

Versuchsbericht

zu Windkanaluntersuchungen

Auftrag 083/265952/000

Thema: **Ermittlung aerodynamischer Widerstandsbeiwerte von
Schiffsmodellen mit unterschiedlichen Tiefgängen und
Beladungszuständen**

Kurztitel: HPA - Beiwerte

Auftraggeber: **Fraunhofer AGP Rostock**
Albert-Einstein-Str. 30, 18059 Rostock

Auftragsdatum / Bearbeitungsbeginn: 16.09.2015

Auftragnehmer: **MariKom GmbH**
Friedrich-Barnewitz-Str. 3, 18119 Rostock

Themenbearbeiter: Dipl.-Ing. Christian Semlow

Anzahl der Seiten: 22
Anzahl der Tabellen: 2
Anzahl der Abbildungen: 18

Datum der Fertigstellung des Berichtes: 15.12.2015
Überarbeitete Fassung: 21.01.2016

Vorwort

Gegenstand der Versuche ist die Ermittlung aerodynamischer Widerstandsbeiwerte mit Hilfe von Schiffsmodellen, deren Belastungen durch die Anströmung im Windkanal gemessen werden. Diese Modelle haben dabei unterschiedliche Tiefgänge und Beladungszustände.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse systematischer Modellexperimente und durchgeführter Berechnungen über den Widerstand von Schiffen in Längs- und Querrichtung durch Windbelastungen aus unterschiedlichen Richtungen zusammen.

Der Kenntniszuwachs bildet das Fundament für die Bestimmung von Belastungen auf feste Liegeplätze für Schiffe wie z.B. Dalben, Pfähle, Poller oder Kaianlagen.

Danksagung

An dieser Stelle sei allen Beteiligten an den Untersuchungen und Auswertungen zum Auftrag für die erfolgreiche Mitwirkung gedankt. Namentlich erwähnen möchte ich Herrn Uwe Pfletscher und Herrn Christian Klötzer vom Fraunhofer AGP insbesondere für die Realisierung des Modellbaus und die Ermittlung der Konstruktionsdaten sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen für die Unterstützung bei den Auswertungen.

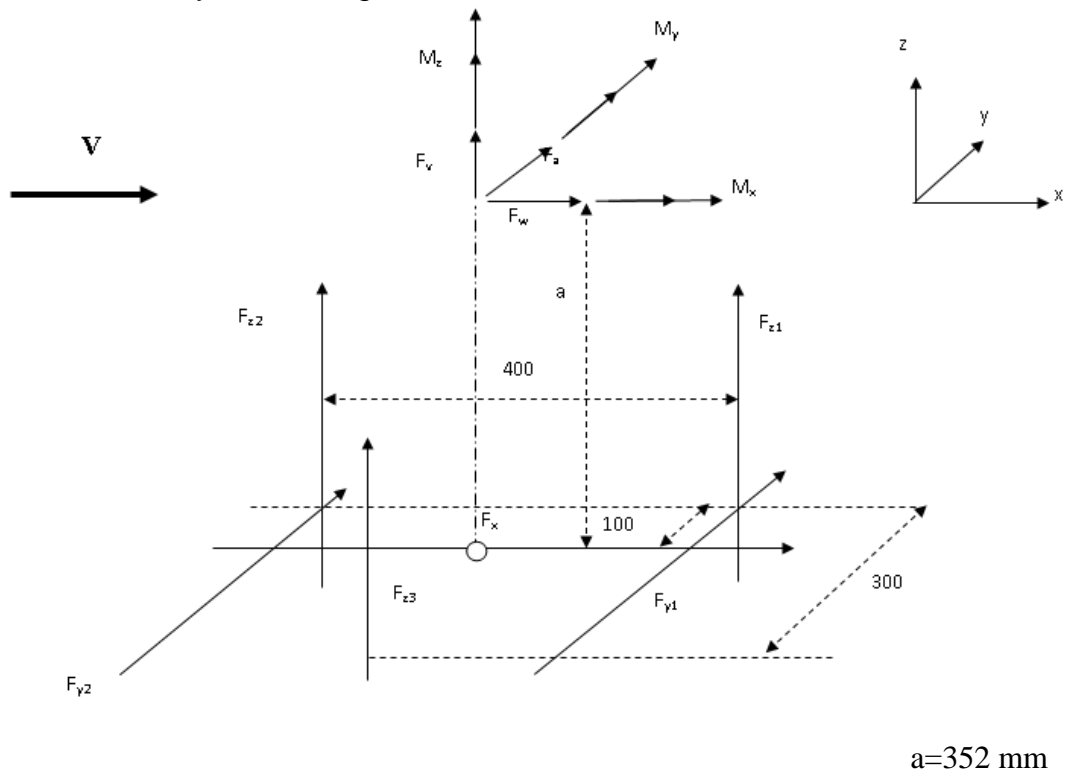
Inhaltsverzeichnis

- Symbolverzeichnis (Bezeichnungen, Koordinatensysteme, Bezugspunkte)
1. Einleitung (Erläuterung der Aufgabenstellung, Motivation)
 2. Versuchsvorbereitung
 - 2.1 Modellbildung
 - 2.1.1 Physikalisches Modell
 - 2.1.2 Mathematische Modellierung
 - 2.2 Versuchsaufbau
 3. Versuchsprogramm und -durchführung
 4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen
 - 4.1 Kräfte- Koeffizienten
 - 4.2 Moment- Koeffizienten
 - 4.3 Kraftkoeffizienten- Vergleich bei unterschiedlichen Reynoldszahlen
 5. Diskussion der Ergebnisse, Vergleich dieser mit jenen aus der Literatur
 6. Zusammenfassung und Ausblick
 7. Literaturverzeichnis
 8. Anlagen

