zeigt.

Betrachtet man weiterhin den Einfluß der Fahrtgeschwindigkeit auf die Rolldämpfungseigenschaften der verschiedenen Schiffsentwürfe, so ist bei allen Schiffen ein deutlicher Anstieg der Dämpfungskoeffizienten mit zunehmender Fahrt festzustellen. Interessant ist dabei wiederum, daß die Rolleigendämpfung der Schiffe in der Regel auch bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten noch mit ansteigenden Rollwinkeln zunimmt. Am ausgeprägtesten ist diese Eigenschaft beim C-Box Entwurf. Lediglich der SinBad Entwurf weist das beschriebene Verhalten nicht auf. Dies bedeutet, daß die Rolldämpfung des mit 20 Knoten fahrenden Schiffes bei zunehmenden Rollwinkeln abnimmt, was als ungünstiges Seegangscharakteristikum gewertet werden kann.

Weiterhin ist anzumerken, daß sich in Rahmen der Rolldämpfungsuntersuchung des SinBad Modells ein untypisches Phänomen einstellte, das bei den Vergleichsschiffen nicht beobachtet werden konnte. Es bestand darin, daß bei dem SinBad Modell in einem speziellen Frequenzbereichen zwei unterschiedliche Rollwinkelamplituden hervorgerufen werden konnten.

Dieser Effekt trat bei Versuchen mit einem relativ großen erregendem Rollmoment auf, wobei das Schiff keine Vorausgeschwindigkeit machte. Im Rahmen der Versuche wurde die Erregungsperiode wie gewöhnlich schrittweise vergrößert, was zunächst zu kontinuierlich steigenden Rollwinkelamplituden führte. Nachdem Rollwinkelamplituden in der Größenordnung von etwa 33 Grad erreicht waren, konnte dann beobachtet werden, dass eine weitere geringfügige Vergrößerung der Erregungsperiode zu einem extrem reduzierten Rollwinkel von nur etwa 5 Grad führte. Nachdem sich die Rollbewegungen nun auf den geringen Niveau befanden, stellten sich dann bei weiterhin schrittweise vergrößerten Erregungsperioden nur Veränderungen des Rollwinkels in gewohnter Größenordnung ein.

Bemerkenswert ist nun, dass eine Reduktion der Erregungsperioden ausgehend von dem kleinen Rollwinkelniveau möglich war, obwohl in dem selben Frequenzbereich zuvor deutlich größere Rollwinkel erreicht wurden. Dabei konnte wiederum beobachtet werden, dass es beim Unterschreiten einer speziellen Erregungsperiode zu einem sprunghaften Anstieg des Rollwinkels auf das zuvor festgestellte hohe Niveau kam.

Der beschriebene Effekt stellt ein stark instabiles Rollverhalten des Schiffes ohne Vorausgeschwindigkeit dar, da deutlich unterschiedliche Schiffsreaktionen auf ein und dieselbe Erregung auftreten können. Darüber hinaus konnte auch für das Schiff mit Fahrt ein unkontinuierlicher Verlauf der Rollreaktionen im Bereich der Rollresonanz festgestellt werden. Dabei verändern sich die hervorgerufenen Rollbewegungen bei geringfügig veränderten Erregungsperioden sprunghaft. Generell weist der SinBad Schiffsentwurf ein stark nichtlineares Rollverhalten auf.

## 2.4 Bestimmung von Bewegungen und globalen Seegangslasten im Rahmen von rechnergesteuerten Kenterversuchen

### 2.4.1 Weiterentwicklung der Versuchstechnik

Die bisher verwendete komplett rechnergesteuerte Modellversuchstechnik wurde detailliert im Rahmen des ROLL-S Forschungsvorhabens beschrieben. An dieser Stelle wird daher lediglich auf die weiterentwickelten Systemeigenschaften eingegangen.

Diese betreffen zunächst die der untersuchten Modelle. Die Messung der globalen, am Schiffshauptspant auftretenden Schnittkräfte und Momente erforderte die Verwendung von Schiffsmoellen in geteilter Bauart, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben.

Darüber hinaus, wurde das vorhandene Datenerfassungssystem derart erweitert, daß die Signale der sechs Kraftmessdosen in einem im Schiffsmoell integrierten Meßsystem erfaßt und weiterverarbeitet wurden. Neben dem verwendeten CAESAR Meßsystem war dabei eine weitere Funkverbindung in das Versuchssystem zu integrieren, welche die kabellose Übertragung der Meßsignale vom Moell zum Schleppwagenrechner ermöglichte.

Weiterhin ist eine Einrichtung zur optischen Erfassung des aktuellen Versuchszustands in den Versuchsaufbau integriert worden, die eine Synchronisation der Videoaufzeichnungen mit den parallel gemessenen Wellen-, Schiffs- und Schleppwagensignalen ermöglicht.

Eine weitere Verbesserung im Versuchsablauf wurde dadurch erreicht, daß eine Modellführung im Schlepptank montiert wurde, welche die Schiffsmoelle vor Versuchsstart exakt positionierte. Hierdurch konnte die Reproduzierbarkeit der Tests wiederum verbessert werden.

## 2.4.2 Versuchsdurchführung

In den durchgeführten Versuchen wurde die Reaktion eines frei fahrenden Schiffsmodells auf verschiedene vorgegebene Züge hoher Wellen gemessen. Dabei wurden regelmäßige Wellen, Ausschnitte aus unregelmäßigen Seegängen sowie Wellenpakete benutzt. Der erregende Wellenzug wie auch die resultierenden Schiffsbewegungen sind dann abhängig vom Schiffsort und der Zeit zu beschreiben. Die Entwicklung der Software zur Erzeugung linearer Wellenpakete, nichtlinearer steiler Wellenpakete und zur Überlagerung von stationärem Seegang mit einem Wellenpaket und deren Beschreibung erfolgte durch das Institut für Schiffs- und Meerestechnik (ISM) der TU Berlin.

Jede einzelne Versuchsfahrt gliedert sich in eine Anfahrphase, die eigentliche Meßphase und eine Endphase. Während der Anfahrphase wurde das Modell mittels der gewählten Propellerdrehzahl beschleunigt und auf einer vorgegebenen Bahn zur Startposition der Meßphase gesteuert. Bei Fahrten gegen die See wurde diese erste Phase zunächst in Glattwasser absolviert, sobald das Modell die entgegenkommenden Seegänge / Wellen erreicht hatte, reduzierte sich die Schiffsgeschwindigkeit im Seegang. Die Anfahrphase der Versuchsfahrten in achterlicher See erfolgte in gleicher Weise, jedoch stets in den bereits voll entwickelten Wellen / Seegängen.

Mit dem Erreichen der gewählten Startposition des zweiten Versuchsabschnitts begann die eigentliche Messung der Modellbewegungen und der globalen Lasten am Hauptspant. Gleichzeitig übernahm ein Kursregler die Kontrolle über die Rudermaschine und steuerte das Modell auf einem gewählten Kurs solange durch den Tank, bis ein kritische Abstand zur Tankwand erreicht wurde. Nach dem erforderlichen rechnergesteuerten Wendemanöver wurde der Versuch sodann auf dem Gegenkurs mit dem selben relativen Kurswinkel weitergeführt.

Die Meßphase endete schließlich mit dem Erreichen einer vorgegebenen Position im Tank. Während der sich anschließenden Endphase ist das Modell wiederum durch den Bahnregler in die Tankmitte manövriert worden. Die Versuchsfahrt endete mit dem Abbruch der rechnergesteuerten Prozeßkontrolle und dem somit antriebslosen Modell.

Die Untersuchung der Schiffsmodelle erfolgte sowohl in von vorne bzw. schräg von vorne einkommenden Seegängen (relative Kurswinkel zwischen  $\mu=180^\circ$  und  $\mu=150^\circ$ ) als auch in achterlicher bzw. schräg von achtern einkommender See ( $\mu$  zwischen  $0^\circ$  und  $30^\circ$ ).

Der Großteil der Modellversuche in von vorne einkommender See wurde unter relativen Kurswinkeln zwischen  $180^\circ$  und  $175^\circ$  absolviert, da in diesem Zustand insbesondere das Auftreten parametererregter Rollbewegungen zu untersuchen war. Die leichte Abweichung vom Kurs direkt gegen die See wurde dabei gewählt, um die Entstehung parametererregter Rollbewegungen durch eine leichte Unsymmetrie der am Schiff wirkenden hydrodynamischen Kräfte zu fördern.

Die Modellgeschwindigkeit wurde für die Versuche in von vorne und schräg von vorne einkommender See in Abhängigkeit von den untersuchten Wellen- / Seegangparametern und der eingestellten Metazentrischen Höhe derart gewählt,

daß sich Begegnungsperioden ergaben, die in etwa der halben Rolleigenperiode des Schiffes in Glattwasser entsprachen. Begegnungsperioden von einer Dauer der Rolleigenperioden der Modelle konnten während der Versuche in von vorne einkommender See nicht realisiert werden, da die zugehörigen Schiffsgeschwindigkeiten derart gering gewesen wären, daß eine Steuerfähigkeit der Modelle nicht gegeben wäre.

Bei der Fahrt in hohen achterlichen Seegängen ist die Schiffssicherheit in Bezug auf große Rollwinkel durch verschiedene Effekte gefährdet. Zum einen können auch hier große parametererregte Rollbewegungen auftreten, zum anderen kann alleine die Reduktion aufrichtender Hebelarme des sich auf einem Wellenberg befindlichen Schiffes eine Kentergefahr darstellen. Weiterhin können Schiffe durch Querschlagen nach dem Abreiten eines Wellenberges verloren gehen.

Im Rahmen der Modellversuche sind alle genannten Effekte durch eine geeignete Wahl der Modellgeschwindigkeit, des relativen Kurswinkels sowie der Wellen- / Seegangparameter in Abhängigkeit von den betrachteten Ladefällen untersucht worden. Dabei ist anzumerken, daß im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens erstmalig kritische Seegangs- und Fahrtzustände vor Versuchsbeginn durch die von der FSG entwickelte Seegangssimulationsmethode ermittelt wurden. Somit war es möglich, die Seegangseigenschaften der verschiedenen Schiffsentwürfe gezielt unter ungünstigen Seegangs- und Fahrtzuständen zu testen. Die aufwendige Suche nach kritischen Modellversuchszuständen, von denen eine Kentergefährdung ausgeht, konnte somit nennenswert reduziert werden.

### 2.4.3 Versuchsauswertung

Sämtliche während der Meßphase aufgezeichneten Meßdaten des Modells sind zunächst gefiltert worden, um störende Einflüsse auf die Meßsignale zu reduzieren. Hierfür kamen jeweils sechspolige Filter vom Typ Butterworth zur Anwendung. Die gemessenen Zeitreihen der Abweichungen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  der Modellposition von der gewählten Ausgangslage mittig vor dem Meßsystem sowie die Aufzeichnungen der Roll- und Gierwinkel  $\phi$  und  $\psi$  und der Kräfte wurden mit einem Tiefpassfilter bearbeitet. Die Meßdaten der Tauchbewegung  $z$  und des Stampfwinkels  $\theta$  wurden einer Bandpassfilterung unterzogen.

Mit Hilfe der zu jeder Zeit bekannten Position des Haupt- und Querwagens sind Zeitreihen der Kräfte und Momente sowie der absoluten Modellposition und -orientierung im Tank erstellt worden. Nachfolgend sind die Wellendaten in jedem Zeitschritt und für die jeweils zugehörige Modellposition vom ISM der TU Berlin berechnet und den aktuellen Bewegungsdaten zugeordnet worden.

## 2.4.4 Ergebnisse der Kenterversuche

Im Rahmen von rechnergesteuerten Modellversuchen wurden fünf Schiffe in schwerer See getestet. Neben der präzisen Erfassung der Modellposition im Tank erfolgte während aller Versuche die Messung globaler Kräfte und Biegemomente zwischen den beiden Modellhälften. Weiterhin sind alle Tests per Videoaufzeichnung dokumentiert worden, wobei eine zeitsynchrone Zuordnung von Bildmaterial und Meßwerten mittels rechnergesteuerter Lichtsignale möglich ist.

Folgende Versuchsserien wurden absolviert

### UND-RoRo

15. / 16.07.2003	Modellversuche in See von vorne
02. / 03.09.2003	Modellversuche in See von achtern

### C-Box

24.11.2003	Modellversuche in See von vorne
26.11.2003	Modellversuche in See von achtern

### DFDS-RoRo Zweischauber

11. / 12.03.2004	Modellversuche in See von vorne
15. / 16.03.2004	Modellversuche in See von achtern

### DFDS-RoRo Einschrauber

20. / 21.10.2004	Modellversuche in See von vorne
24. / 25.10.2004	Modellversuche in See von achtern

### SinBad

14. / 15.04.2005	Modellversuche in See von vorne
18. / 19.04.2005	Modellversuche in See von achtern

Während der Versuche kam es teilweise zu extremen Schiffsbewegungen und Kenterungen in achterlicher See. Neben Kenterungen durch parametrische Erregung (Schwankung des aufrichtenden Momentes) wurden bei einzelnen Schiffsmoellen auch Kenterungen auf Grund von Querschlagen und Stabilitätsverlust auf dem Wellenberg beobachtet.

Sämtliche Ergebnisse wurden ausgewertet und die gemessenen Zeitreihen den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Mittels der gewonnenen Meßdaten läßt sich der Einfluß der untersuchten Schiffsförmn auf das Bewegungsverhalten der Schiffe im Seegang gezielt studieren. Hierbei kann insbesondere die Kentergefährdung der einzelnen Schiffsentwürfe in schwerer See bewertet werden.

Für die Validierung numerischer Seegangsmethoden sind dabei nicht nur die Ergebnisse der Seegangmodellversuche von Interesse. Vielmehr spielen auch die ermittelten Rolldämpfungseigenschaften der einzelnen Schiffstypen eine entscheidende Rolle für die verläßliche Prognose der Schiffsbewegungen in schwerer See.

## 2.4.5 Neuronale Netze

Ein weiteres Hauptanliegen des Teilvorhabens bestand in der Konditionierung (Training) eines neuronalen Netzes mit Hilfe der bei den Modellversuchen gesammelten Messdaten. Dieser Teil wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin durchgeführt.

Sämtliche Daten (Seegang und Schiffsverhalten), die im Rahmen des Vorhabens ermittelt wurden, wurden in einem komplexen Datenbanksystem zusammengefasst. Diese Datenbank ist ergänzbar und wird durch das Training neuronaler Netze unter Zuordnung von Seegangparametern, Schiffsdaten und den zugehörigen Schiffsantworten ständig erweitert.

Als neuronales Netz bezeichnet man eine alternative Computerarchitektur, die Anregungen von der biologischen Struktur des menschlichen Gehirns aufgreift. Die Motivation entspringt der Fehlertoleranz biologischer Nervensysteme. Ein neuronales Netz enthält empfindliche Bauelemente analog den Nervenzellen, die durch Signale erregt werden können. Man spricht von der Lernphase bzw. Konditionierung (Training) des neuronalen Netzes. Bei der technischen Realisierung werden Neuronen, d.h. elektronische Schwellenwertelemente mit mehreren Eingängen und einem Ausgang verwandt. Die Bestimmung der Lernparameter reduziert den Abstand der eingetretenen Zustände vom gewünschten Endzustand (Ergebnis), d.h. eine vorgegebene Anzahl von Eingangsparametern führt über eine Art „Black Box“ zu einer vorgegebenen Anzahl von Ausgabeparametern.

Nach der Lernphase geht das neuronale Netz in die stabile Nutzungsphase über, d.h. es ist konditioniert. Berechnungen mit konditionierten neuronalen Netzen sind in der Regel sehr schnell, da nur relativ wenige Berechnungen durchgeführt werden müssen. Hierdurch wird es möglich, eine Vielzahl von Simulationen bzw. eine gezielte Variation einzelner Parameter durchzuführen.

Aus den Versuchsergebnissen sowie einer Vielzahl von Simulationen durch das neuronale Netz kann daraus ein abgesichertes Gefährdungskriterium entwickelt werden. Dieses Gefährdungskriterium erlaubt es, Schiffe entsprechend der Kartersicherheit einzuteilen und je nach Seegebiet und Wetterbedingungen Fahrempfehlungen auszusprechen.

Zu Beginn des Projektes bestand die Idee vom Anwender frei wählen zu lassen, wie viele und welche (der neun) Ausgabeparameter er haben möchte. Doch dies führte schnell zur Erkenntnis, dass das zu einer viel zu großen Anzahl (512 Möglichkeiten) von neuronalen Netzen führen würde. Diese Anzahl ist natürlich rein theoretisch, da sie auch Kombinationen enthält, die nicht sinnvoll sind, wie z.B. sich die maximale Amplitude ohne die zugehörige signifikante Amplitude berechnen zu lassen. Somit reduzierte sich die Anzahl der in der Praxis benutzten Ausgaben schon deutlich. Allerdings stand zu diesem Zeitpunkt noch nicht fest, ob die neuronalen Netze jedes Mal vor dem Benutzen kurzfristig trainiert oder alle Möglichkeiten schon zu einem früheren Zeitpunkt trainiert werden sollten. Dies beides führte dazu, dass die Ausgabekombinationen und somit auch die Anzahl der möglichen Netze fest vorgegeben wurde, so dass sich die Anzahl der Eingabeparameter stark reduzierte. Dadurch verminderte sich die Anzahl der Eingabeparameter auf acht. Eine weitere

Reduzierung war möglich, da für alle Versuche mit queranlaufenden Wellen die Geschwindigkeit immer null ( $F_n = 0$ ) ist. Deshalb kann dieser Eingabeparameter bei diesen Analysen weggelassen werden.

Die Prognosen für die zur Verfügung stehenden Daten führten insgesamt zu guten bis sehr guten Ergebnissen. Das Potential diese Ergebnisse wird dadurch weiter verbessert, dass durch Hinzufügen neuer Datensätze die Basis stets vergrößert wird und somit die Prognosequalität der Netze steigt. Ebenso ist es möglich, durch gezielte weitere Versuche, z.B. durch das Variieren der Parameter der Trainingsfunktionen, die durch diese Arbeit bestimmten neuronalen Netze noch zu verbessern.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SinSee entstand an der HSVA eine Diplomarbeit zum Thema: „Entwicklung und Training Neuronaler Netze zur Prognose des Seegangsverhaltens von Schiffen“ [17]. Für weitergehende Informationen wird auf diese Arbeit verwiesen.

## 2.5 Großausführungsmessungen

Im Rahmen des SinSee Teilvorhabens sind Langzeitmessungen an Bord des DFDS RoRo Schiffs „TOR MAGNOLIA“ ausgeführt worden. Dabei wurden verschiedene Schiffs- und Umweltdaten durch die HSVA gemessen und aufgezeichnet. Parallel dazu erfolgte eine Messung des Seegangs mittels der bordeigenen Radaranlage durch die Firma OceanWaves.

Die Großausführungsmessungen haben in dem Zeitraum vom 09.02. bis zum 30.04.2004 stattgefunden. Zu dieser Zeit war die „TOR MAGNOLIA“ im Liniendienst zwischen Schweden (Göteborg) und Großbritannien (Immingham) eingesetzt.

Folgende Daten wurden mittels einer kreiselstabilisierten Meßplattform der HSVA erfaßt:

- Roll, Stampf- und Gierwinkel
- Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigungen

Darüber hinaus sind folgende Größen aus dem bordeigenen Datensystem erfaßt worden.

- Datum und Uhrzeit
- Schiffsposition
- Wassertiefe
- Windgeschwindigkeit
- Schiffsgeschwindigkeit über Grund
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
- Kurswinkel
- Kurs
- Ruderwinkel

Die analogen Meßsignale der kreiselstabilisierten Plattform sind zunächst verstärkt

und nachfolgend durch einen AD Wandler digitalisiert worden. Hierfür wurde ein Hottinger Spider8 Meßverstärker verwendet. Die Signale wurden über ein parallele Schnittstelle an den IBM-kompatiblen Datenerfassungsrechner übergeben.

Die restlichen, im NMEA Format 0183 vorliegenden Daten sind mittels eines seriellen Multiplexers verarbeitet worden. Die Aufzeichnung erfolgte über eine serielle Schnittstelle an den Datenerfassungsrechner.

Die synchrone Aufzeichnung der Meßdaten erfolgt mittels zweier zeitgleich laufender Programme, die von der HSVA eignes für diese Aufgabenstellung entwickelt beziehungsweise konfiguriert wurden. Eine Speicherung der Daten erfolgte dabei regelmäßig in Dateien mit einer Meßdauer von 4 Stunden. Die Daten wurden jeweils parallel auf zwei Festplattenspeichern abgelegt, um die Gefahr eines Datenverlusts gering zu halten.

Sämtliche Meßdaten wurden den Partnern des Verbundvorhabens zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

## 2.6 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die enorme Leistungssteigerung der Computer gerade in den letzten Jahren führt dazu, dass immer effizientere numerische Verfahren zur Berechnung von Seegangsverhalten und Kentervorgängen bei Schiffen entwickelt werden. Dabei ist es notwendig, den Entwicklern zur Validierung ihrer Simulationsprogramme sehr genaue Meßdaten aus Versuchen zur Verfügung zu stellen.

Der hierfür erforderliche Ausbau und die nachhaltige Verbesserung der Modellversuchstechnik stellt dabei einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für die HSVA dar, da die interessierenden hydrodynamischen Wirkungen, die ein Schiff in schwerer See erfährt, nunmehr präzise und effizient studiert werden können. Gleichzeitig wird dabei auch die Grundlage geschaffen, durch die Weiterentwicklung der Simulationsprogramme in naher Zukunft noch effizientere Analysewerkzeuge für den wirtschaftlicheren Entwurf sicherer Schiffe einsetzen zu können. Dieser Aspekt kommt insbesondere der FSG zu Gute.

Das Erreichen des Projektziels, das die Messung globaler Seegangslasten betrifft, stellt einen weiteren wichtigen Gesichtspunkt dar, weil die Kenntnisse über die wirklich auftretenden Lasten in schwerem Seegang noch unvollständig sind. Die Kenntnis der im Seegang tatsächlich zu erwartenden Lasten versetzt insbesondere die Werften in die Lage, konstruktive Optimierungen durchzuführen und nicht ausschließlich auf empirische Lastannahmen angewiesen zu sein.

Weiterhin bedeutet auch die zeitsynchrone Videotechnik einen zusätzlichen Wettbewerbsvorteil, da die HSVA hierdurch in die Lage versetzt wird, die Wirkung extremer Seegangseffekte den Umgebungsbedingungen und den Schiffsreaktionen zeitlich zuzuordnen. Hierdurch können extreme Effekte klar zugeordnet und Gegenmaßnahmen gezielt ergriffen werden.

Mit der Einführung der neuronalen Netzwerktechnik ist im Rahmen des Forschungsvorhabens schließlich ein neuartiger Weg zur Lösung komplexer Fragestellungen beschritten worden. Nach der zukünftigen Erweiterung der Datenbasis kann diese Technik helfen, Modellversuche für den Kunden einzusparen und gute Seegangsprognosen für Schiffe verschiedener Bauart zu liefern.

## 2.7 Fortschritt der Forschungen auf dem Gebiet der Schiffssicherheit

Bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens weiterentwickelten rechnergesteuerten Modellversuchstechnik handelt es sich um eine nur durch die HSVA angewandte Methode. Vergleichbare Aktivitäten anderer Versuchsanstalten sind derzeit nicht bekannt.

Die Forschungsaktivitäten anderer Stellen betreffen in der Regel die rechnerische Prognose des Seegangsverhaltens von Schiffen oder die statistische Auswertung von Kentermodellversuchen.

## 2.8 Veröffentlichung der Forschungsergebnisse

Anlässlich der 25. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Hamburg, Juni 2006, wurde der Beitrag "Qualitative and quantitative validation of a numerical code for the realistic simulation of various ship motion scenarios" [14] veröffentlicht.

Anlässlich der 24. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Griechenland, Juni 2005, wurde der Beitrag "Validation of numerical motion simulations by direct comparison with time series from ship model tests in deterministic wave sequences" [18] veröffentlicht.

Anlässlich der 23. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Vancouver, Juni 2005 wurde der Beitrag "Nonlinear calculations of tailored wave trains for experimental investigations of extreme structure behaviour" [15] veröffentlicht.

Auf der 8<sup>th</sup> International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, STAB 2003, September 15-19, 2003, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid wurde der Beitrag "Innovative deterministic seakeeping test procedures" [16] veröffentlicht.

Darüber hinaus entstand an der HSVA eine Diplomarbeit zum Thema: „Entwicklung und Training Neuronaler Netze zur Prognose des Seegangsverhaltens von Schiffen“ [17].

### 3 Abbildungsverzeichnis Im Anhang

Abbildung 1: Spantenriss der C-Box  
Abbildung 2: Vorschiffsgeometrie der C-Box  
Abbildung 3: Hinterschiffsgeometrie der C-Box  
Abbildung 4: Spantenriss UND RoRo Schiffes  
Abbildung 5: Vorschiffsgeometrie des UND RoRo Schiffes  
Abbildung 6: Hinterschiffsgeometrie des UND RoRo Schiffes  
Abbildung 7: Spantenriss des DFDS RoRo Einschraubers  
Abbildung 8: Vorschiffsgeometrie des DFDS RoRo Einschraubers  
Abbildung 9: Hinterschiffsgeometrie des DFDS RoRo Einschraubers  
Abbildung 10: Spantenriss des DFDS Zweischraubers  
Abbildung 11: Vorschiffsgeometrie des DFDS RoRo Zweischraubers  
Abbildung 12: Hinterschiffsgeometrie des DFDS RoRo Zweischraubers  
Abbildung 13: Spantenriss des SinBad Passagierschiffes  
Abbildung 14: Vorschiffsgeometrie des SinBad Passagierschiffes  
Abbildung 15: Hinterschiffsgeometrie des SinBad Passagierschiffes

Abbildung 16a +16b: Rollwinkelamplituden der C-Box  
Abbildung 17: Rolldämpfungskoeffizienten der C-Box  
Abbildung 18a +18b: Rollwinkelamplituden des UND RoRo Schiffes  
Abbildung 19: Rolldämpfungskoeffizienten des UND RoRo Schiffes  
Abbildung 20a +20b: Rollwinkelamplituden des DFDS RoRo Einschraubers  
Abbildung 21: Rolldämpfungskoeffizienten des DFDS RoRo Einschraubers  
Abbildung 22a +22b: Rollwinkelamplituden des DFDS RoRo Zweischraubers  
Abbildung 23: Rolldämpfungskoeffizienten des DFDS RoRo Zweischraubers  
Abbildung 24a +24b: Rollwinkelamplituden des SinBad Passagierschiffes  
Abbildung 25: Rolldämpfungskoeffizienten des SinBad Passagierschiffes

## 4 Literaturquellen

- [1] J. Rahola, "The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability", Dr. Thesis, University Finland, Helsinki 1939
- [2] Recommendation on Intact Stability for Passenger and Cargo Ships under 100 metres in Length (IMO Resolution A.167(ES.IV) as amended by Resolution A.206 (VIII))
- [3] P. Blume, "Development of New Stability Criteria for Modern Dry Cargo Vessels", Proc. PRADS '87, Trondheim, June 1987
- [4] Draft Code of Intact Stability for all Types of Ships covered by IMO Instruments - Containerships greater than 100 m, IMO - SLF 37/25 Annex 2
- [5] G.F. Clauss, J. Hennig, "Schlußbericht zum Teilprojekt TUB-KENSTSE Computergesteuerte Kenterversuche in hohen Wellengruppen im BMBF-F&E-Verbundvorhaben ROLL-S Schiffs- und Ladungssicherheit bei großen Rollwinkeln im Seegang"
- [6] W.N. France et al, "An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems", SNAME Annual Meeting 2001 Presentation
- [7] P. Blume, K.-E. Brink, "Model Tests for the Validation of Extreme Roll Motion Predictions", Vortrag anläßlich der Sommertagung der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2001, Danzig, Polen
- [8] W.K. Kuehnlein, K.-E. Brink, "Model Tests for the Validation of Extreme Roll Motion Predictions", OMAE 2002, Proceedings of 21<sup>st</sup> Conference on Offshore and Arctic Engineering, Oslo, Norway, 2002
- [9] P. Blume, "Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung und ihre Anwendung zur Abschätzung von extremen Rollwinkeln", Schiffstechnik Bd. 26, 1979
- [10] P. Blume, "The safety against capsizing in relation to seaway properties in model tests", STAB 86, Gdansk, September 1986
- [11] P. Blume, "On the influence of the variation of righting levers in waves on stability requirements", STAB 90, Naples, September 1990
- [12] G.F. Clauss und J. Hennig, "Computer controlled seakeeping tests in tailored transient wave packet sequences", OMAE 2001 – 20th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, 2001
- [13] P. Blume und M. Nattero, "Survivability tests with a damaged RoRo passenger vessel according to the new IMO-Regulations and further activities planned by CONFITARMA and HSVA", RORO 96, Lübeck, Mai 1996
- [14] Janou Hennig, Heike Billerbeck, Kay-Enno Brink, Daniel Testa, Guenther F. Clauss, and Walter L. Kuehnlein, "Qualitative and quantitative validation of a numerical code

- for the realistic simulation of various ship motion scenarios". Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE'06, June 4-9, 2006, Hamburg, Germany, OMAE2006-92245.
- [15] W.L. Kuehnlein, Günther F. Clauss, Christian Schmittner, and Janou Hennig, "Nonlinear calculations of tailored wave trains for experimental investigations of extreme structure behaviour", Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE'04, June 20-25, 2004, Vancouver, Canada, OMAE2004-51195.
- [16] W. L. Kuehnlein, Kay-Enno Brink, and Janou Hennig, "Innovative deterministic seakeeping test procedures", Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, STAB 2003, September 15-19, 2003, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid, Spain, Paper No. 49.
- [17] Diplomarbeit Jens Kostrzewa, „Entwicklung und Training Neuronaler Netze zur Prognose des Seegangsverhaltens von Schiffen“, Studiengang: Mathematik, FHH Flensburg, 2.6.2004
- [18] Günther F. Clauss, Janou Hennig, Heike Cramer, and Kay-Enno Brink, Validation of numerical motion simulations by direct comparison with time series from ship model tests in deterministic wave sequences", 24. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Griechenland, June2005.