Symbolverzeichnis (Bezeichnungen, Koordinatensysteme, Bezugspunkte)

β	= Anströmwinkel
ρ_L	= Dichte der Luft
v_s	= Strömungsgeschwindigkeit
F_x, F_{x_W}	= Kraft in Richtung der x-Achse im Koordinatensystem der Waage
F_y, F_{y_W}	= Kraft in Richtung der y-Achse im Koordinatensystem der Waage
F_z, F_{z_W}	= Kraft in Richtung der z-Achse im Koordinatensystem der Waage
M_x, M_{x_W}	= Moment um die x-Achse im Koordinatensystem der Waage
M_y, M_{y_W}	= Moment um die y-Achse im Koordinatensystem der Waage
M_z, M_{z_W}	= Moment um die z-Achse im Koordinatensystem der Waage
L_{oa}	= Länge über alles
d	= charakteristische Länge für die Berechnung der Reynolds-Zahlen
$^{\circ}\text{C}$	= Grad Celsius
K	= Kelvin
Re	= Reynoldszahl
B_{ft}	= Beaufort- Windstärke
η_L	= dynamische Viskosität der Luft
p_{dyn}	= dynamischer Luftdruck
F_{x_S}	= Kraft in Richtung der x-Achse im Koordinatensystem des Schiffsmodells
F_{y_S}	= Kraft in Richtung der y-Achse im Koordinatensystem des Schiffsmodells
CF_{x_S}	= Kraftbeiwert von F_{x_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Lateralfläche
CF_{y_S}	= Kraftbeiwert von F_{y_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Lateralfläche
$CF_{x_{Snorm}}$	= Kraftbeiwert von F_{x_S} , bezogen auf die normierte Lateralfläche
$CF_{y_{Snorm}}$	= Kraftbeiwert von F_{y_S} , bezogen auf die normierte Lateralfläche
$CF_{x_{S_{AF}}}$	= Kraftbeiwert von F_{x_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Frontalfläche
$CF_{x_{S_{AF,norm}}}$	= Kraftbeiwert von F_{x_S} , bezogen auf die normierte Frontalfläche
M_{x_S}	= (Roll-)Moment um die x-Achse im Koordinatensystem des Schiffsmodells
M_{y_S}	= (Stampf -)Moment um die y-Achse im Koordinatensystem des Modells
M_{z_S}	= (Gier-)Moment um die z-Achse im Koordinatensystem des Schiffsmodells
CM_{x_S}	= Momentbeiwert von M_{x_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Lateralfläche
$CM_{x_{Snorm}}$	= Momentbeiwert von M_{x_S} , bezogen auf die normierte Lateralfläche
CM_{y_S}	= Momentbeiwert von M_{y_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Lateralfläche
CM_{z_S}	= Momentbeiwert von M_{z_S} , bezogen auf die tiefgangsspezifische Lateralfläche
$CM_{z_{Snorm}}$	= Momentbeiwert von M_{z_S} , bezogen auf die normierte Lateralfläche
A_L	= Projizierte Lateralfläche
A_F	= Projizierte Frontalfläche
A_n	= beliebige Bezugsfläche
L	= Hebelarm
L_n	= beliebiger Abstand als Hebelarm

Koordinatensystem Waage:



$$a=352 \text{ mm}$$

Abb.1: Einbauzustand und Koordinatensystem der 6-Komponenten-Waage im Windkanal

1. Einleitung (Erläuterung der Aufgabenstellung, Motivation)

Gegenstand der Untersuchungen ist die quantitative Bewertung unterschiedlicher Aufbauten-Anordnungen auf Schiffen und Beladungskonfigurationen von Schiffen bei zwei unterschiedlichen Tiefgängen hinsichtlich ihres Strömungswiderstandes. Hierfür werden Messungen mit Modellen in einem Windkanal Göttinger Bauart durchgeführt, um den Aufwand für derartige Untersuchungen gering halten zu können. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei der Anströmung der Modelle gegenüber der Anströmung von Originalen ist über das Ähnlichkeitsgesetz nach Reynolds gegeben.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse systematischer Messungen an den Modellkonfigurationen zusammen.

Die Untersuchungen sind Voraussetzung zur Bewertung und Auslegung von festen Liegeplätzen für Schiffe wie z.B. Dalben, Pfähle, Poller oder Kaianlagen.