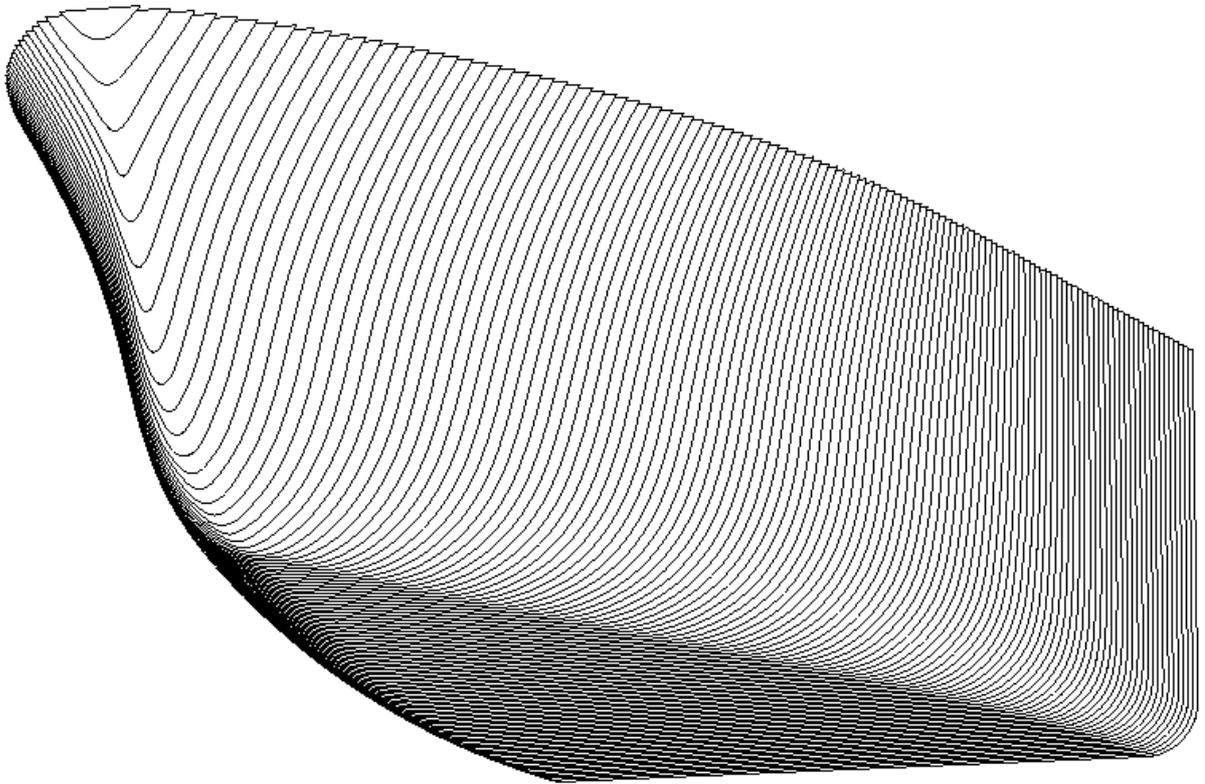


Abbildung 2: Vorschiffsgeometrie der C-Box

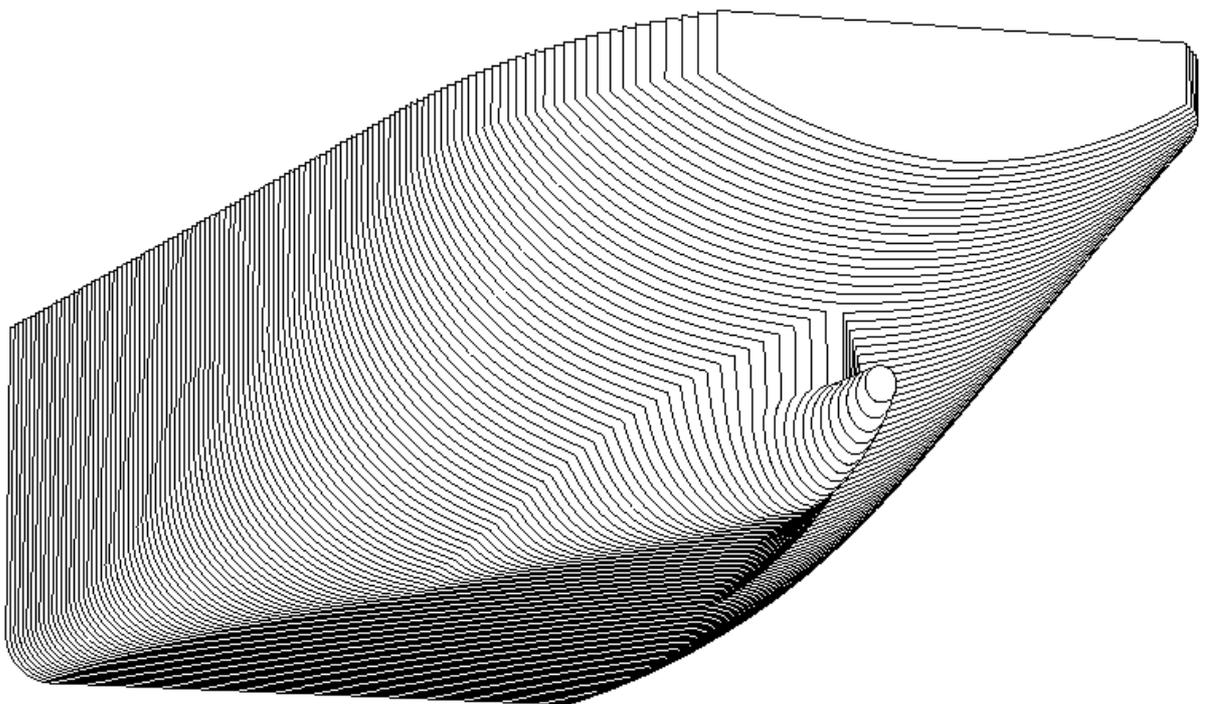


Abbildung 3: Hinterschiffsgeometrie der C-Box

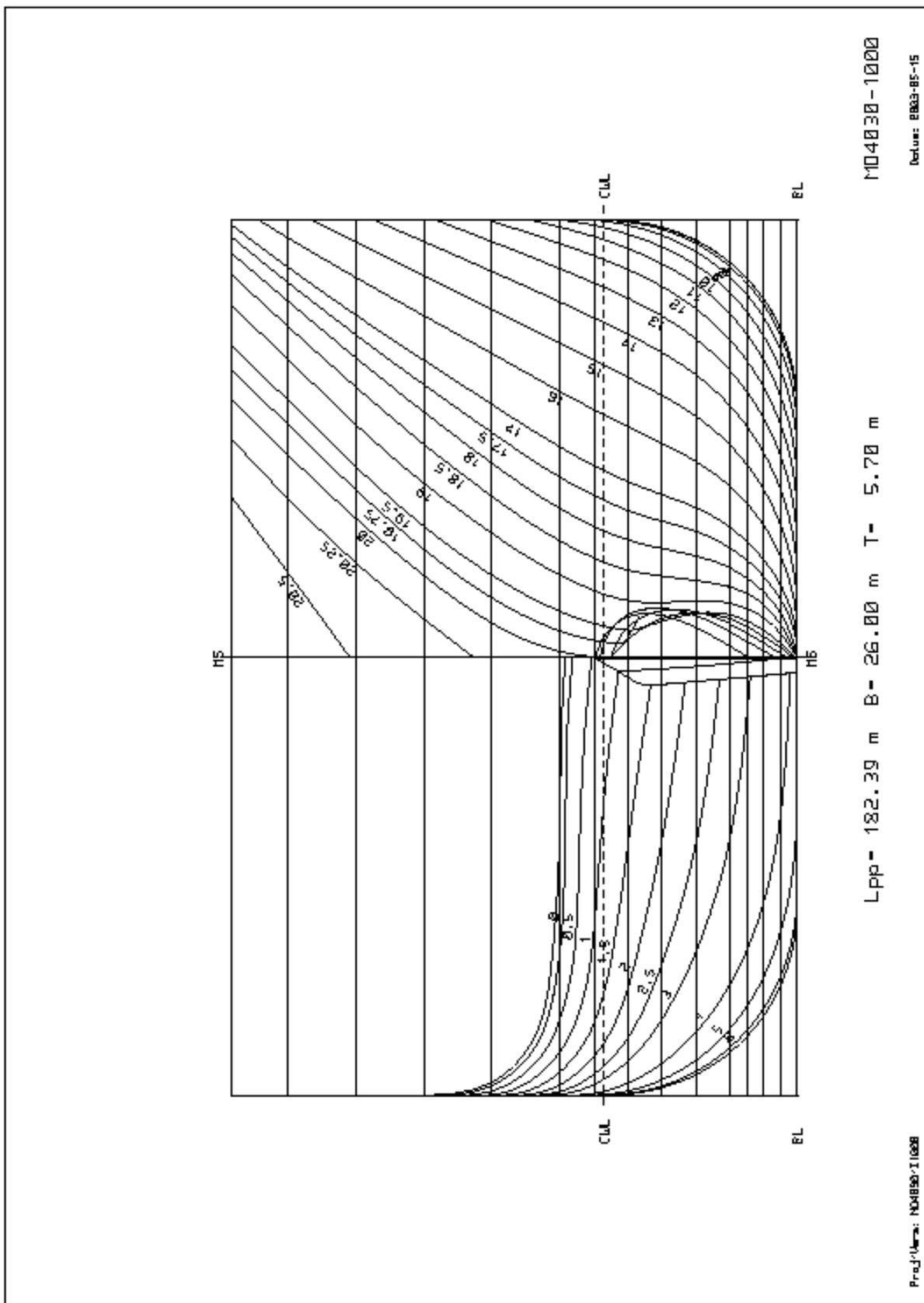


Abbildung 4: Spantenriss des UND RoRo Schiffes

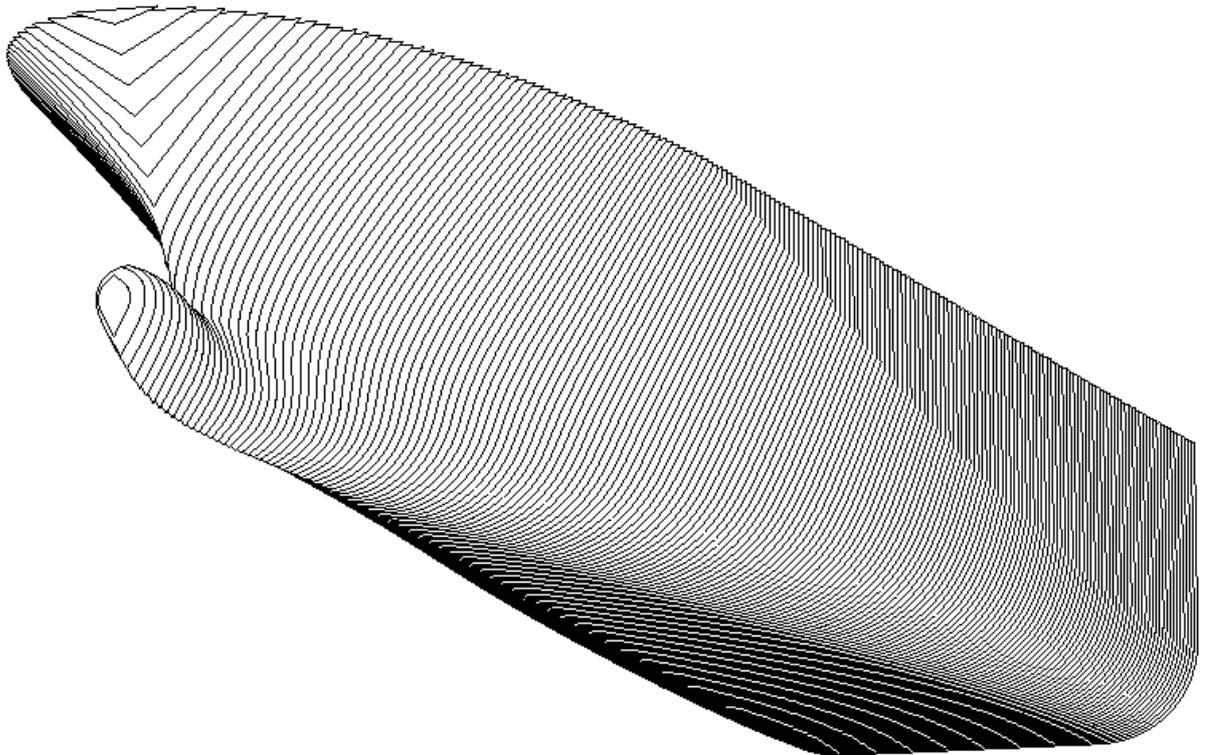


Abbildung 5: Vorschiffsgeometrie des UND RoRo Schiffes

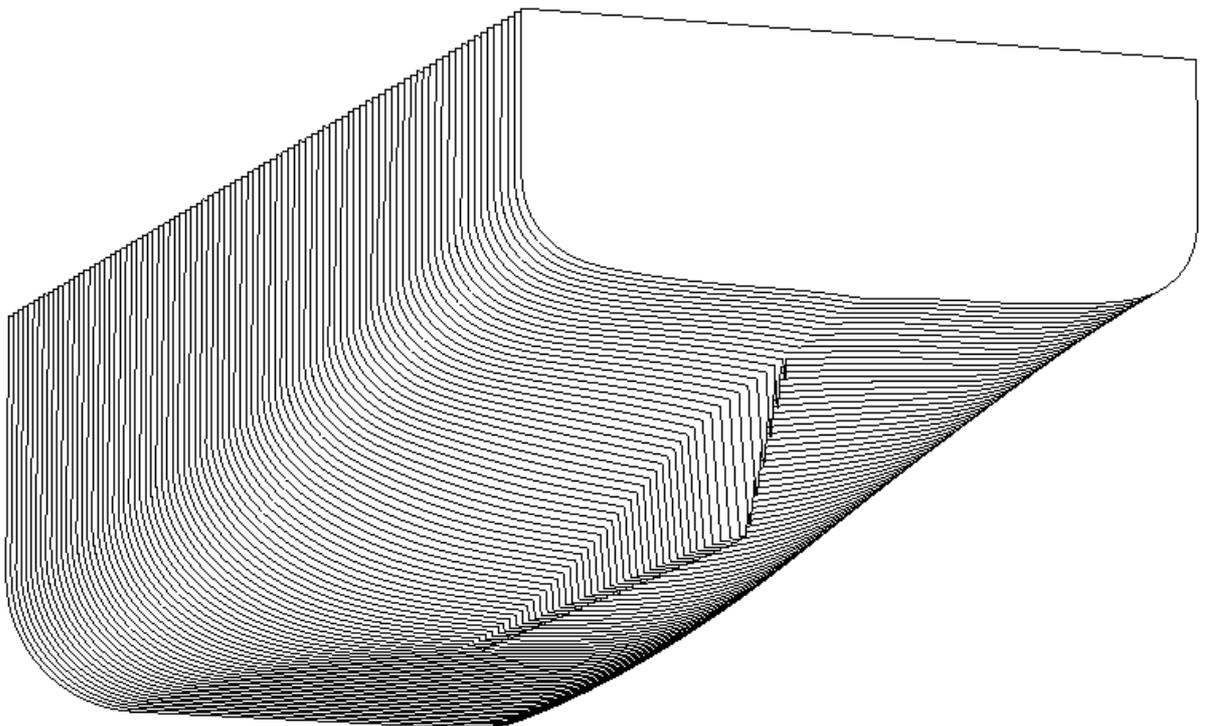


Abbildung 6: Hinterschiffsgeometrie des UND RoRo Schiffes

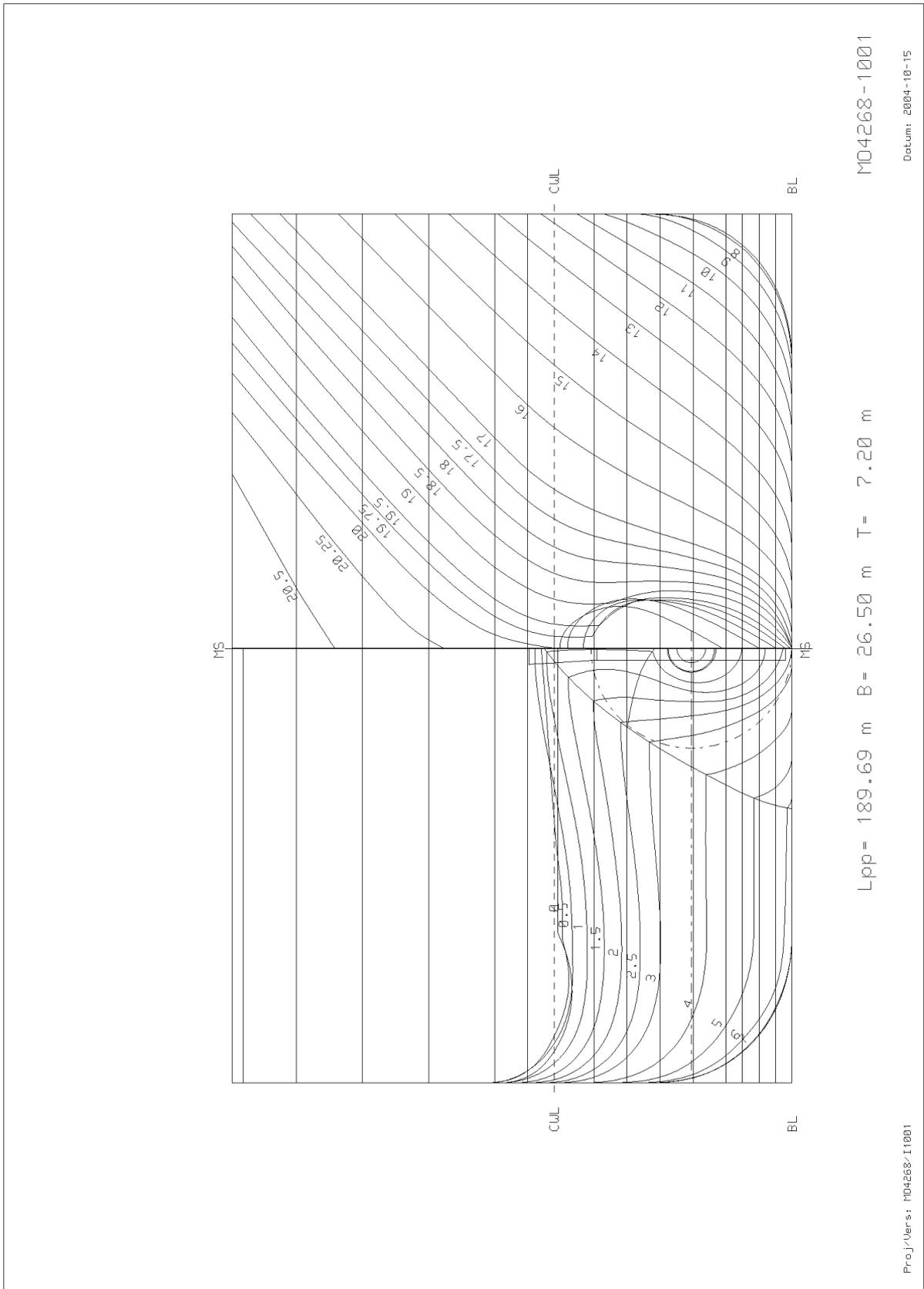


Abbildung 7: Spantenriss des DFDS RoRo Einschraubers

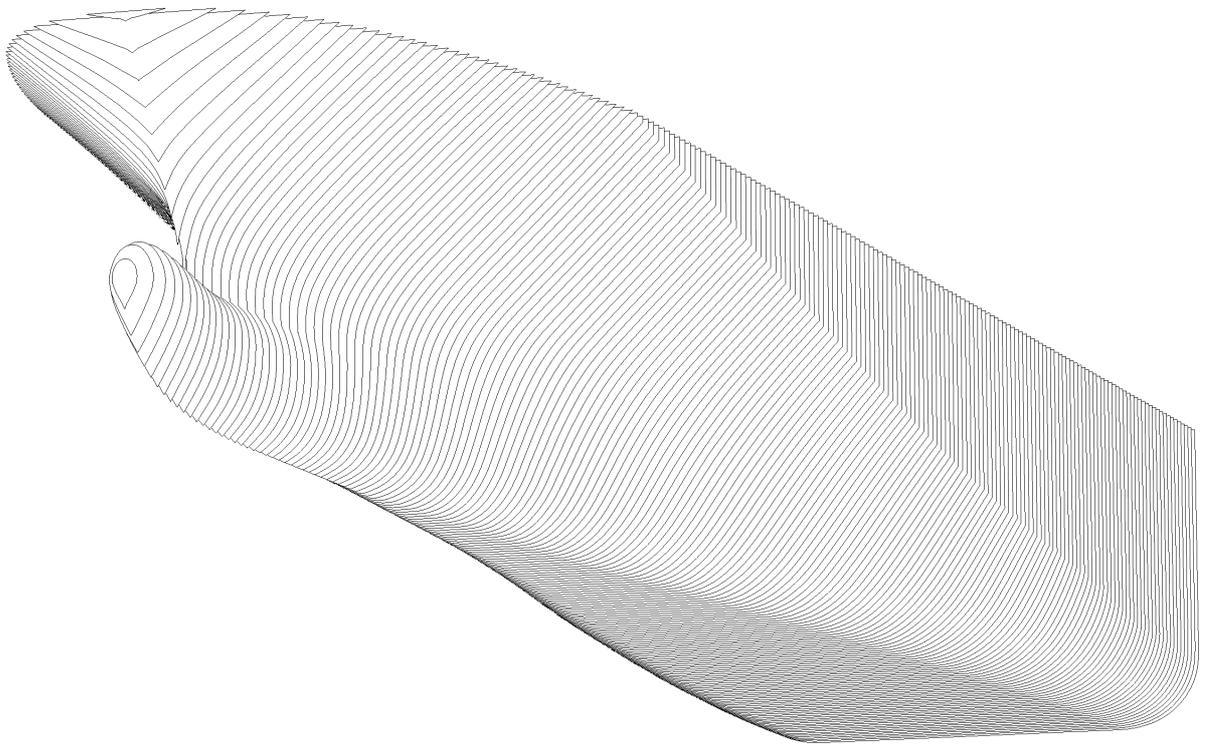


Abbildung 8: Vorschiffsgeometrie des DFDS RoRo Einschraubers

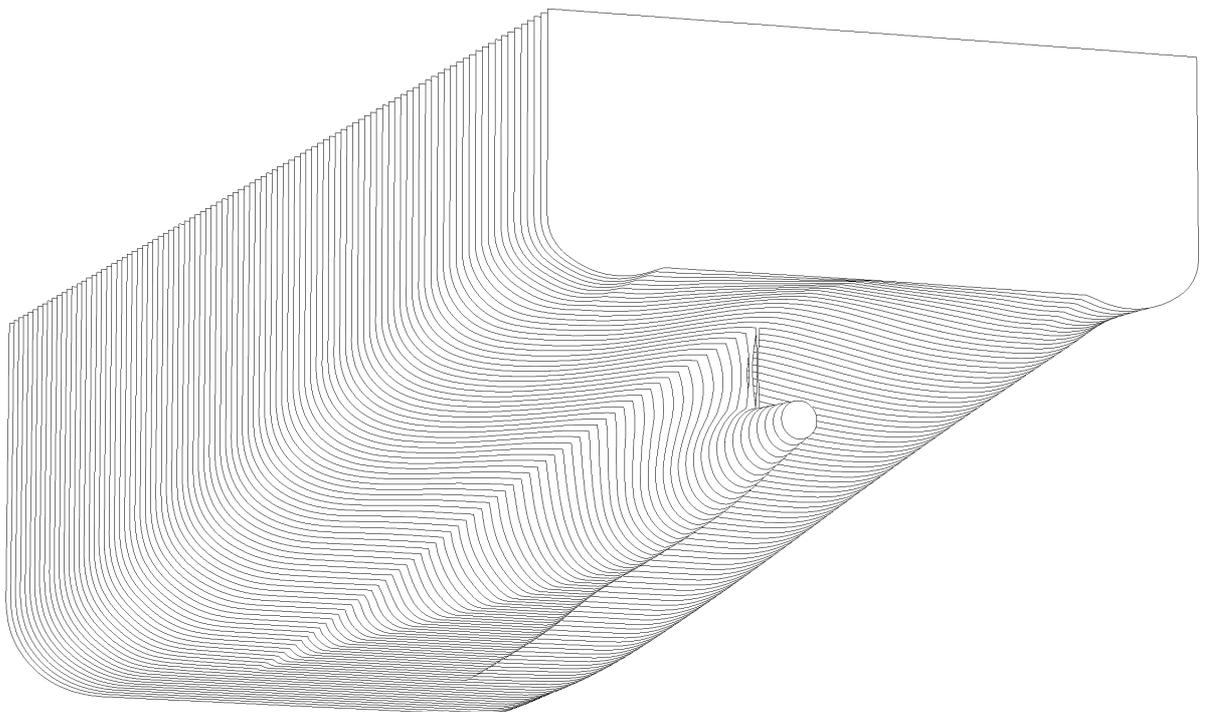


Abbildung 9: Hinterschiffsgeometrie des DFDS RoRo Einschraubers

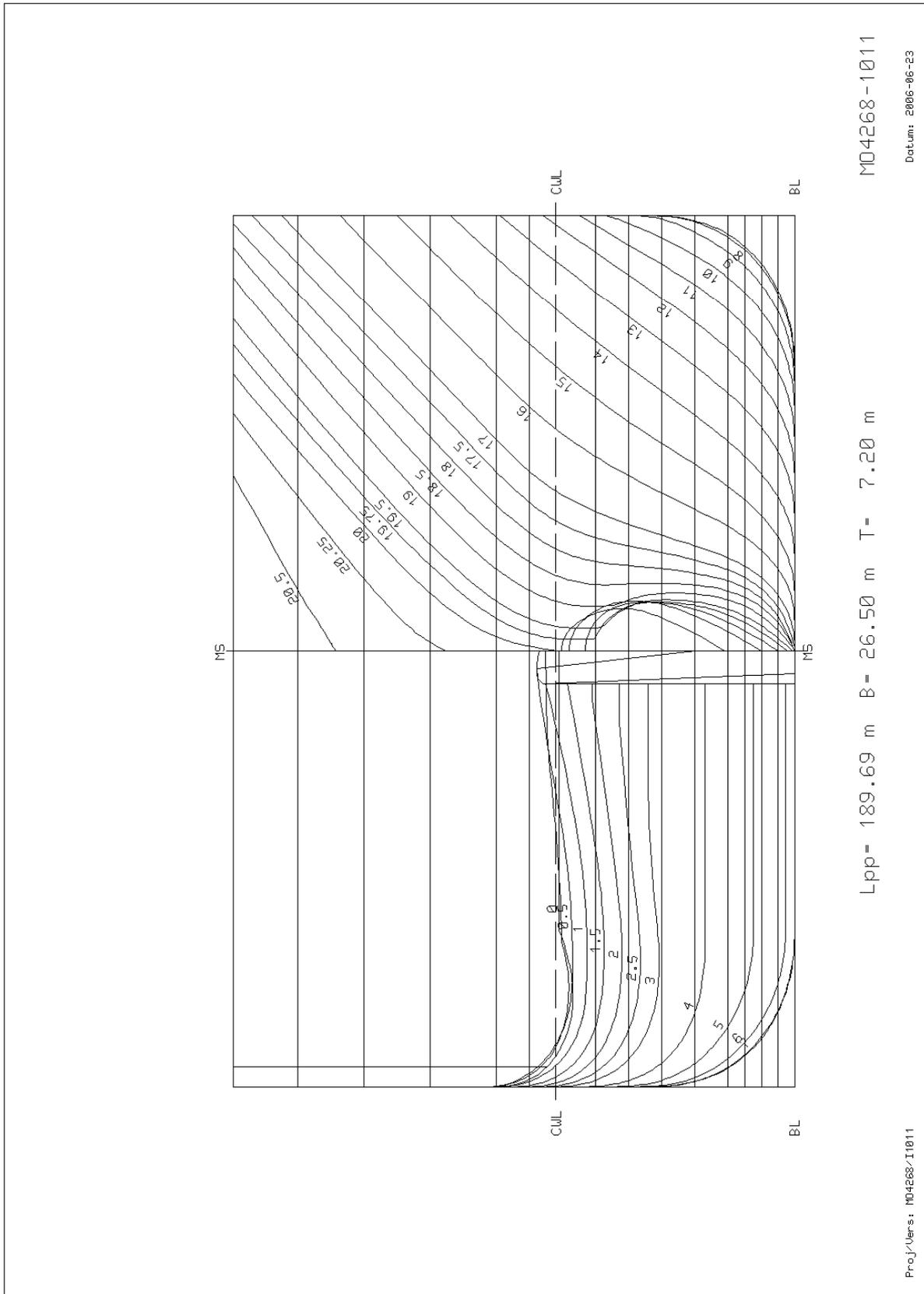


Abbildung 10: Spantenriss des DFDS Zweischraubers

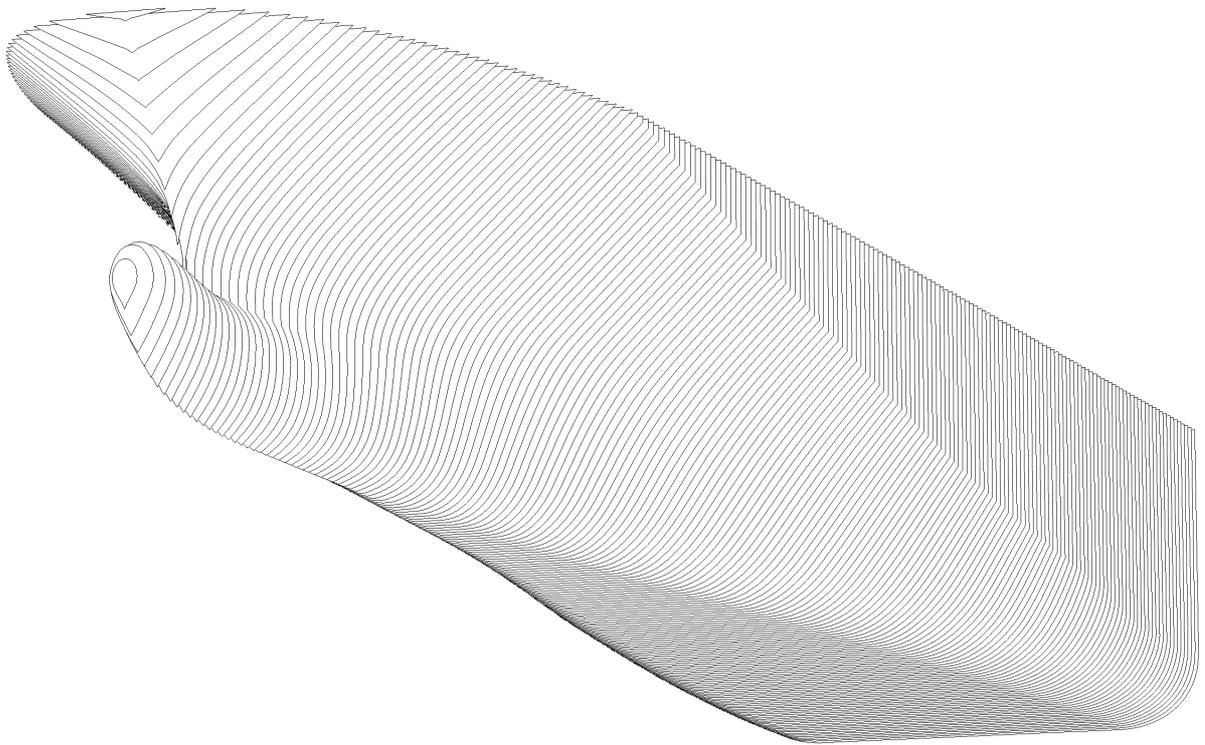


Abbildung 11: Vorschiffsgeometrie des DFDS RoRo Zweischaubers

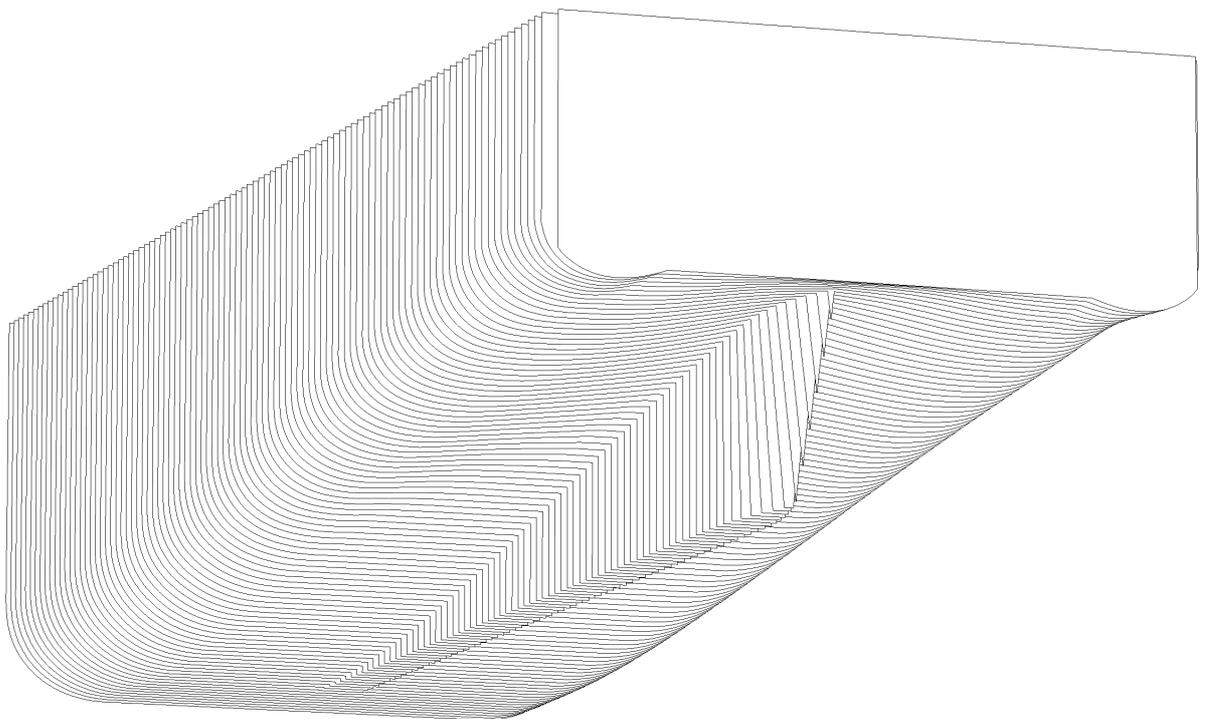


Abbildung 12: Hinterschiffsgeometrie des DFDS RoRo Zweischaubers

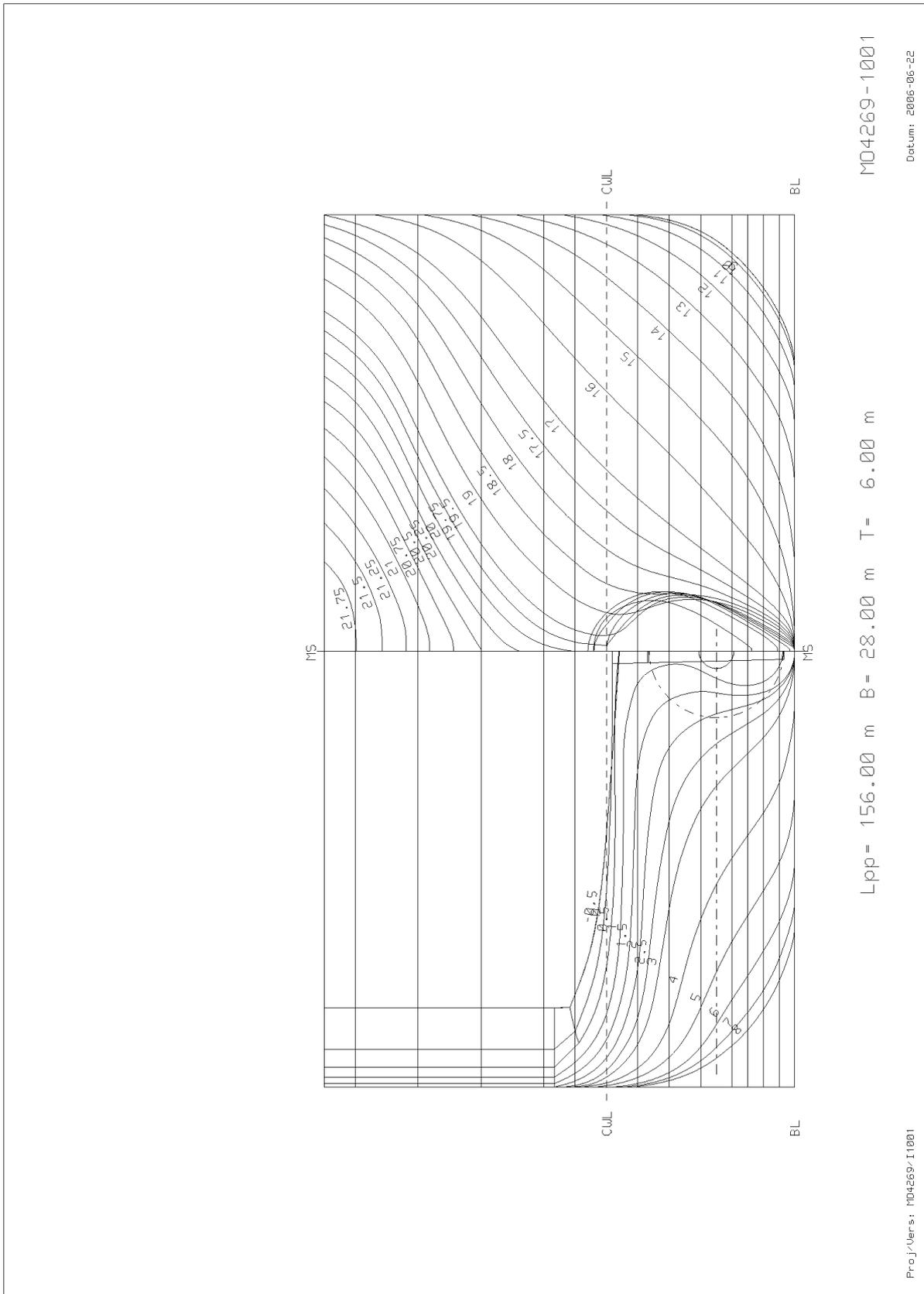


Abbildung 13: Spantenriss des SinBad Entwurfs

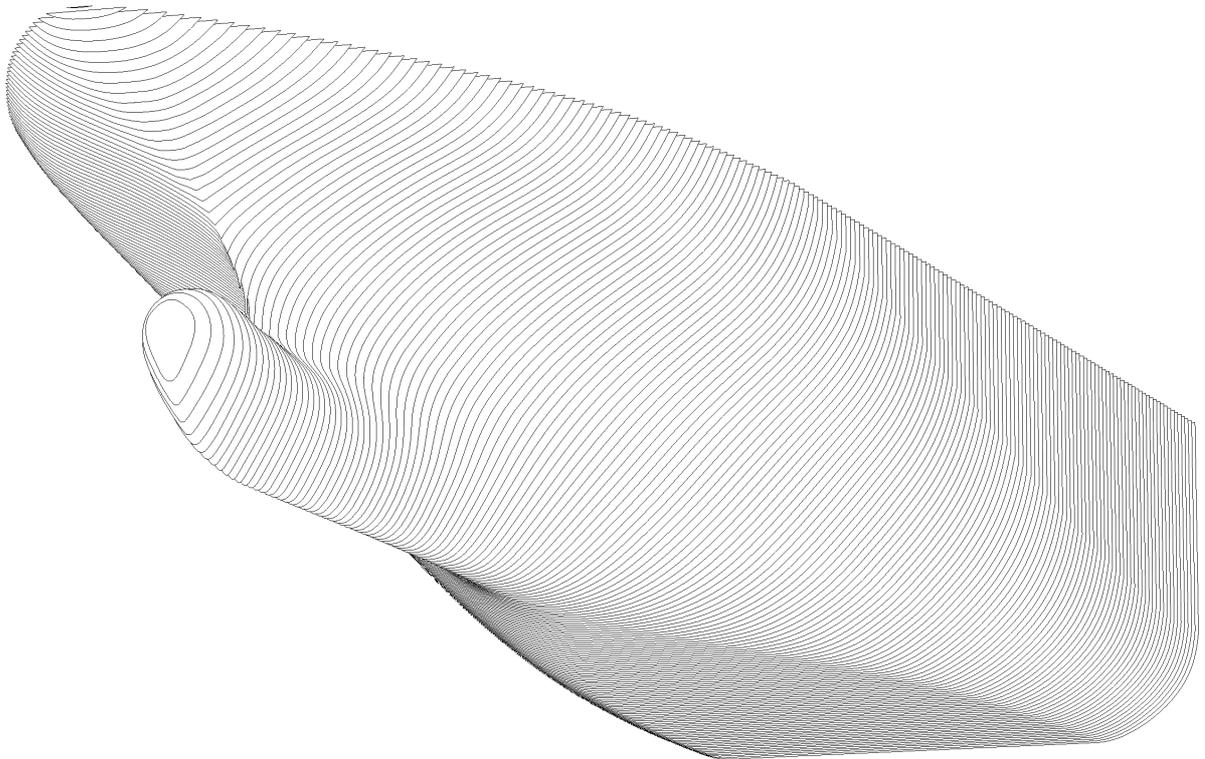


Abbildung 14: Vorschiffsgeometrie des SinBad Passagierschiffes

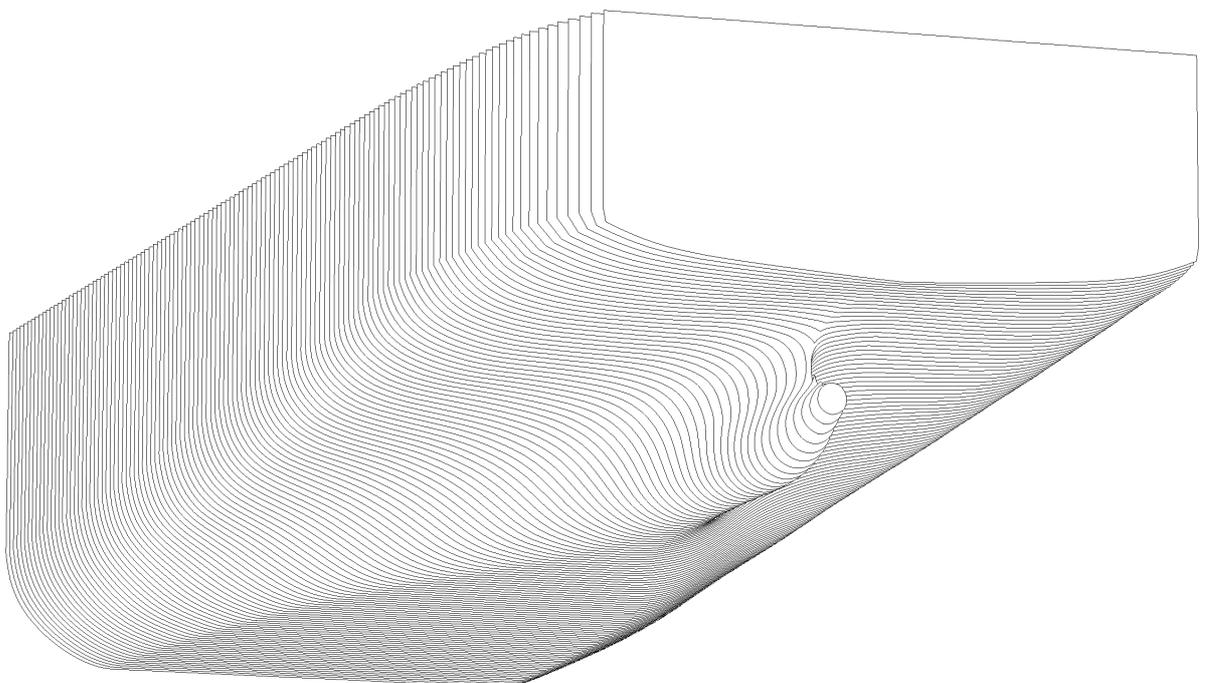


Abbildung 15: Hinterschiffsgeometrie des SinBad Passagierschiffes

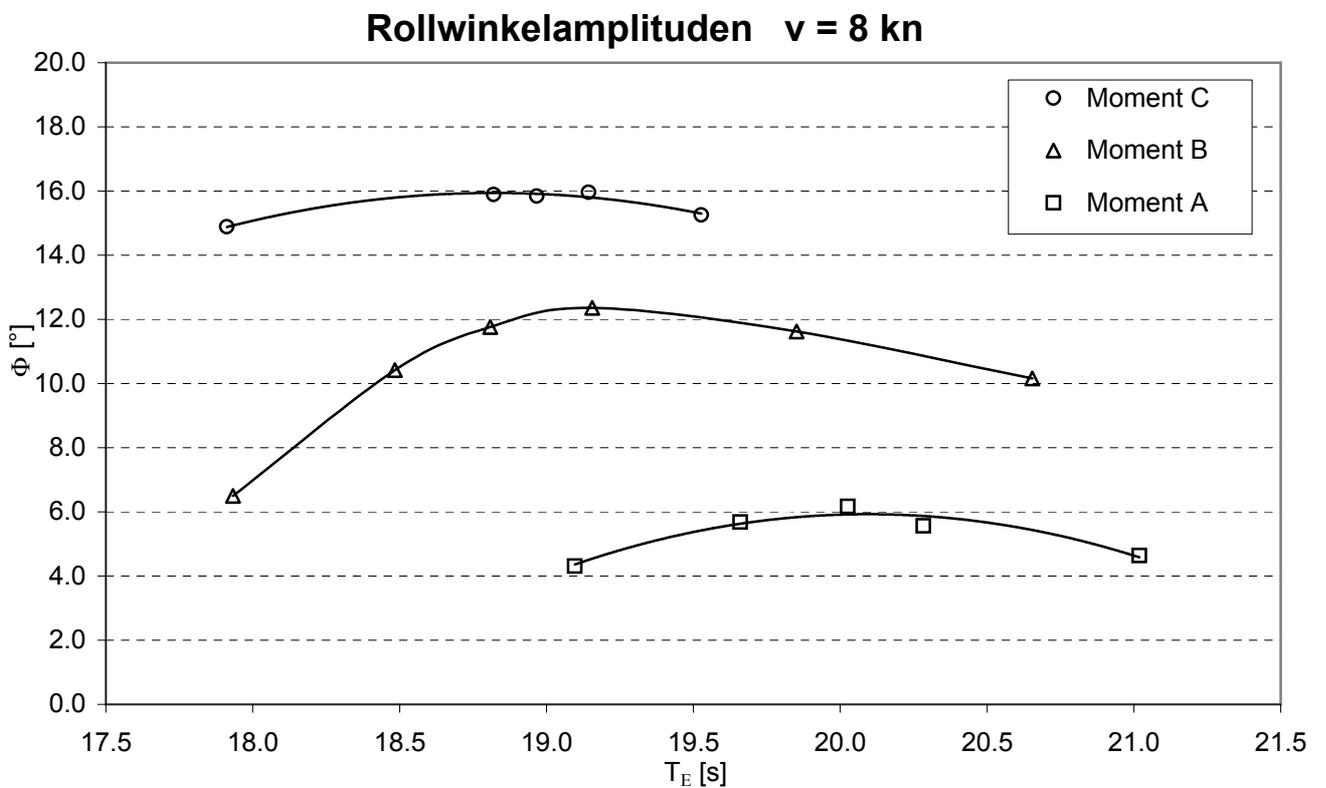
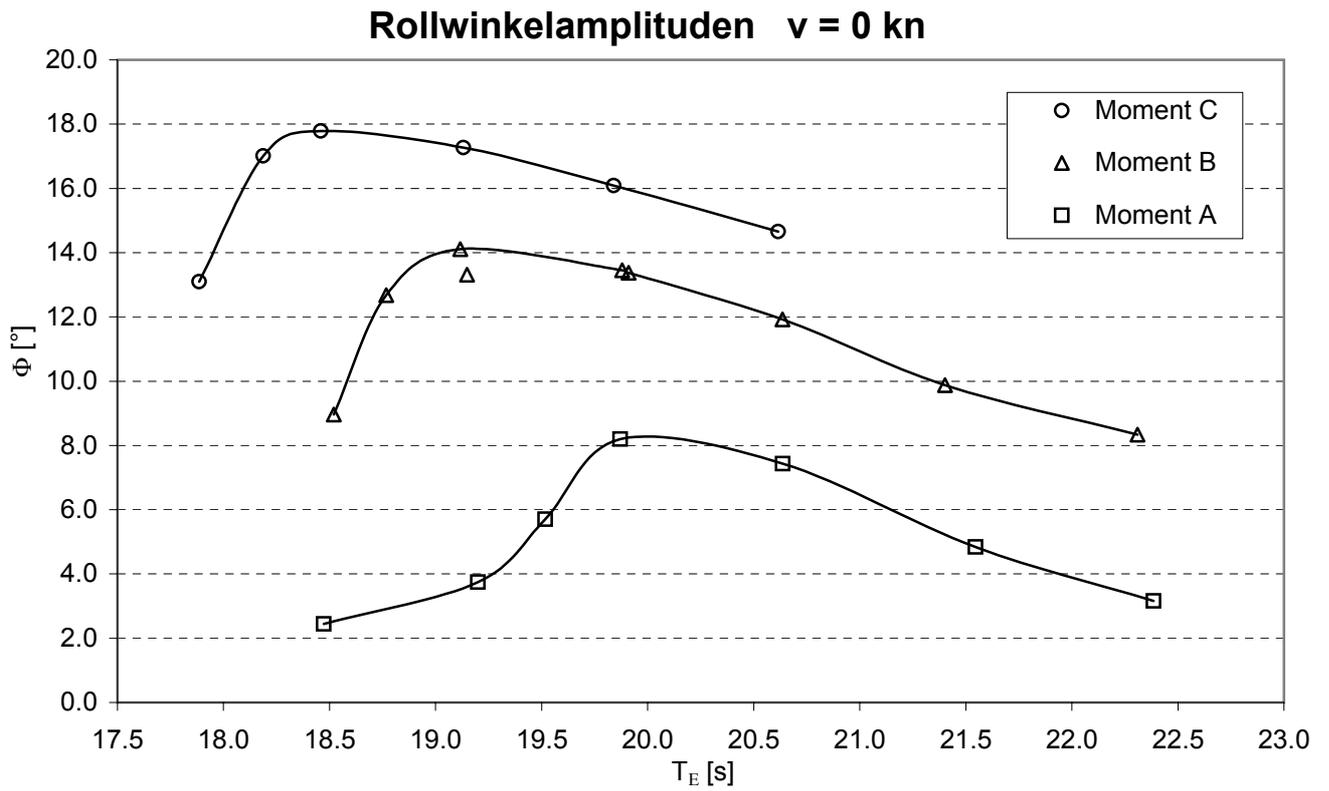


Abb.16a: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 0 und 8 Knoten.

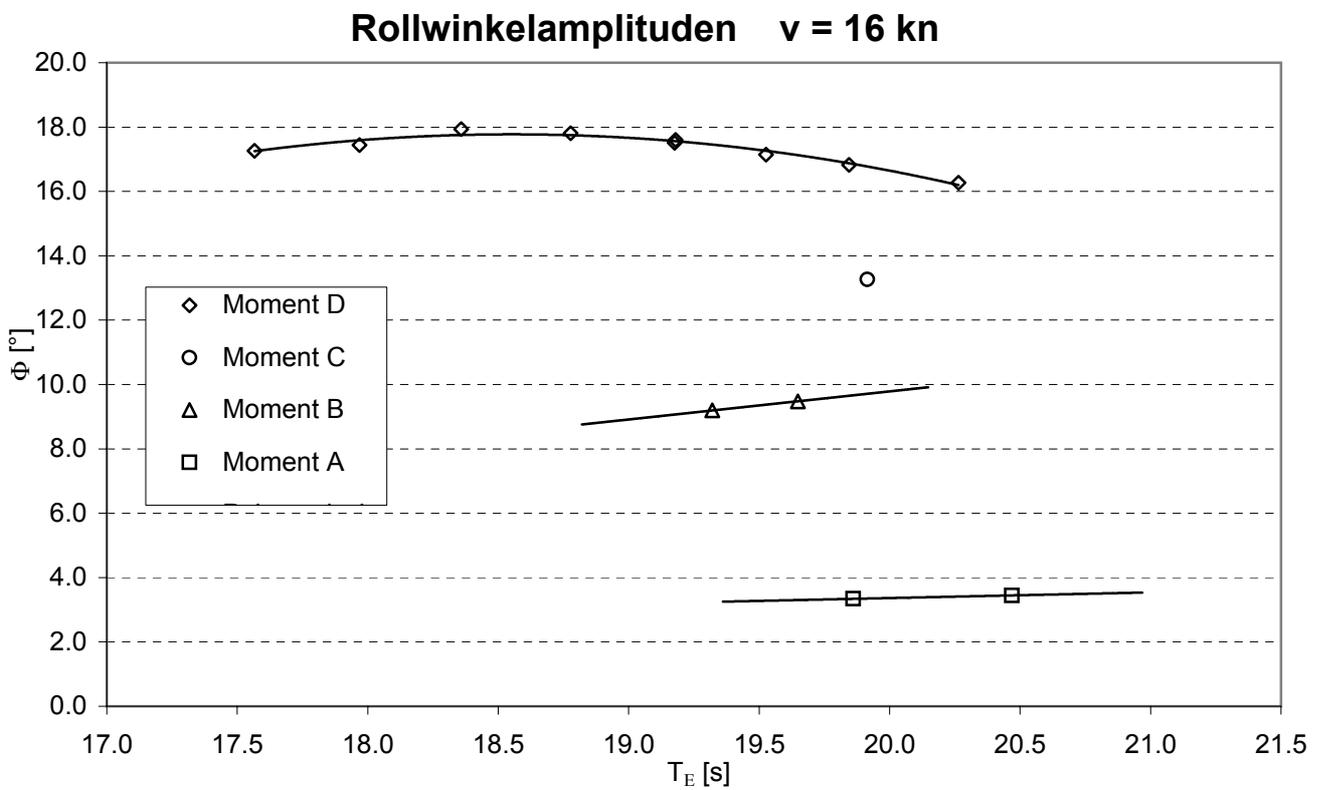
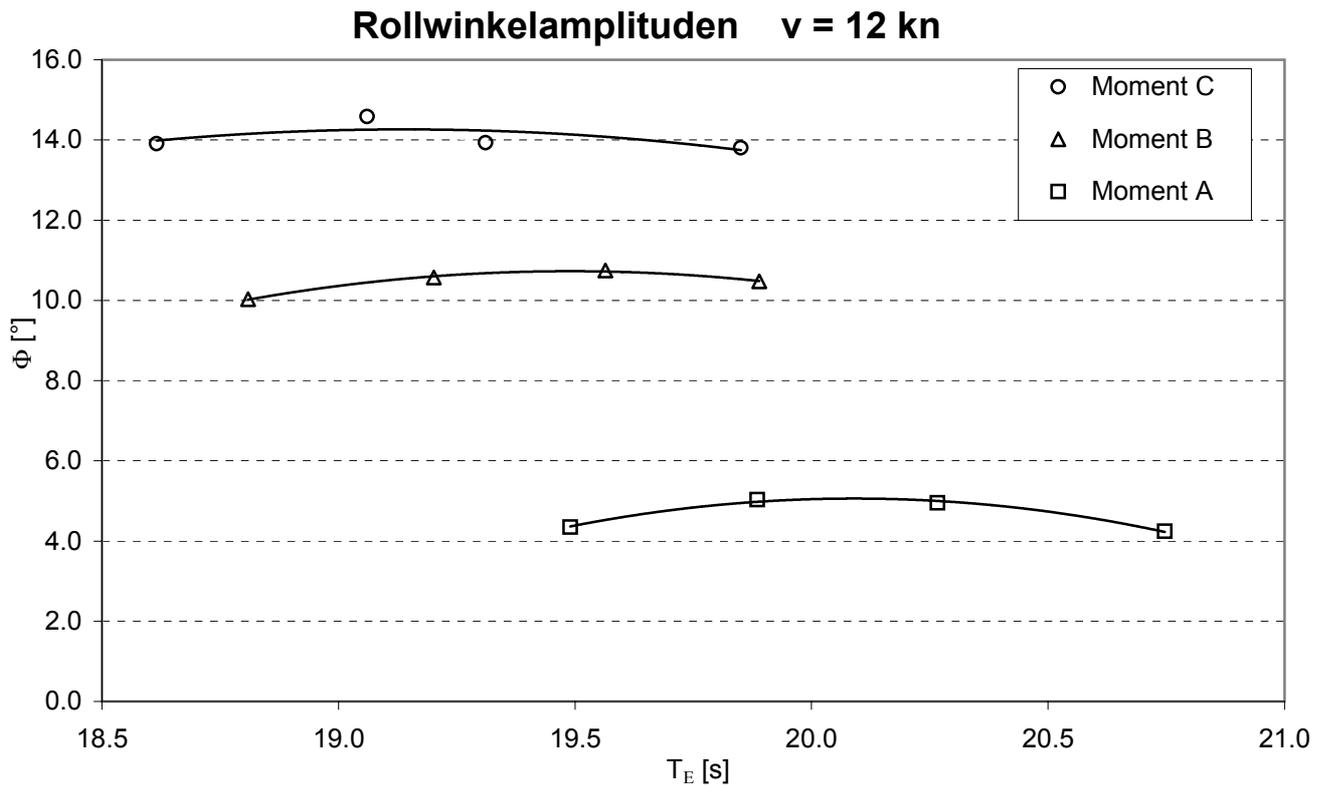
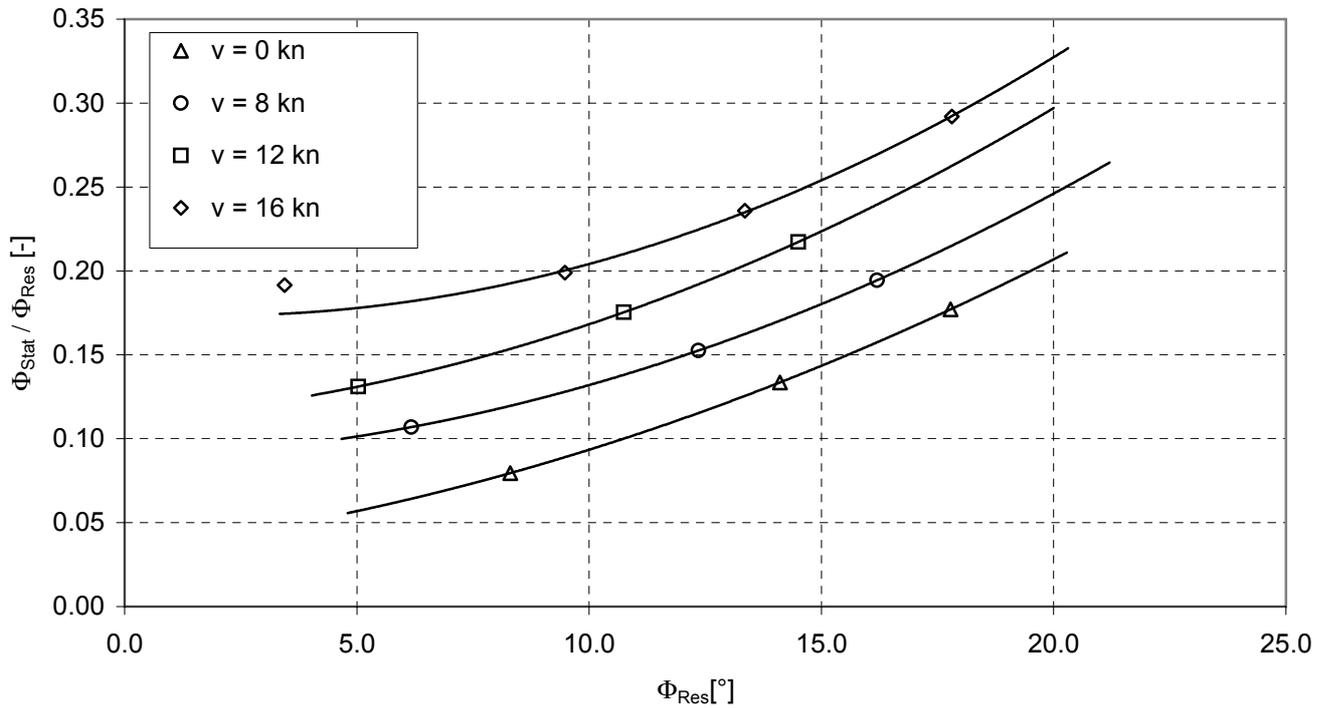