2. Versuchsvorbereitung

2.1 Modellbildung

2.1.1 Physikalisches Modell

Das physikalische Modell für die Versuche bestand aus zwei gefrästen Schiffsrümpfen gemäß vorgegebener Konstruktion für die beiden unterschiedlichen Tiefgänge.

Der Modellmaßstab wurde mit 1:500 aus den Vergleichsrechnungen nach Reynolds für die gewünschten Reynoldszahlen gemäß Aufgabenstellung zwischen $1,5 \cdot 10^6$ und $3,5 \cdot 10^6$ ermittelt (Tabelle 1). Damit ergab sich eine Modelllänge von ca. 800 mm, die sich sehr gut in den Kernbereich der Windkanalströmung von ca. 1 m x 1 m einfügte.

Tabelle 1: Ermittlung der Modelldaten über die Reynolds-Ähnlichkeit

Positionen	Zeichen	Maßeinheit	Original-Daten	Modell 1 : 500
charakteristische Länge (hier L_{oa})	d	[m]	400	0,8
Dichte Luft bei 15°C (1,204 bei 20°C)	ρ_L	[kg/m³]	1,225	1,225
dynamische Viskosität Luft bei 288 K	η_L	[kg/ms]	1,78E-05	1,78E-05
Windgeschwindigkeit_1 (3 Bft)	v_{s_1}	[m/s]	5	27
Windgeschwindigkeit_2 (5 Bft)	v_{s_2}	[m/s]	9	38
Windgeschwindigkeit_3 (8 Bft)	v_{s_3}	[m/s]	19	49
Windgeschwindigkeit_4 (10 Bft)	v_{s_4}	[m/s]	27	60
$Re = v_s * \rho_L * d / \eta_L$				
für Windgeschwindigkeit_1	Re_1	[-]	1,38E+08	1,49E+06
für Windgeschwindigkeit_2	Re_2	[-]	2,48E+08	2,10E+06
für Windgeschwindigkeit_3	Re_3	[-]	5,24E+08	2,70E+06
für Windgeschwindigkeit_4	Re_4	[-]	7,45E+08	3,31E+06

Mit dem ermittelten Modellmaßstab wurden die Bezugsmaße, die der gegebenen Konstruktionsdatei entnommen wurden, auf den Modellmaßstab umgerechnet (Anlage 1). Das betrifft die Flächenangaben für die projizierten Lateral- und Frontalflächen mit deren Schwerpunkten sowie Abstandsmaße zwischen Bezugspunkten bzw. -flächen.

Damit wurden die die Transformation des Koordinatensystems und die Berechnungen der Kräfte und Momente sowie deren Koeffizienten im Abschnitt 2.1.2 *Mathematische Modellierung* ermöglicht.

2.1.2 Mathematische Modellierung

Als Grundlage für die mathematische Modellierung diente ein Satz von Blendermann [1]. Entsprechend des darin beschriebenen Berechnungsverfahrens wurden die folgenden Ableitungen vorgenommen, wobei auf die Berücksichtigung einer Schiffsgeschwindigkeit verzichtet werden konnte, da das Modell ohne eigene Fahrt im

Windkanal angeströmt wurde. Damit war der scheinbare Wind gleich dem wahren Wind und deren Anströmwinkel identisch.

Durch die Messungen mit der 6-Komponenten-Waage, dem Drehtisch sowie durch die Daten der Windkanalsteuerung liegen u.a. die folgenden benötigten Daten je Messung vor:

- Der Anströmwinkel β ,
- die Dichte der Luft ρ_L ,
- die Strömungsgeschwindigkeit v_s
- die Kräfte im Koordinatensystem der Waage F_{x_W} und F_{y_W} sowie
- die Momente M_{x_W} , M_{y_W} und M_{z_W} ,

wobei diese Kräfte und Momente für das sogenannte waagenfeste bzw. strömungsfeste Bezugssystem definiert sind und F_{x_W} in Strömungsrichtung weist und F_{y_W} sowie F_{z_W} gemäß des kartesischen Koordinatensystems rechtwinkelig horizontal bzw. vertikal dazu (Abb.2). Für die weiteren Betrachtungen ist analog den Ausführungen von [1] die Kraft F_{z_W} , also in z-Richtung, nicht von Interesse. Die Momente M_{x_W} , M_{y_W} und M_{z_W} um die Achsen x , y , z ergeben sich wie in Abb.3 gezeigt.