Abb.16b: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 12 und 16 Knoten.

## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten



## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten

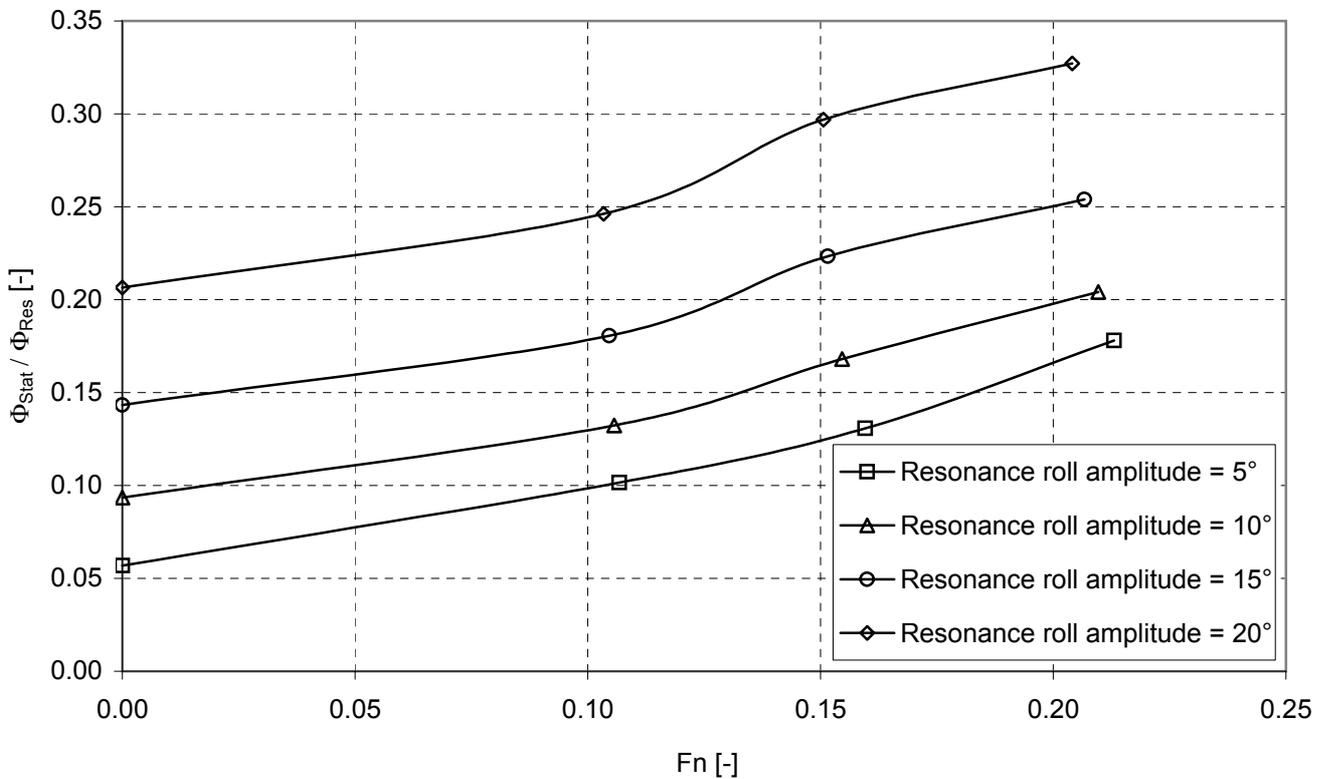
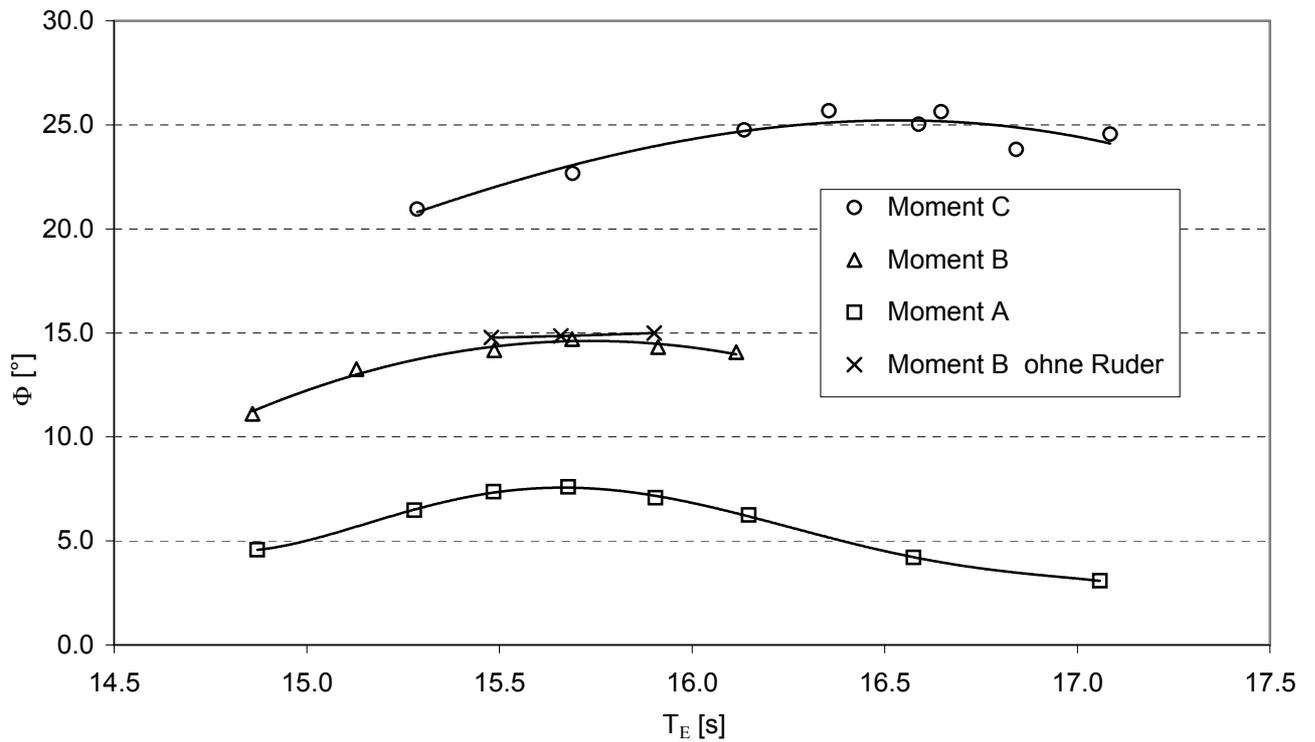


Abb.17: Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten als Funktion von Resonanzrollwinkel und Geschwindigkeit.

## Rollwinkelamplituden $v = 0$ kn



## Rollwinkelamplituden $v = 10$ kn

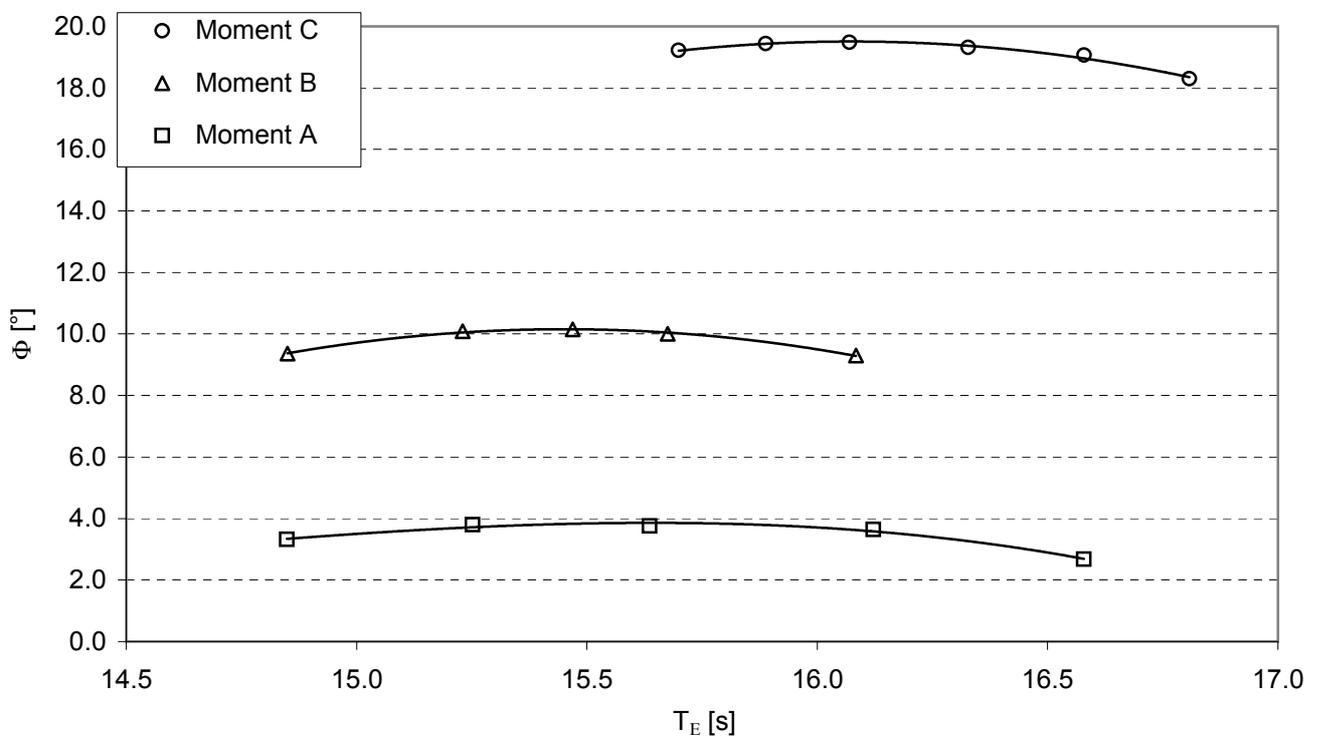


Abb.18a: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 0 und 10 Knoten.

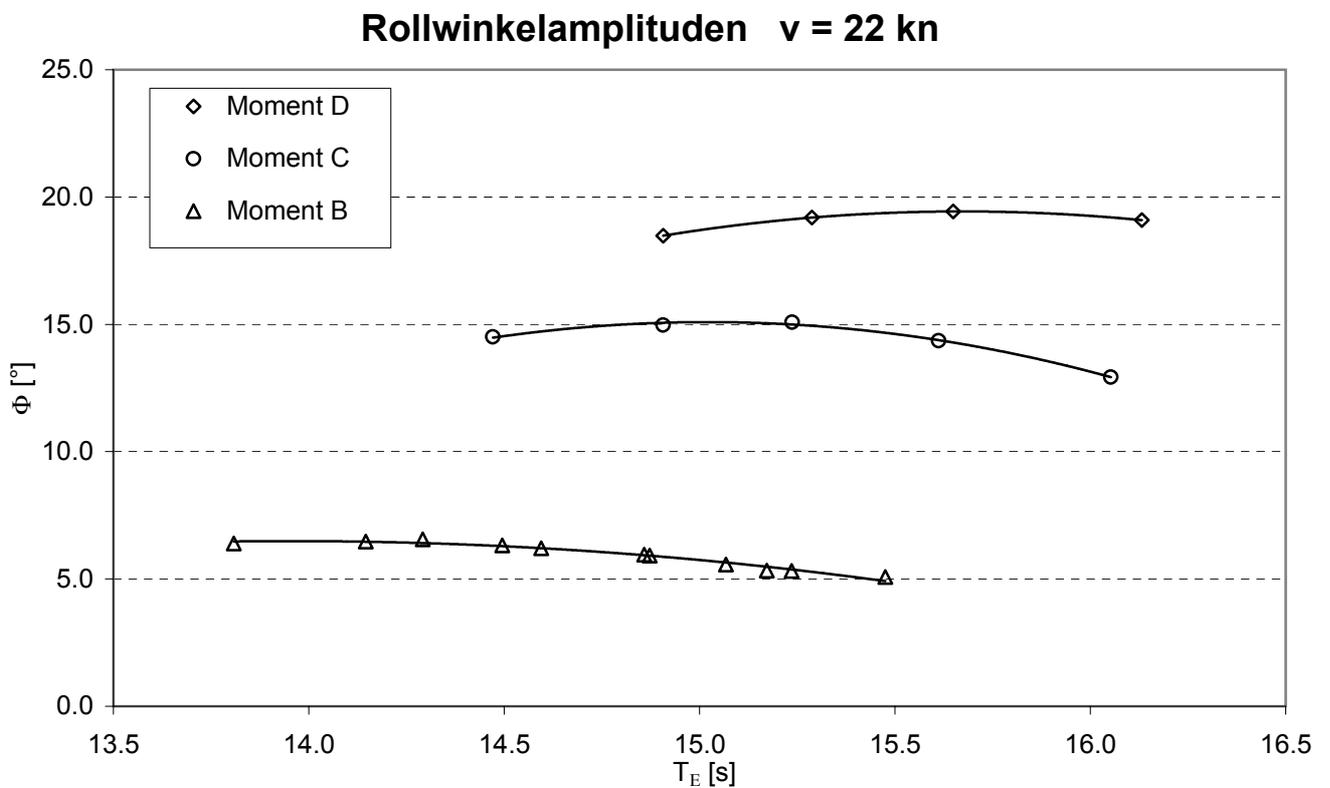
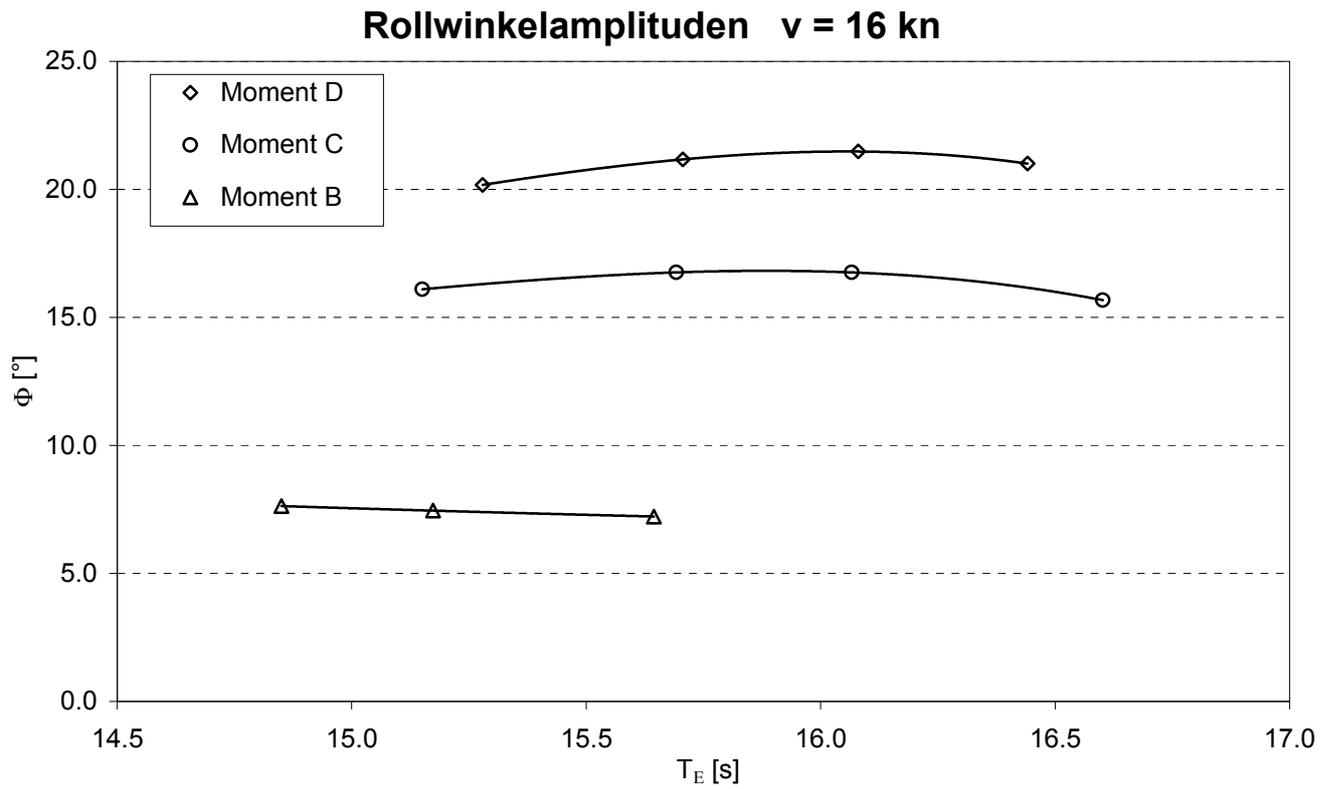
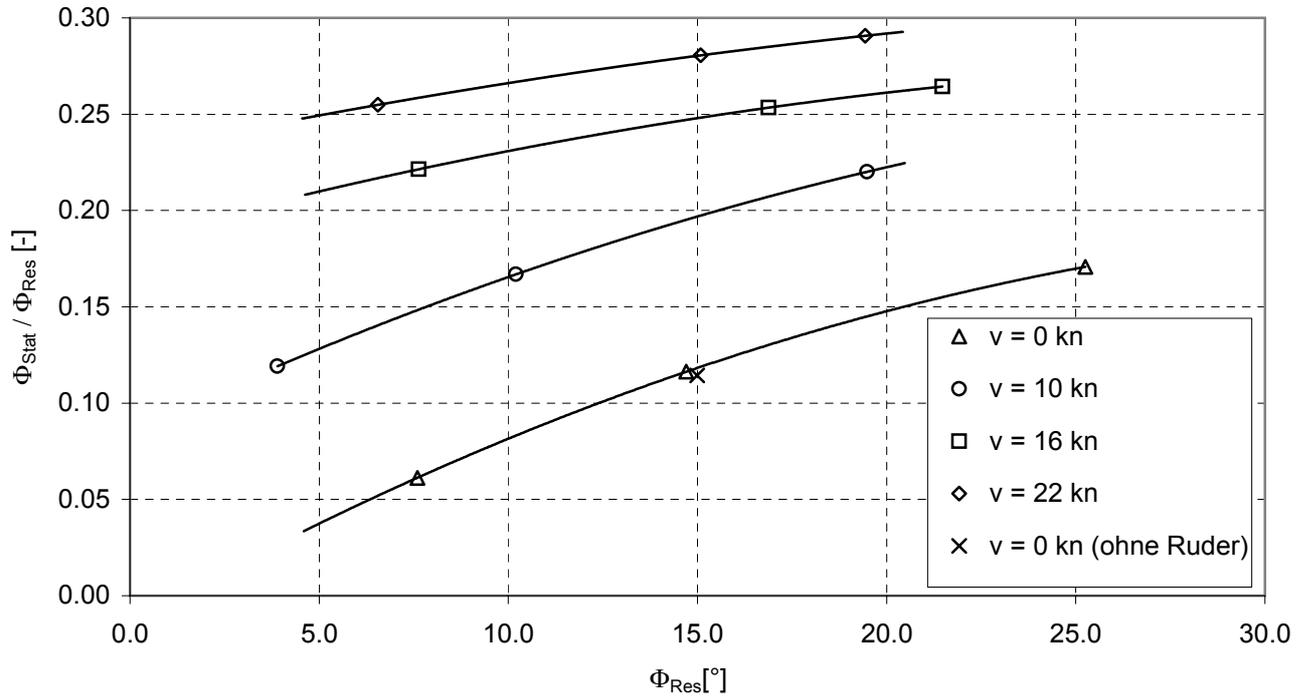


Abb. 18b Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 16 und 22 Knoten.

## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten



## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten

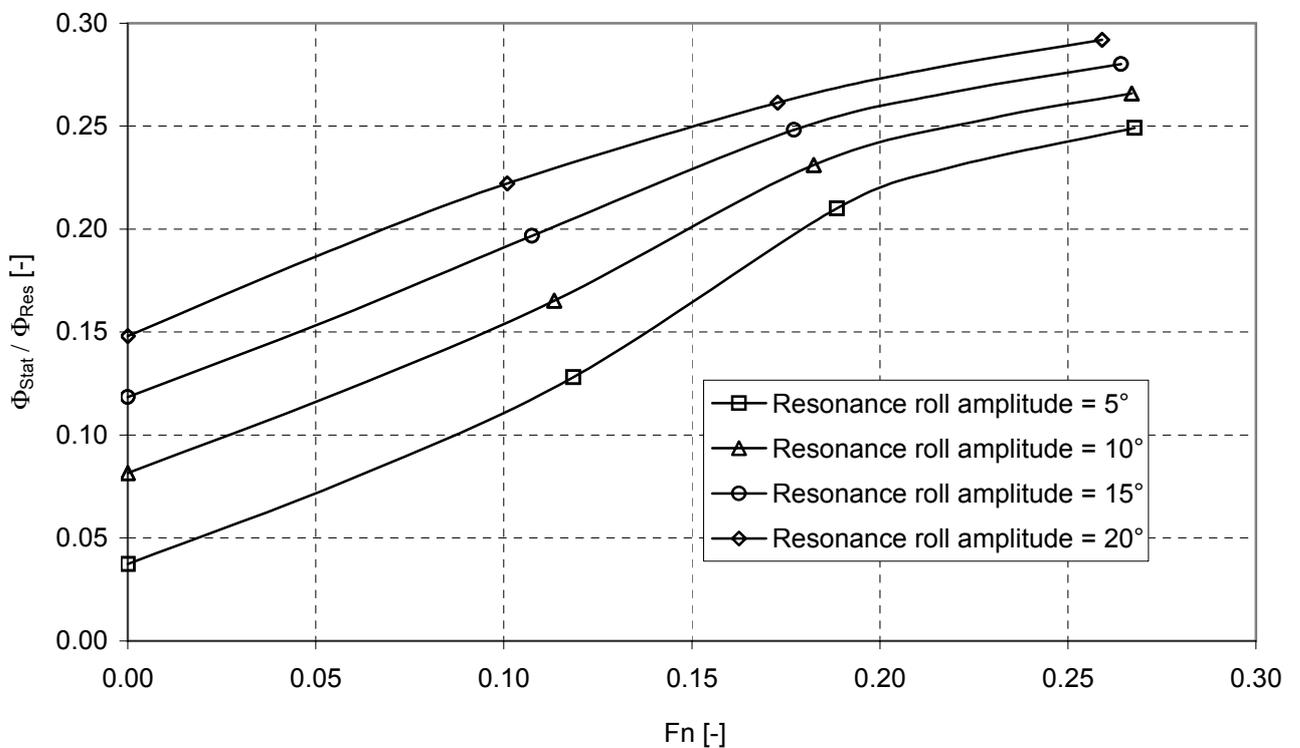
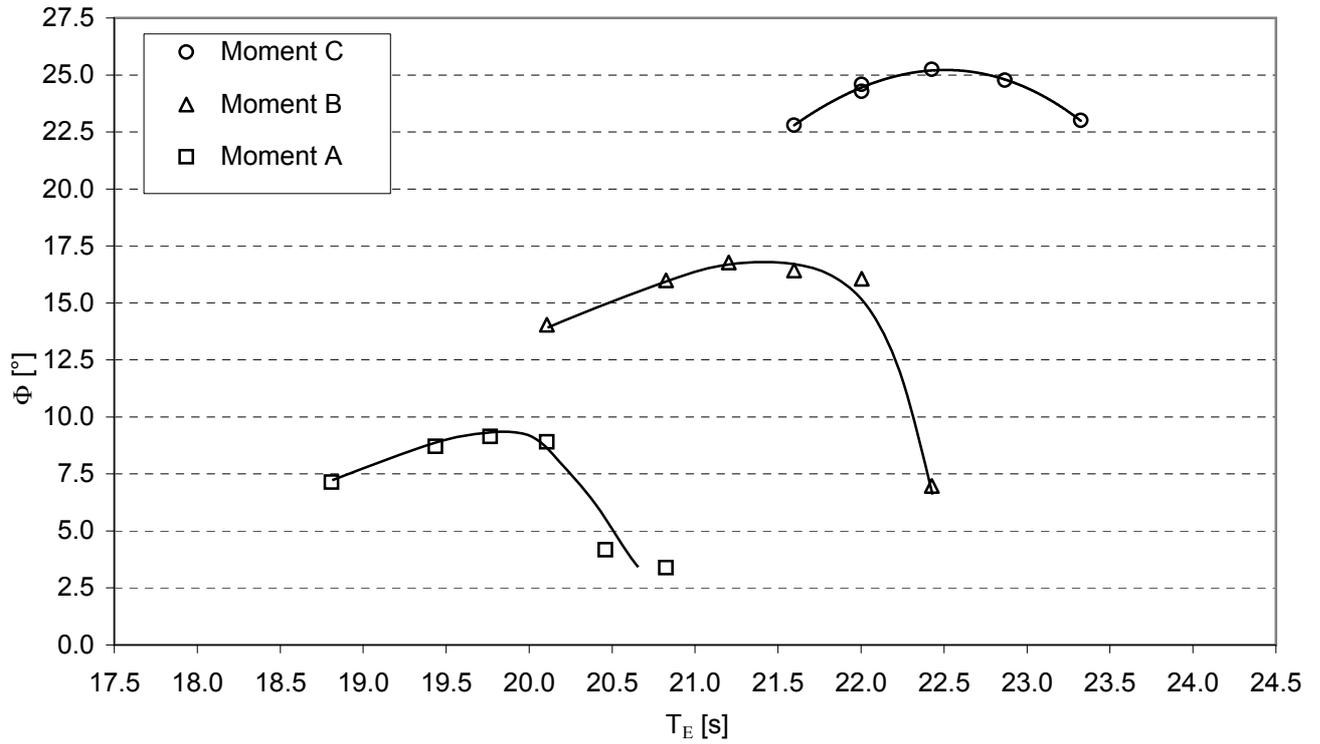


Abb.19: Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten als Funktion von Resonanzrollwinkel und Geschwindigkeit.

## Rollwinkelamplituden $v = 0$ kn



## Rollwinkelamplituden $v = 10$ kn

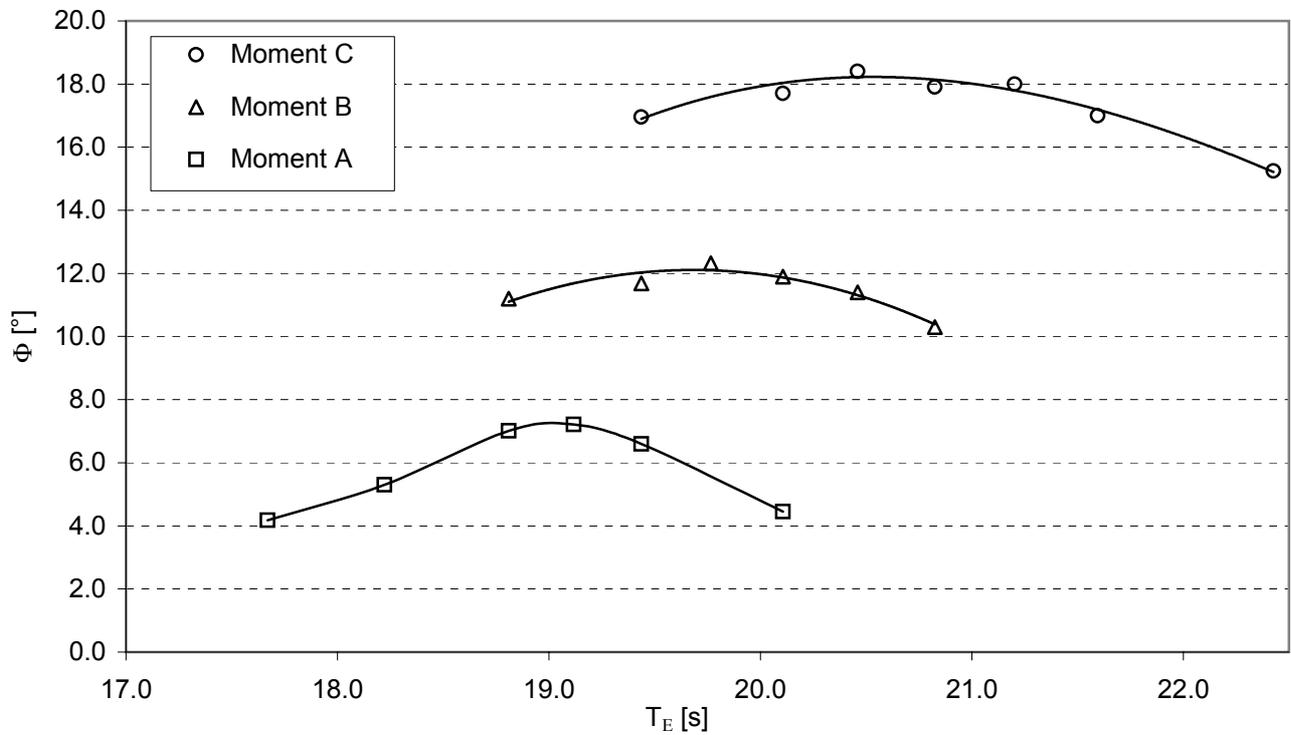
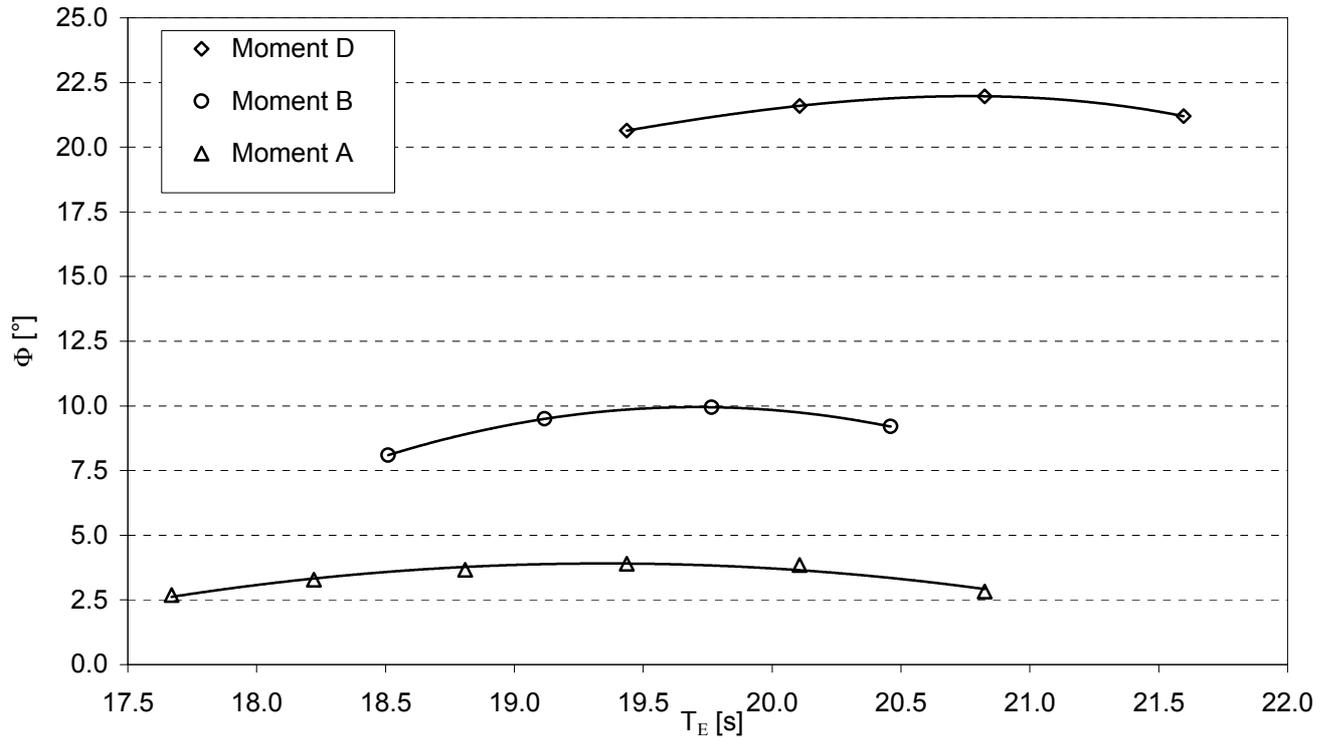


Abb.20a: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 0 und 10 Knoten.

## Rollwinkelamplituden $v = 16$ kn



## Rollwinkelamplituden $v = 22$ kn

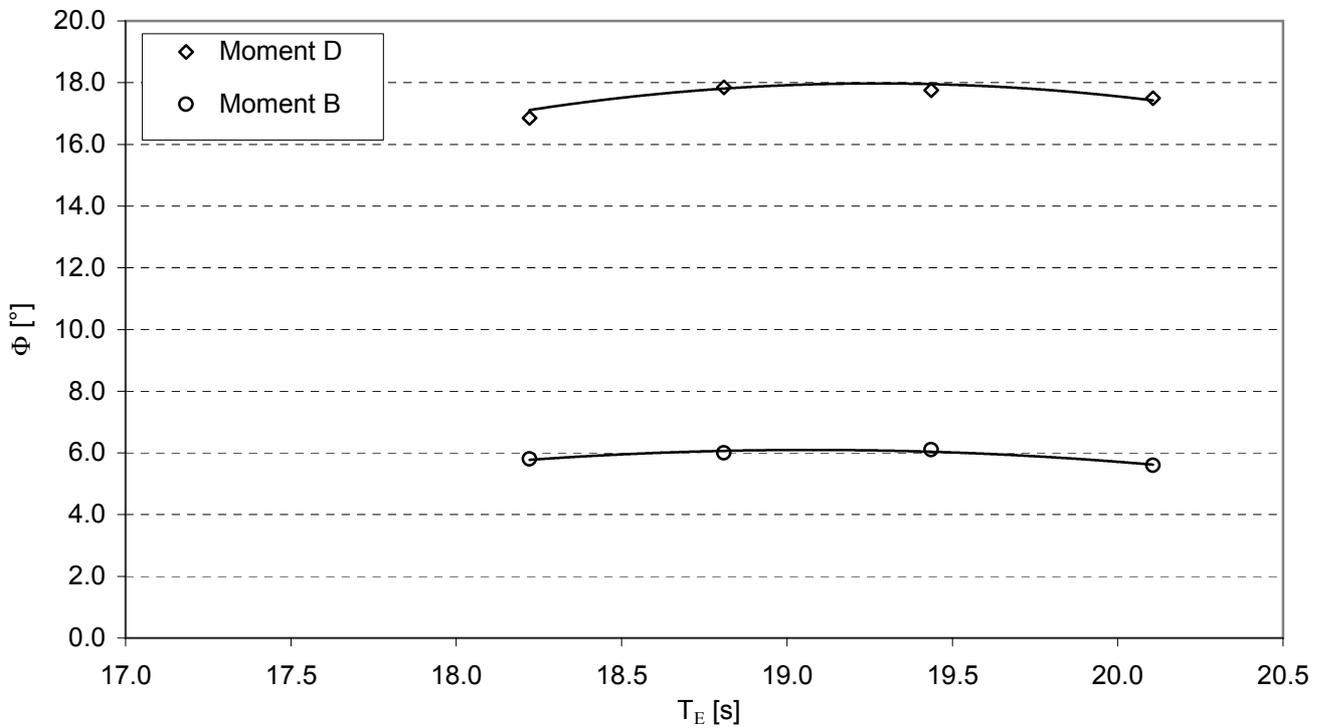
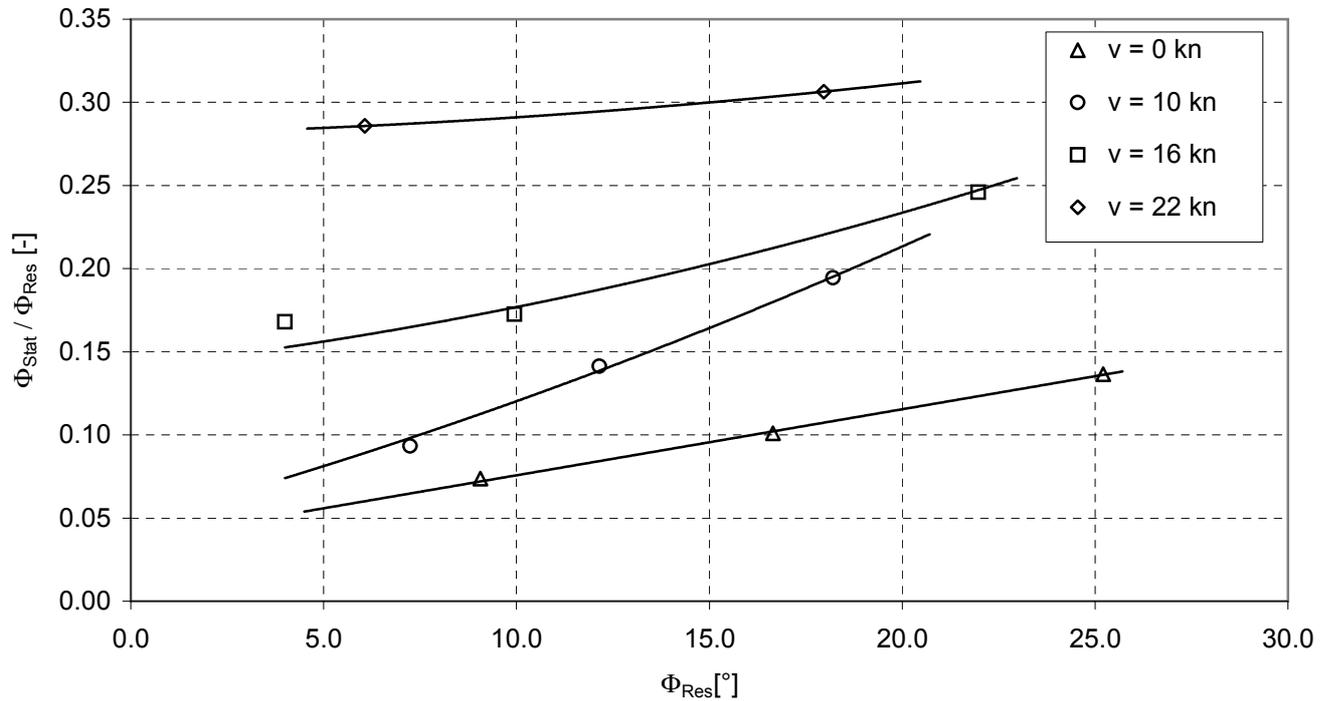


Abb. 20b: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 16 und 22 Knoten.

## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten



## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten

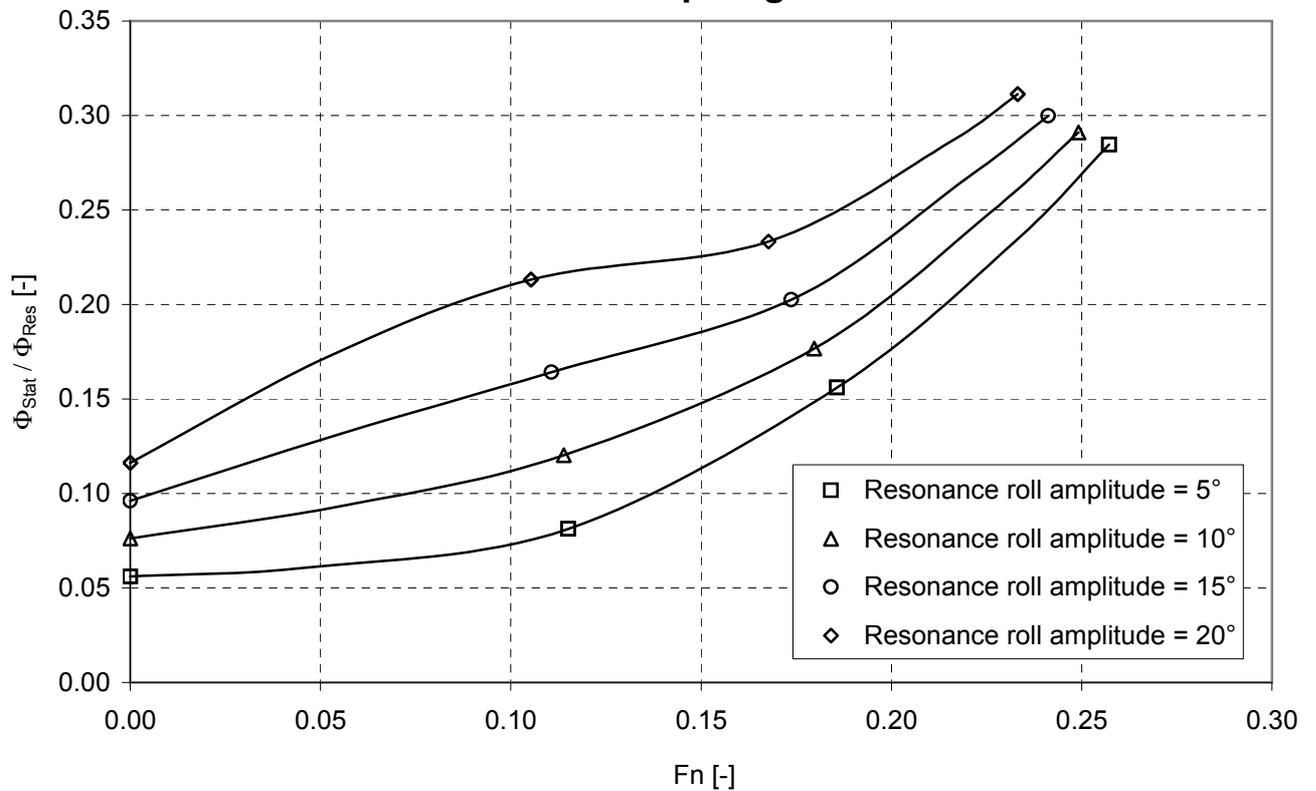


Abb.21: Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten als Funktion von Resonanzrollwinkel und Geschwindigkeit.

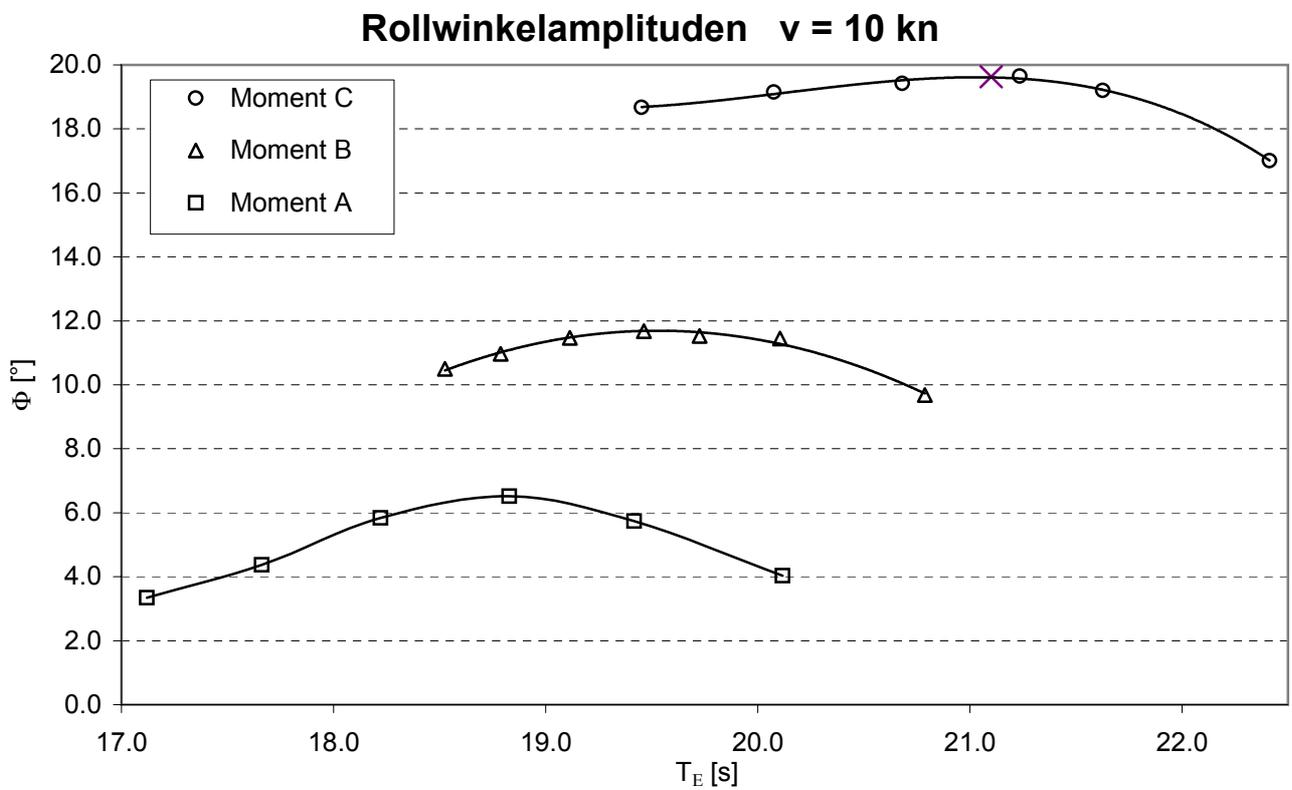
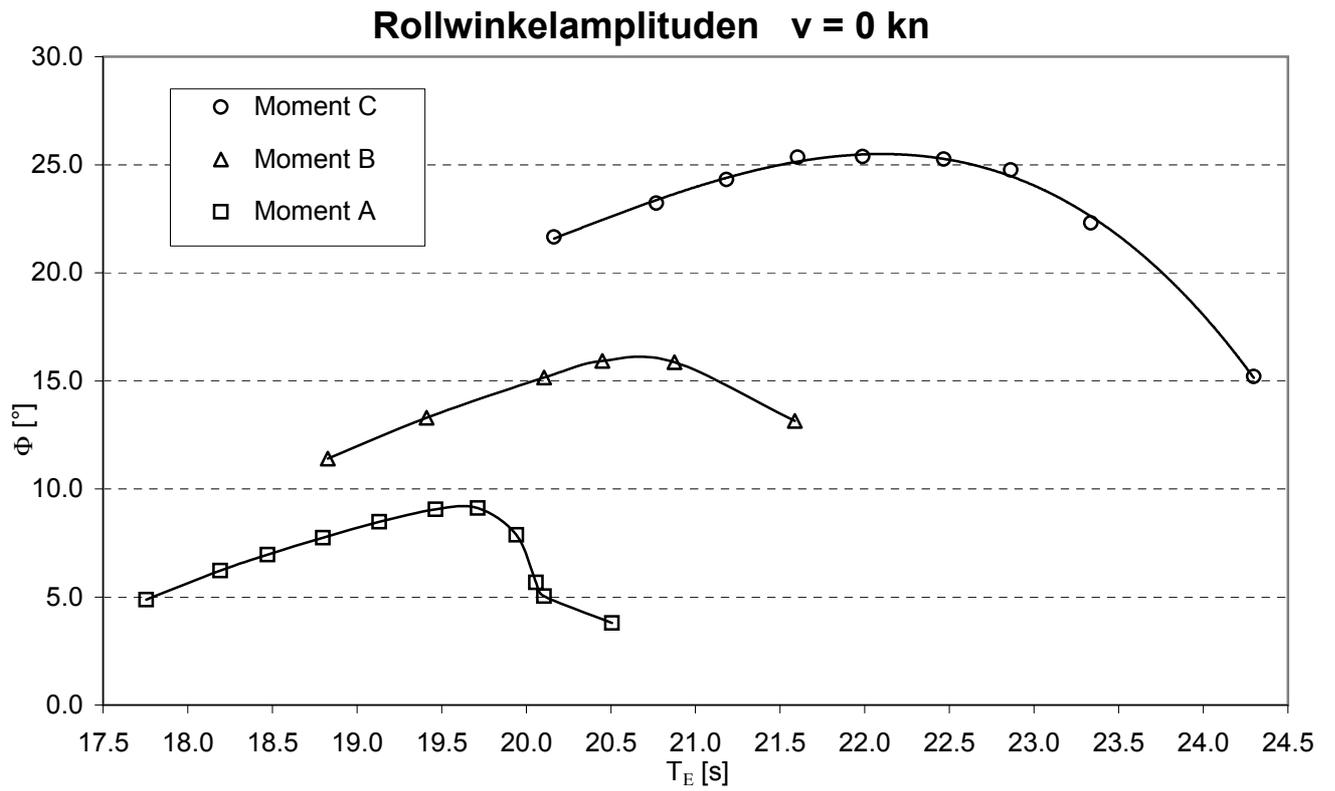


Abb.22a: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 0 und 10 Knoten.

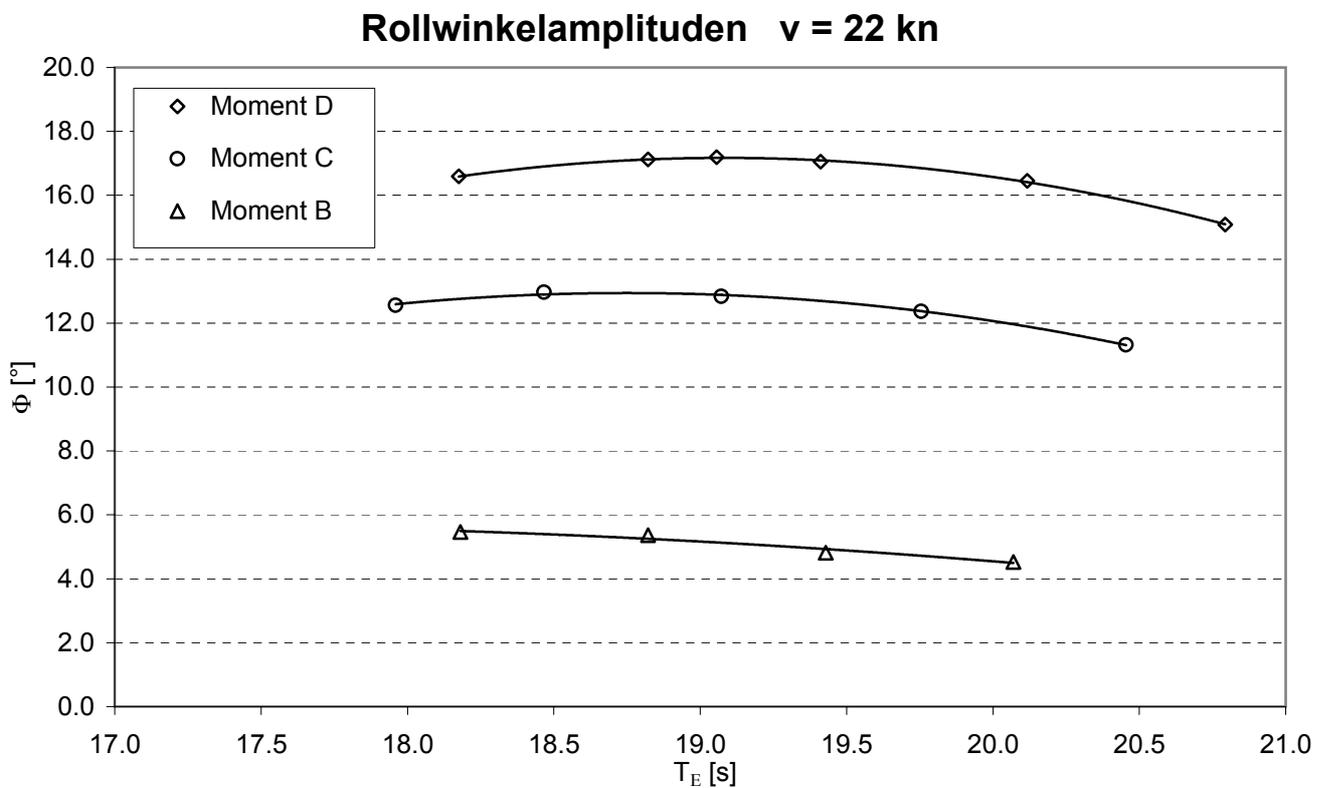
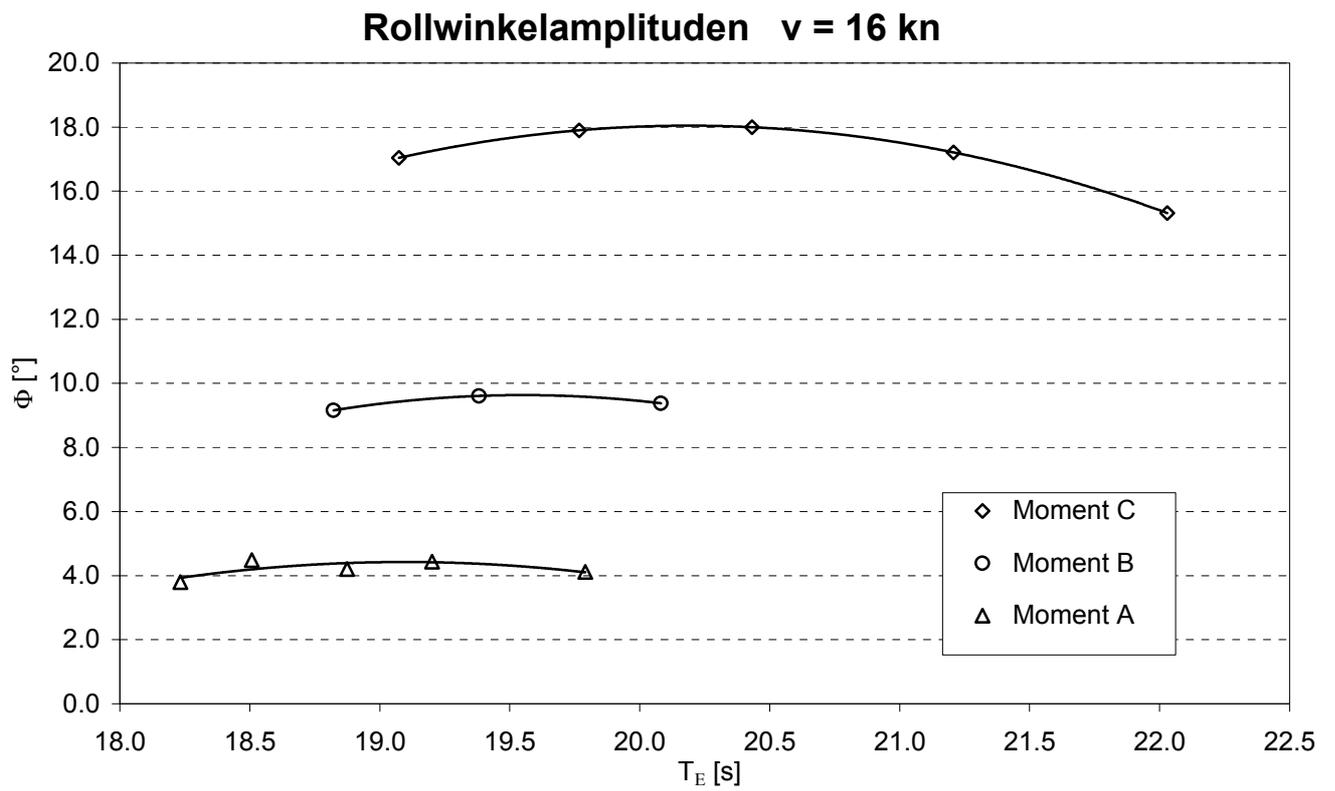
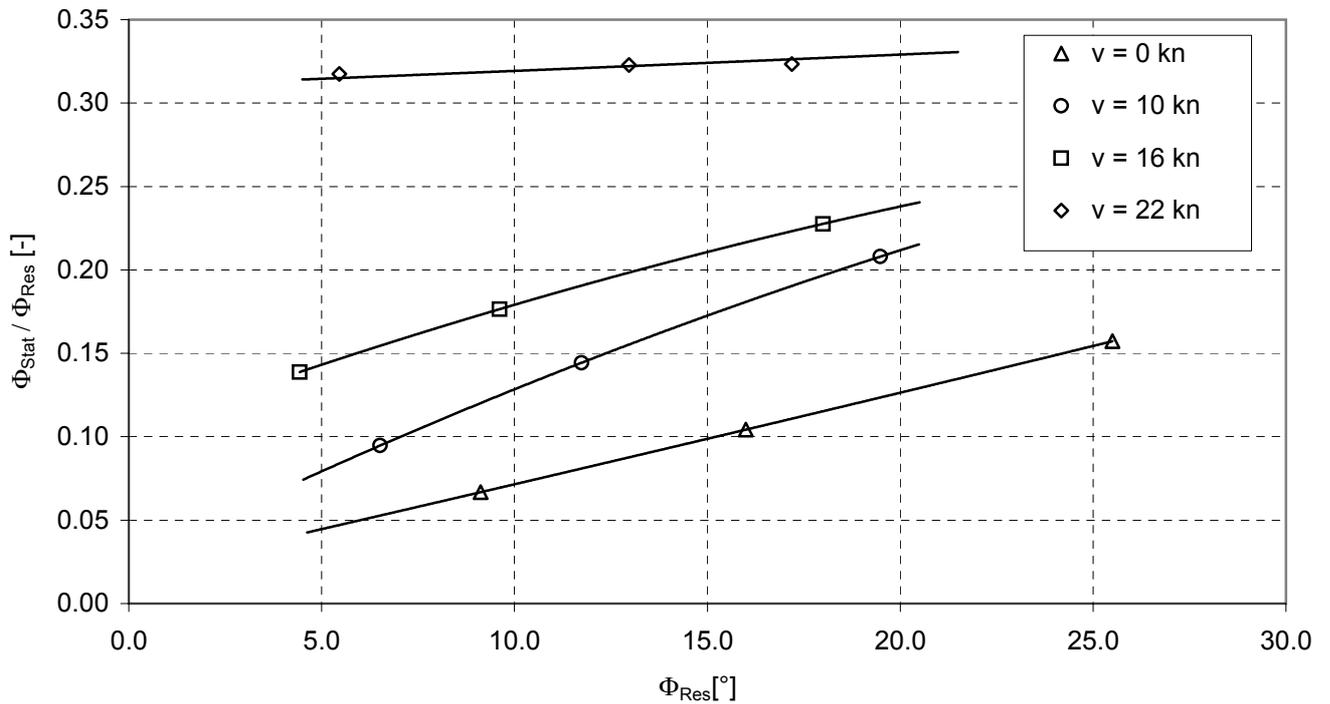


Abb. 22b: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 16 und 22 Knoten.

## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten



## Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten

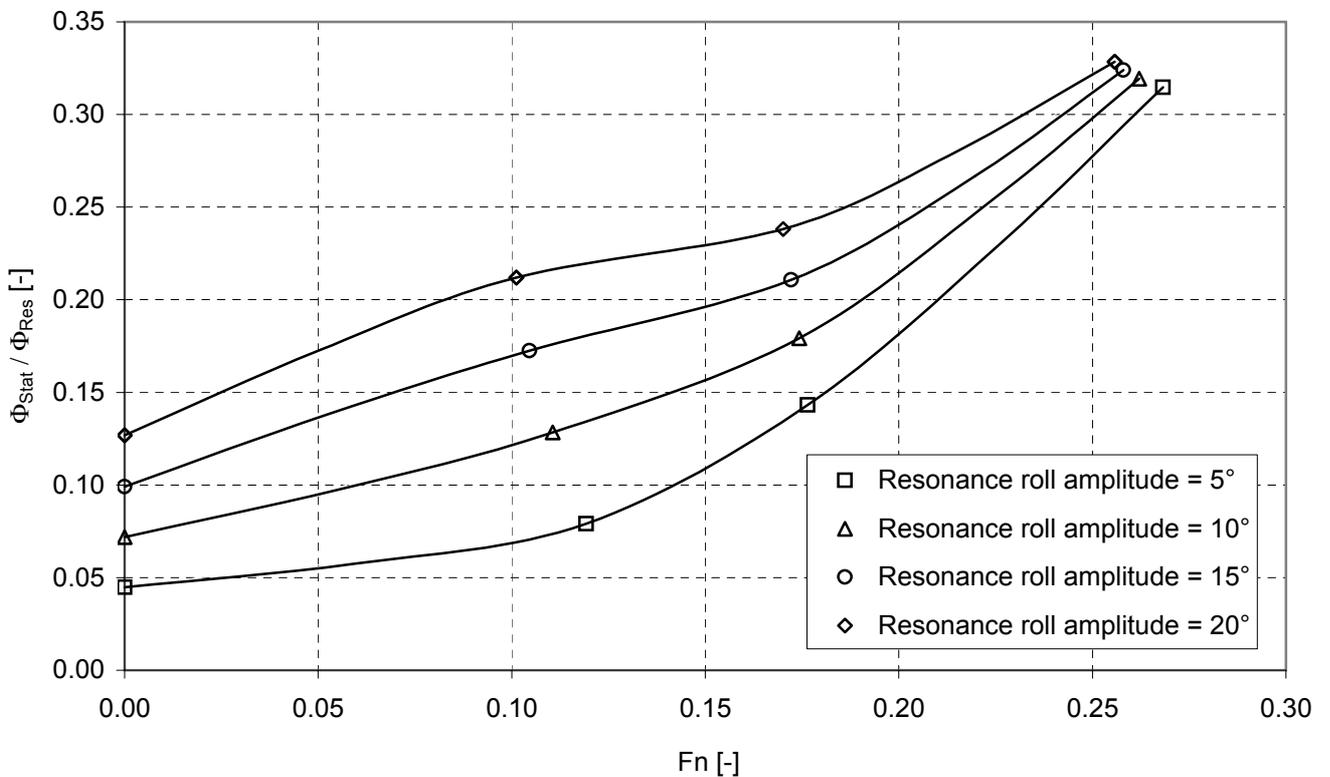


Abb.23: Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten als Funktion von Resonanzrollwinkel und Geschwindigkeit.

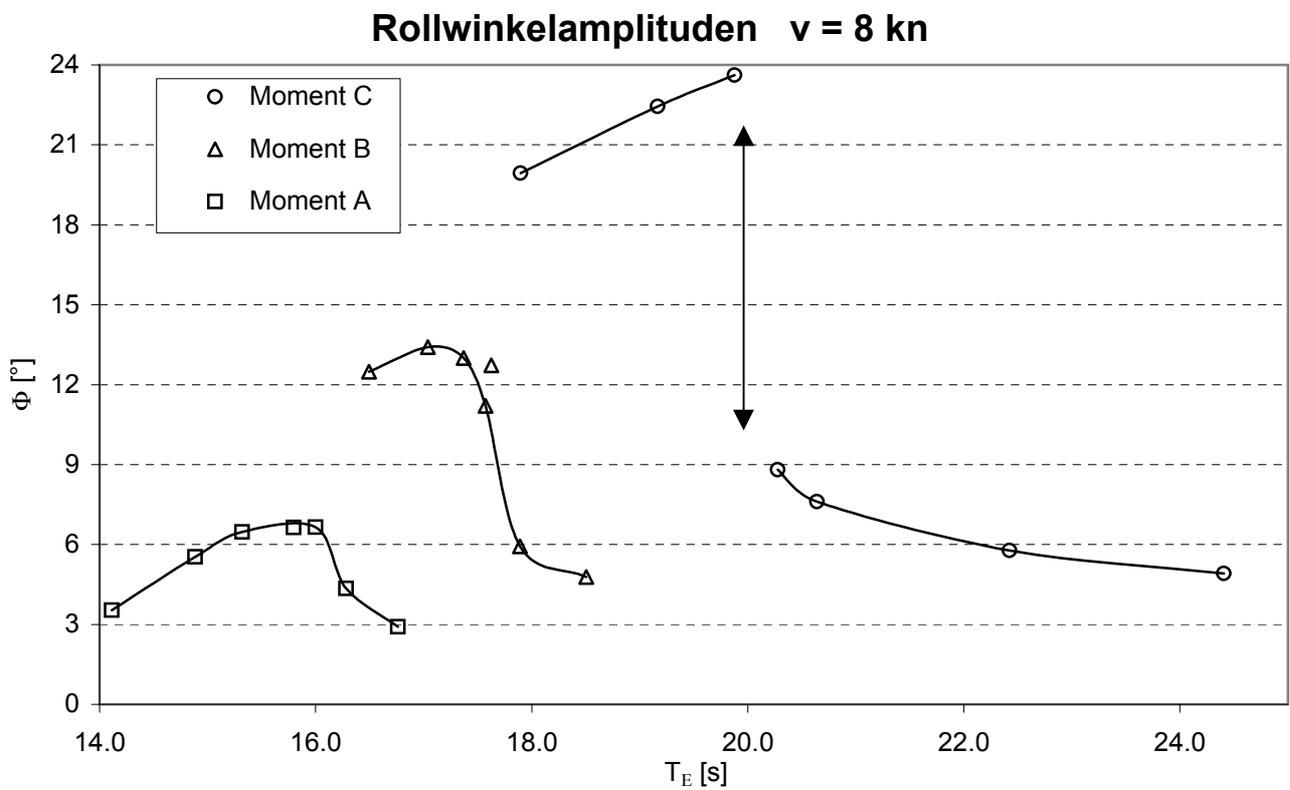
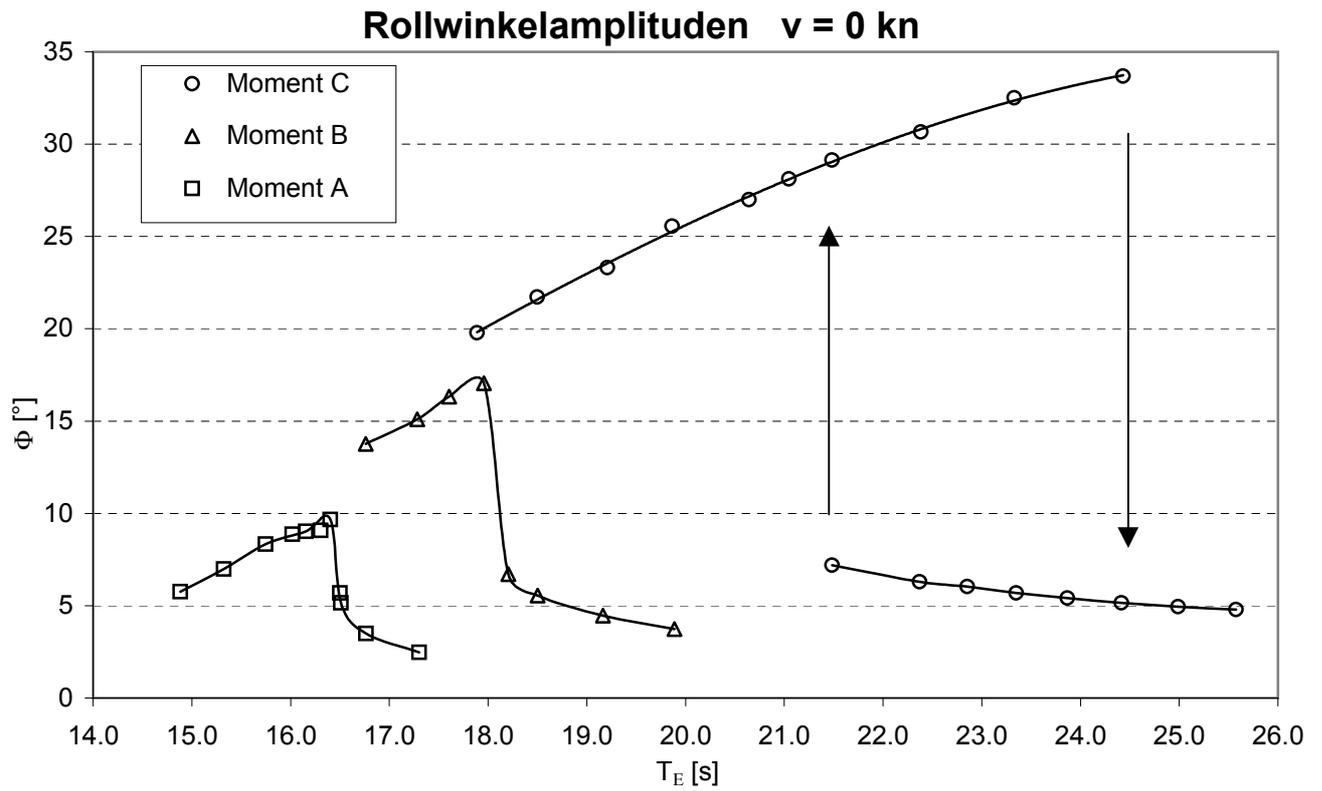
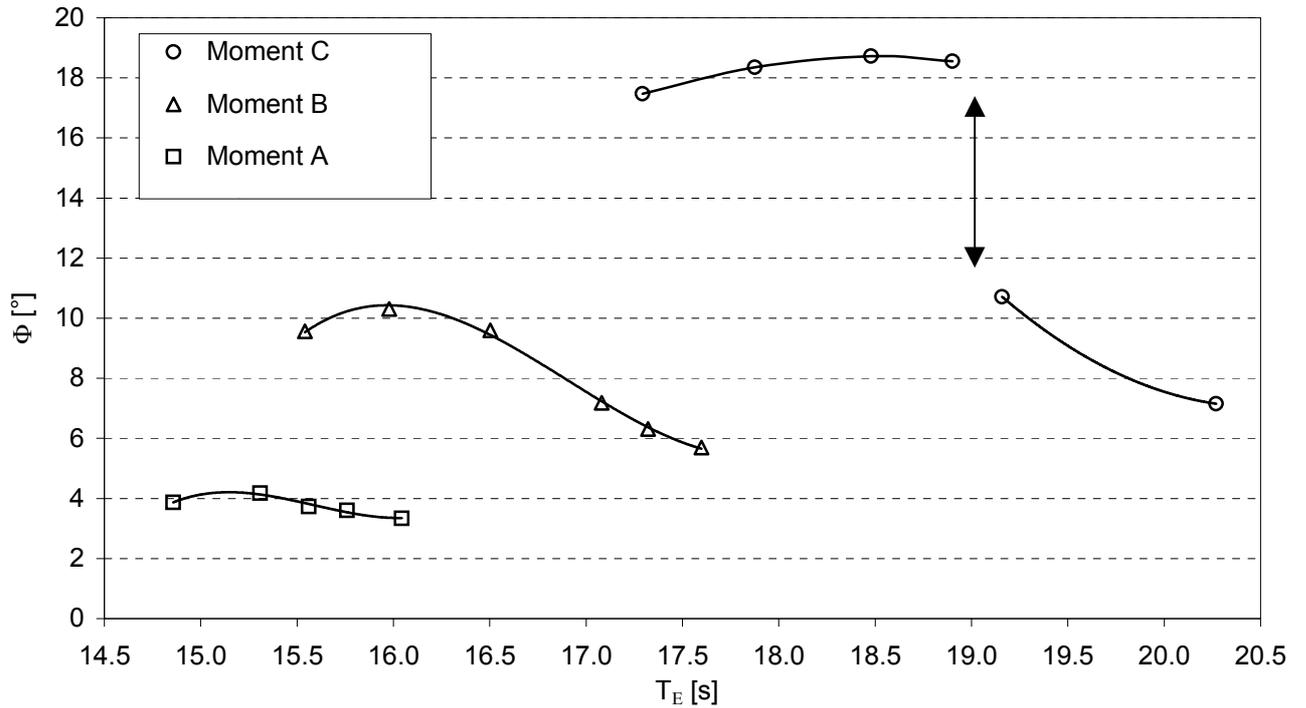


Abb.24a: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 0 und 10 Knoten.

## Rollwinkelamplituden $v = 14$ kn



## Rollwinkelamplituden $v = 20$ kn

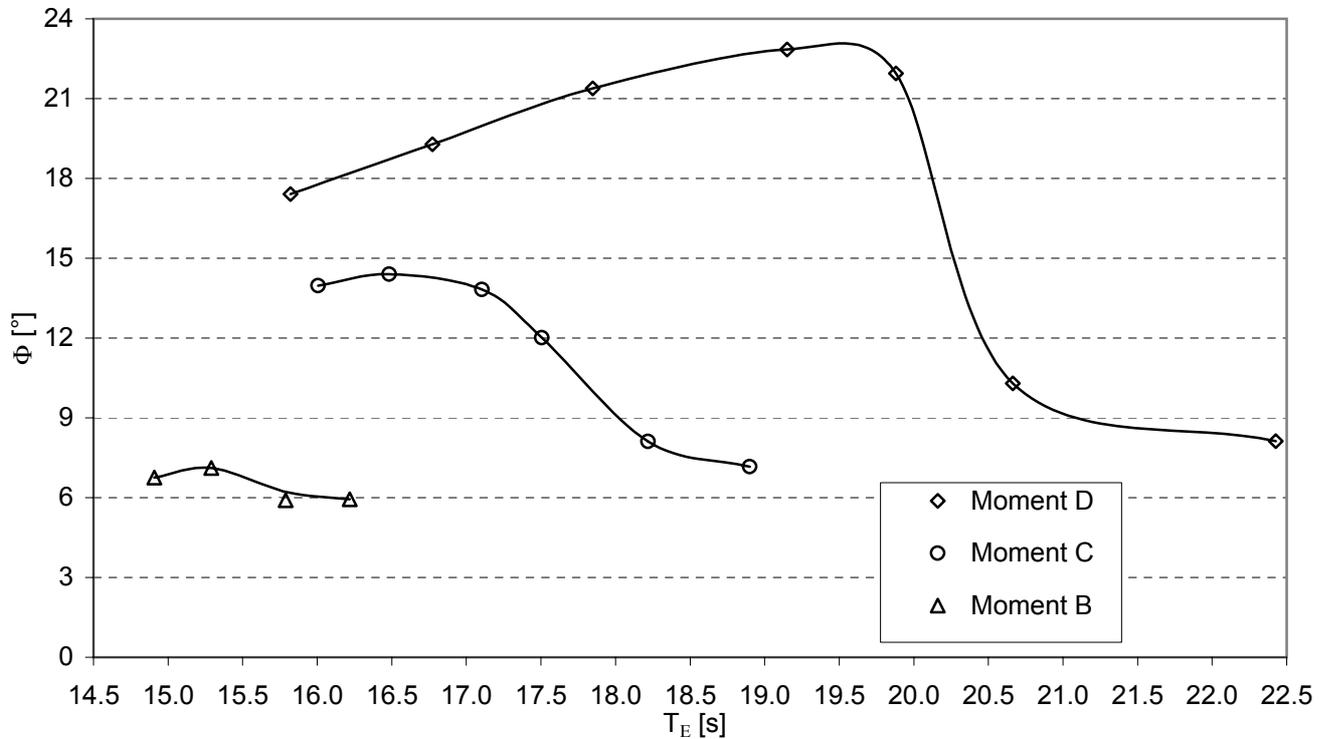


Abb. 24b: Gemessene Rollwinkelamplituden als Funktion der Erregungsperiode bei 16 und 22 Knoten.

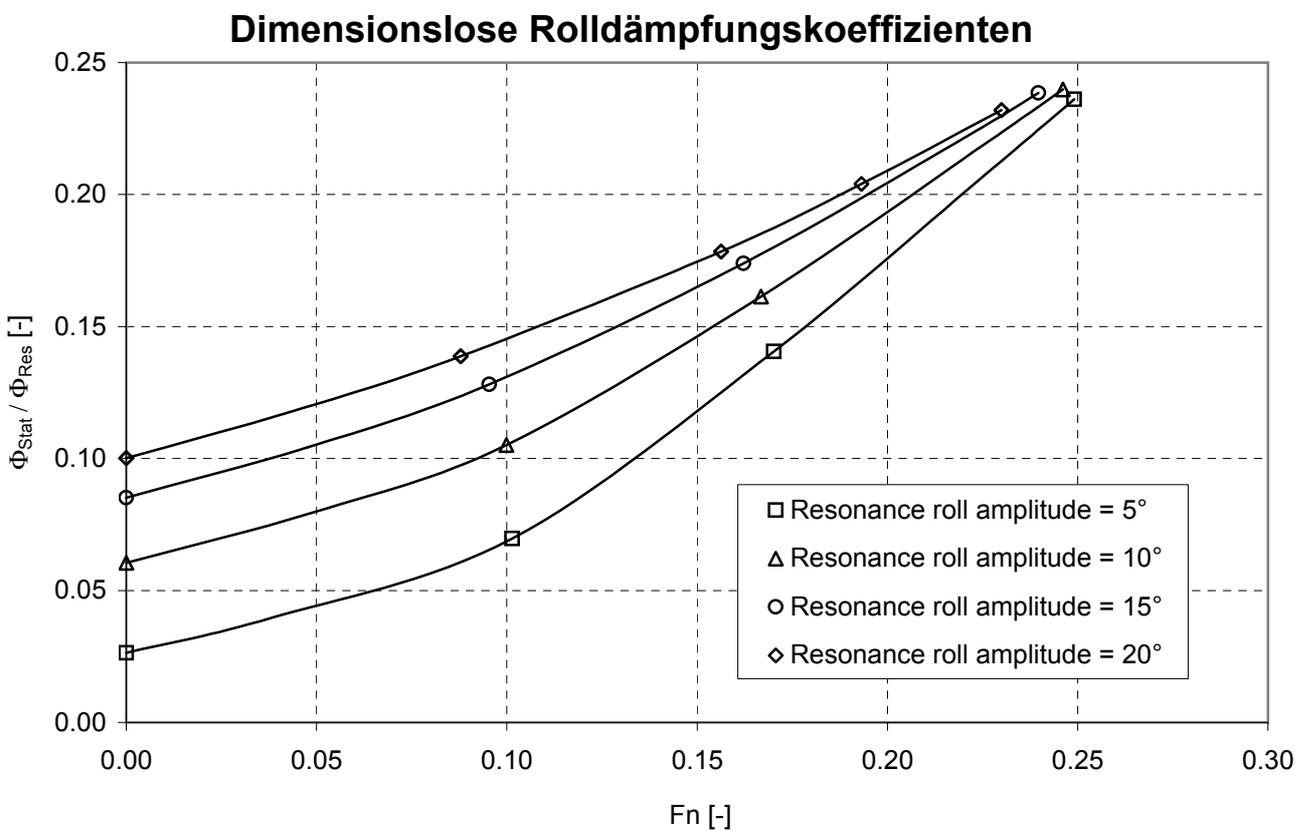
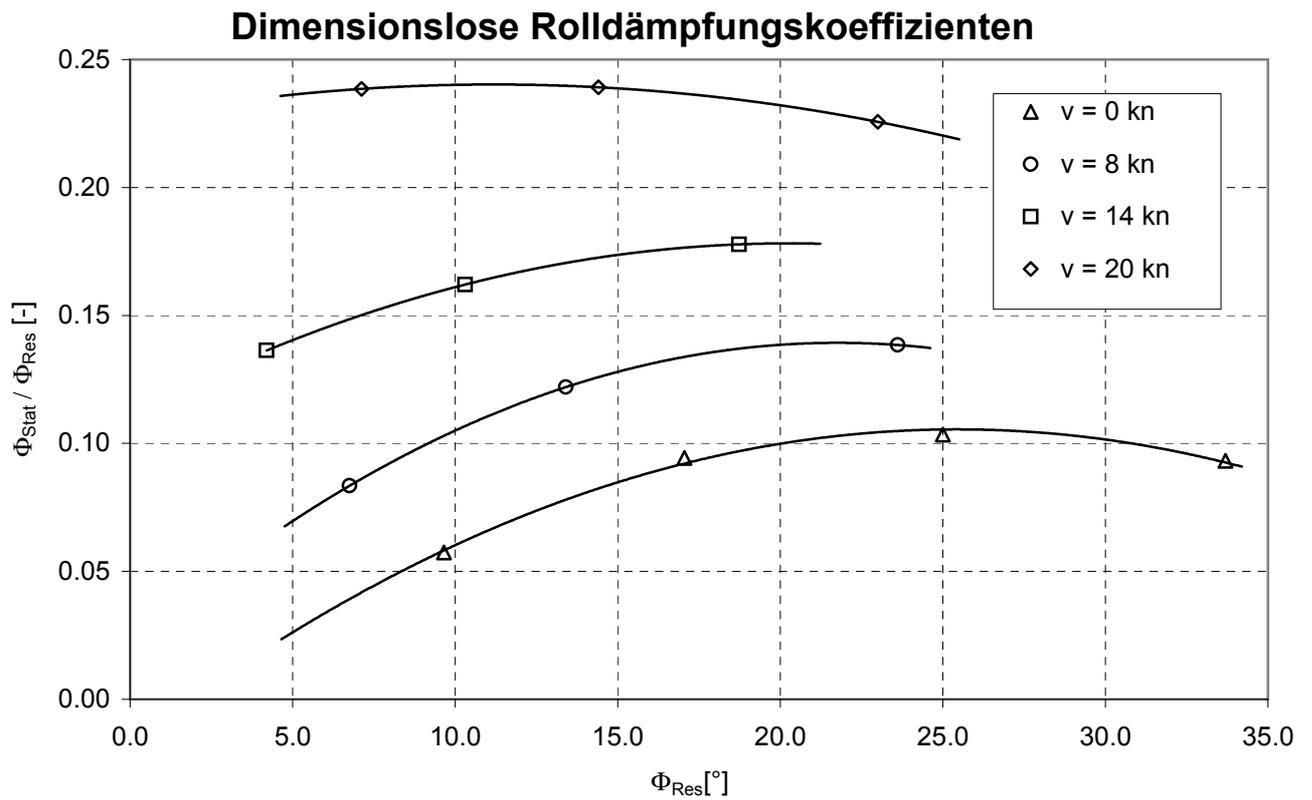


Abb.25: Dimensionslose Rolldämpfungskoeffizienten als Funktion von Resonanzrollwinkel und Geschwindigkeit.