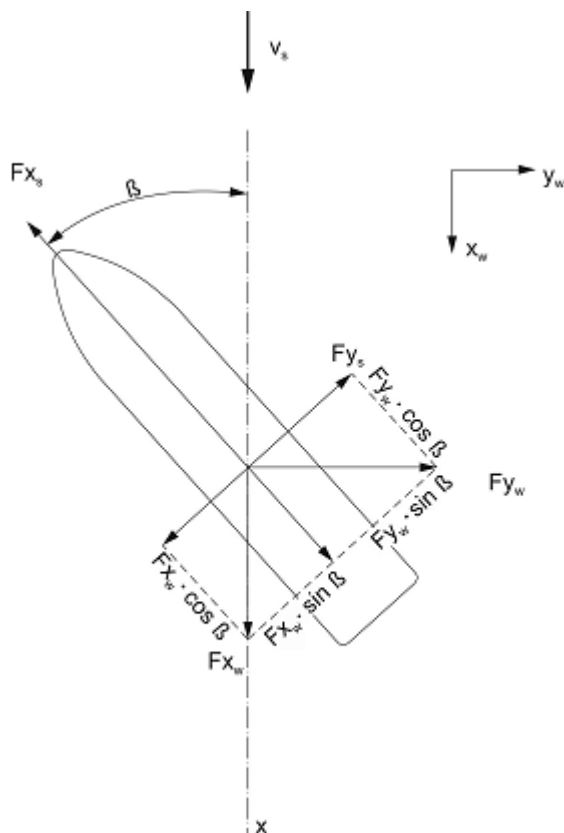


Abb.2: Transformation der Kräfte aus dem Waage-Koordinatensystem in das Schiff-Koordinatensystem

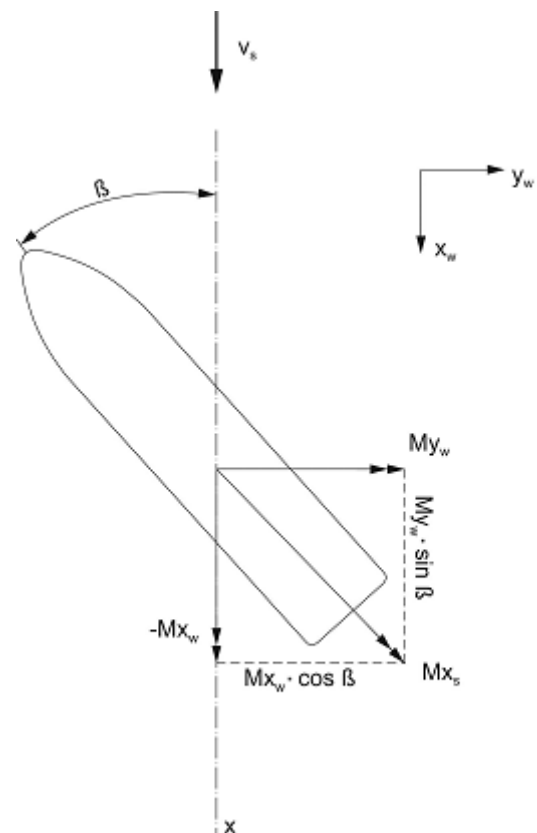


Abb.3: Transformation der Momente aus dem Waage-Koordinatensystem in das Schiff-Koordinatensystem

Der Bezugspunkt für die ermittelten Kraftkomponenten im Waage-Koordinatensystem ist der Schnittpunkt von Mitte Schiff (MS) mit der halben Länge über alles ($L_{oa}/2$) und der jeweiligen Wasserlinie (WL). Damit ist dieser Punkt ebenfalls Koordinatenursprung für das schiffsfeste Koordinatensystem, für das die Kräfte über die Gleichungen

$$F_{x_S} = - [F_{x_W} \cdot \cos \beta + F_{y_W} \cdot \sin \beta] \quad (1)$$

$$F_{y_S} = -F_{y_W} \cdot \cos \beta + F_{x_W} \cdot \sin \beta \quad (2)$$

transformiert und damit deren Beiwerte CF_{x_S} und CF_{y_S} durch das Dividieren mit dem dynamischen Druck $p_{dyn} = \rho_L/2 \cdot v_s^2$ mal einer Bezugsfläche A_L gebildet werden:

$$CF_{x_S} = F_{x_S} / \rho_L/2 \cdot v_s^2 \cdot A_L \quad (3)$$

$$CF_{y_S} = F_{y_S} / \rho_L/2 \cdot v_s^2 \cdot A_L \quad (4)$$

Dabei wurde als Bezugsfläche A_L die Lateralfäche des Schiffsrumpfes ohne Ladung und Aufbauten ausschließlich für den Tiefgang von 13 m gewählt.

Für anders spezifizierte, beliebige gewählte Bezugsflächen A_n können mittels eines Faktors, der aus dem Verhältnis der oben genannten Fläche A_L zu der spezifischen Fläche A_n mit

$$CF_{x_{Sn}} = CF_{x_S} \cdot A_L / A_n \quad \text{und} \quad CF_{y_{Sn}} = CF_{y_S} \cdot A_L / A_n \quad (5)$$

gebildet wird, diese Beiwerte entsprechend umgerechnet werden. Eine Auswahl von relevanten Flächenangaben ist in Anlage 1 aufgelistet.

Analog wird mit der Modellierung der Moment-Beiwerte verfahren.

Gemäß der Zuordnung der Momente und deren Richtung in Abb.3 kann das Rollmoment M_{x_S} mit der Gleichung

$$M_{x_S} = - M_{x_W} \cdot \cos \beta + M_{y_W} \cdot \sin \beta \quad (6)$$

gebildet werden und das Giermoment M_{z_S} durch

$$M_{z_S} = - M_{z_W}. \quad (7)$$

Das Moment M_{y_S} um die y -Achse, das das Stampfen des Schiffes charakterisiert, wird für die vorliegende Aufgabenstellung vernachlässigt.

Die Moment-Beiwerte CM_{x_S} und CM_{z_S} werden durch das Dividieren des Roll- bzw. Giermoments M_{x_S} bzw. M_{z_S} mit dem dynamischen Druck $p_{dyn} = \rho_L/2 \cdot v_s^2$ mal einer Bezugsfläche A_L und Hebelarm L gebildet:

$$CM_{x_S} = M_{x_S} / \rho_L/2 \cdot v_s^2 \cdot A_L \cdot L \quad (8)$$

$$CM_{z_S} = M_{z_S} / \rho_L/2 \cdot v_s^2 \cdot A_L \cdot L \quad (9)$$

Dabei wurde als Bezugsfläche A_L analog zur Berechnung der Kräfte nach den Gleichungen (3) und (4) die Lateralfäche des Schiffsrumpfes ohne Ladung und Aufbauten für den Tiefgang von 13 m gewählt. Für den Hebelarm L wurde die Länge über alles L_{oa} genutzt.

Für anders spezifizierte, beliebige gewählte Bezugsflächen A_n bzw. Hebelarme L_n können mittels eines Faktors für die Flächenspezifikation analog zu (5) die Beiwerte angepasst werden.

$$CM_{x_{Sn}} = CM_{x_S} \cdot A_L/A_n \cdot L_{oa}/L_n \quad \text{und} \quad CM_{y_{Sn}} = CM_{y_S} \cdot A_L/A_n \cdot L_{oa}/L_n \quad (10)$$

Eine Auswahl von relevanten Längenangaben ist ebenfalls in Anlage 1 aufgelistet.

2.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurden folgende Geräte sowie Mess- und Aufzeichnungstechnik genutzt:

- Großer Niedergeschwindigkeitswindkanal Göttinger Bauart mit einem Düsenquerschnitt von 1,4 m x 1,4 m und einer Messstreckenlänge von 2,8 m (Abb. 3) für Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 62 m/s
- 6-Komponenten-Waage mit 6 Kraftaufnehmern als Messgeräte und einem schrittmotorangetriebenen Drehtisch für die Messung von wirkenden Kräften auf die darauf befestigten Modelle in den drei Richtungen des kartesischen Koordinatensystems (Abb. 4)
- Messverstärkersystem MGCplus mit dem Programm catman® zur Erfassung und Verarbeitung von Messwerten der einzelnen Messgeräte des Versuchsaufbaus (Abb. 5 und 6)

Der Versuchsaufbau ist in der Skizze gemäß Abbildung 7 dargestellt, wobei die Modelle auf der vertikalen Achse des Drehtisches montiert sind.

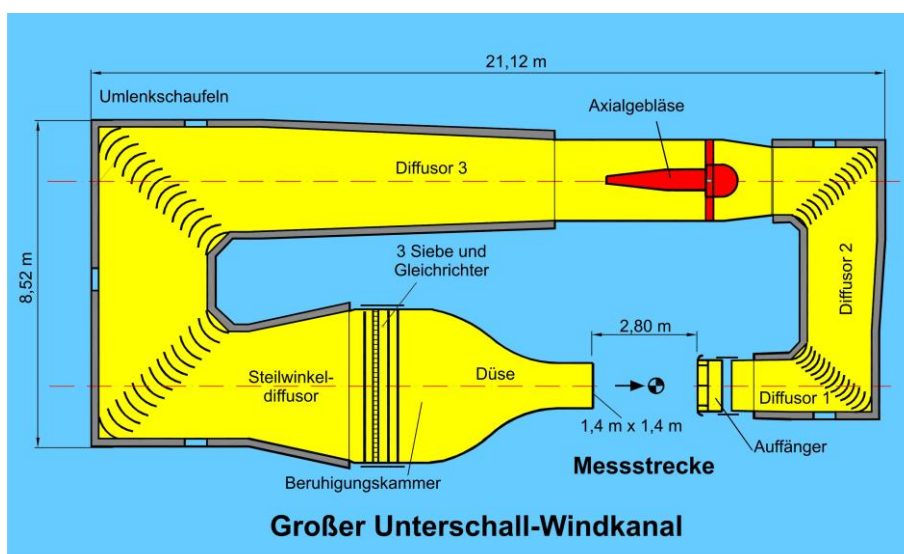
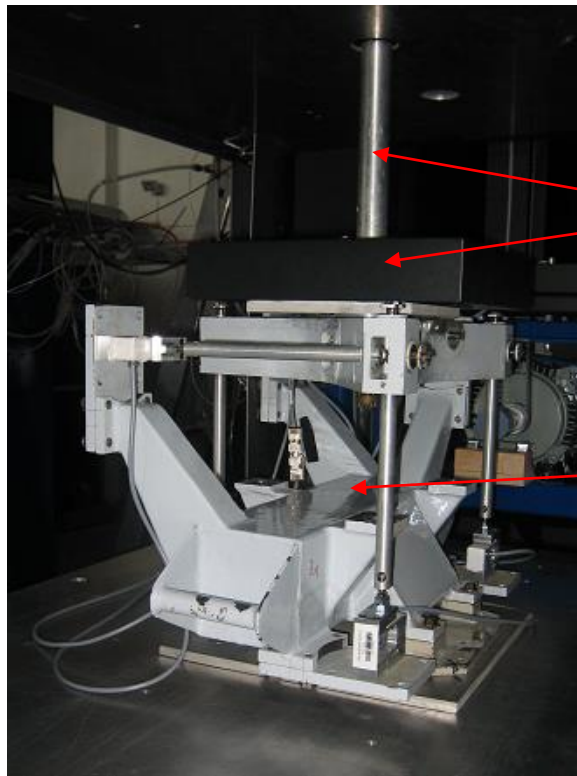


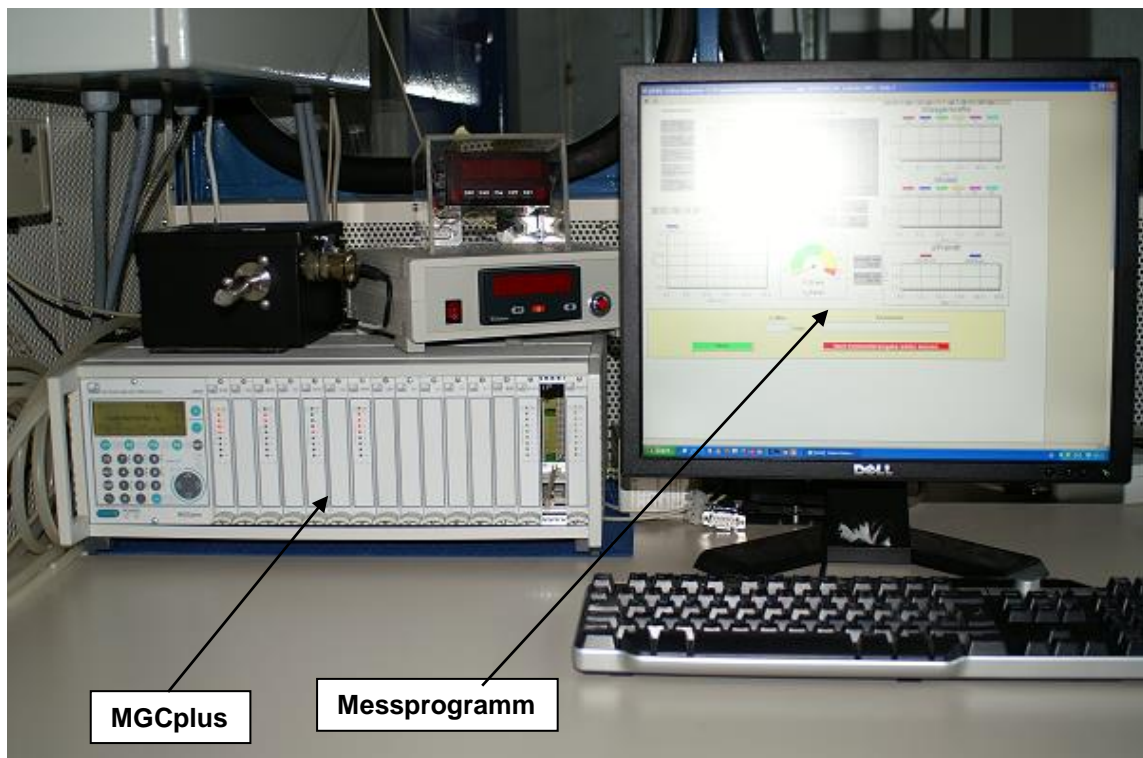
Abb. 3: Bauskizze des Großen Unterschall-Windkanals mit Bezeichnung der Baugruppen



Drehtisch mit Achse zur Modellbefestigung

6-Komponenten-Waage

Abb. 4:
6-Komponenten-Waage mit Zug-Druck-Kraftaufnehmern auf DMS-Basis und Drehtisch mit Schrittmotor



MGCplus

Messprogramm

Abb. 5: Messverstärkersystem MGCplus und Bildschirmarbeitsplatz mit Messprogramm

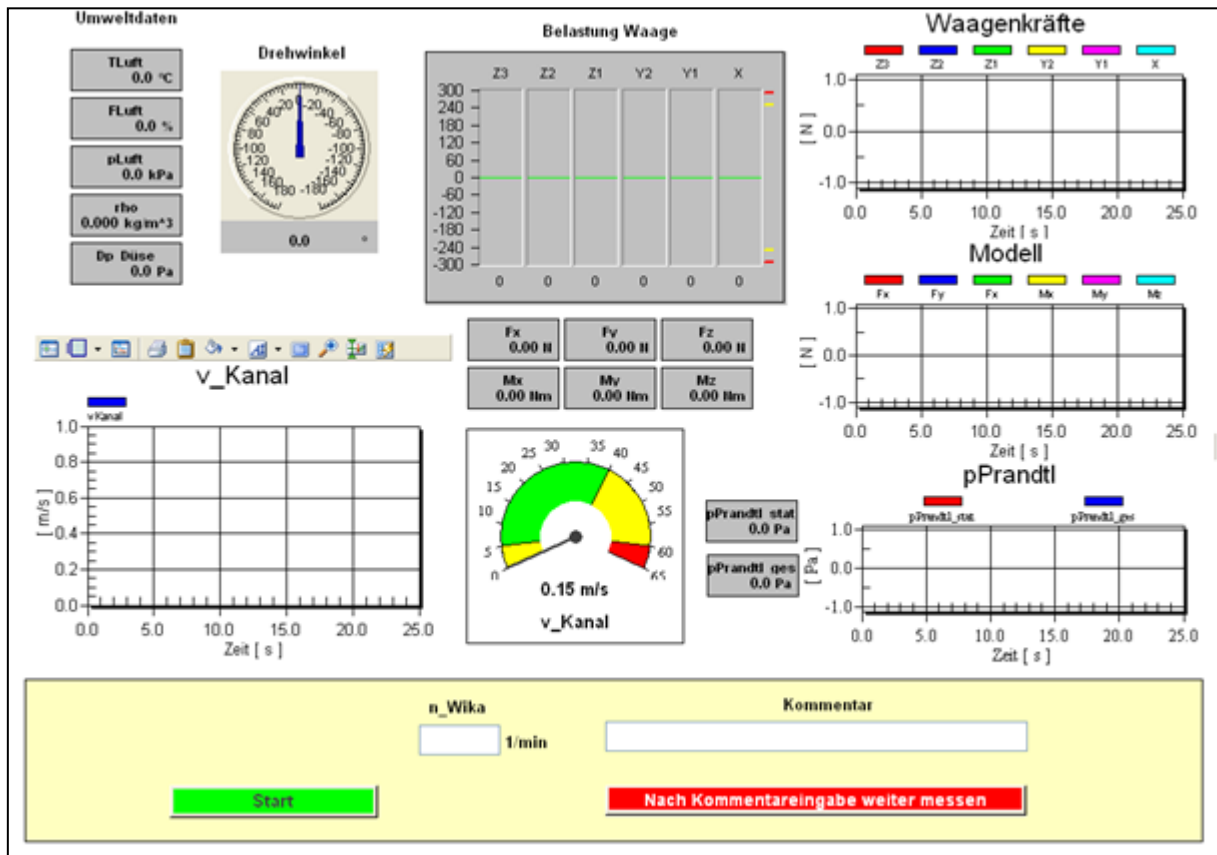


Abb. 6: Bildschirmdarstellung des Messprogramms mit dem Verlauf der Kraft- und Geschwindigkeitsmessungen

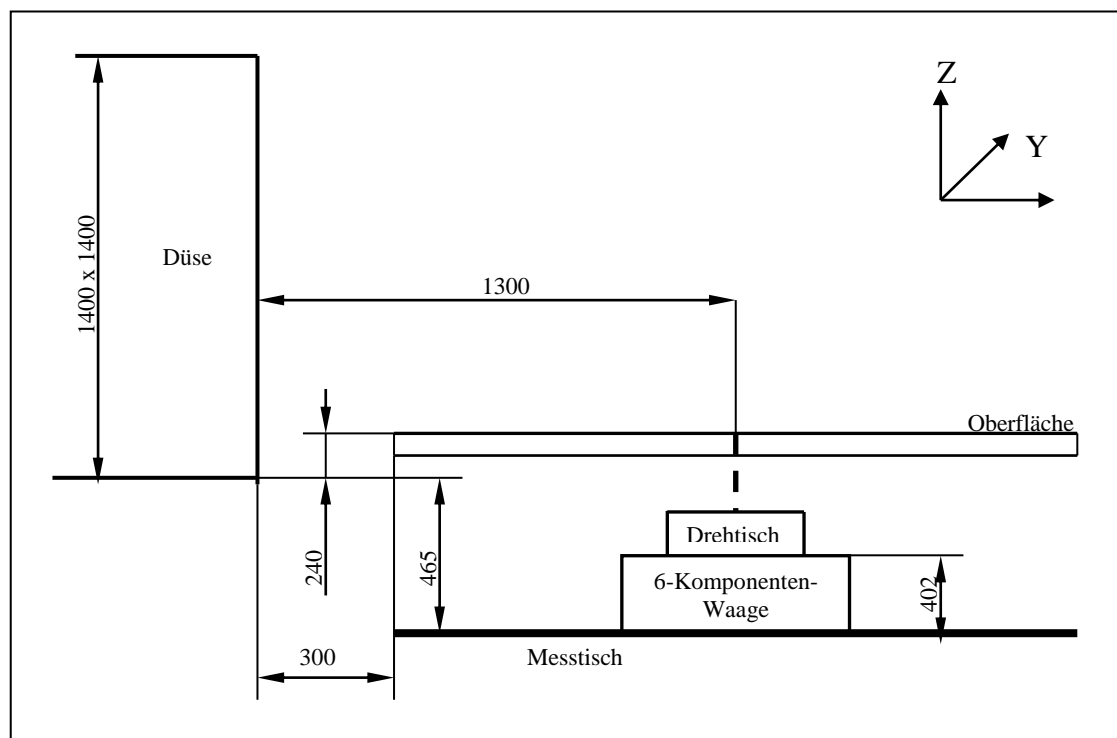


Abb. 7: Anordnung der Messtechnik im Versuchsaufbau (Maße in mm)

Bei diesem Geräte- und Versuchsaufbau steht das Modell, wie in Abbildung 8 zu sehen, in der Mittellinie des Windkanals.

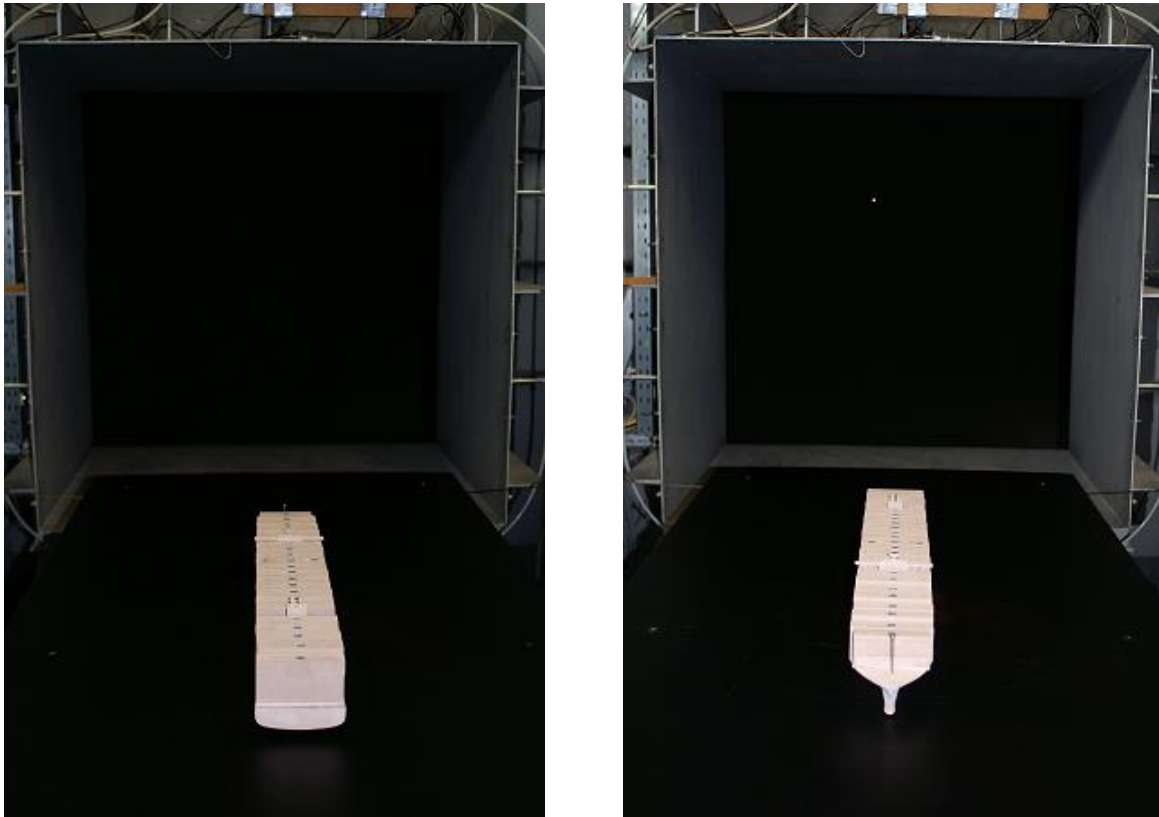


Abb.8: Modell in der Messstrecke des Windkanals auf der Drehtisch-Achse montiert, links in der 0°-Position zur Anströmung und rechts in der 180°-Position

3. Versuchsprogramm und -durchführung

Das Versuchsprogramm orientierte sich an der Aufgabenstellung gemäß Spezifikation, Positionen II-1 und II-2. Die geforderte Anzahl der Messungen in diesen Positionen wurde geringfügig mit messtechnisch relevanten Messungen ergänzt. In Anlage 2 ist das Versuchsprogramm tabellarisch dargestellt. Die einzelnen Ladungs-, Tiefgangs- und Aufbaukonfigurationen, die untersucht wurden, sind in der Anlage 5 mit Fotos dokumentiert. Beispielhaft werden die beiden Schiffstypen gezeigt (Abb. 9 und 10).

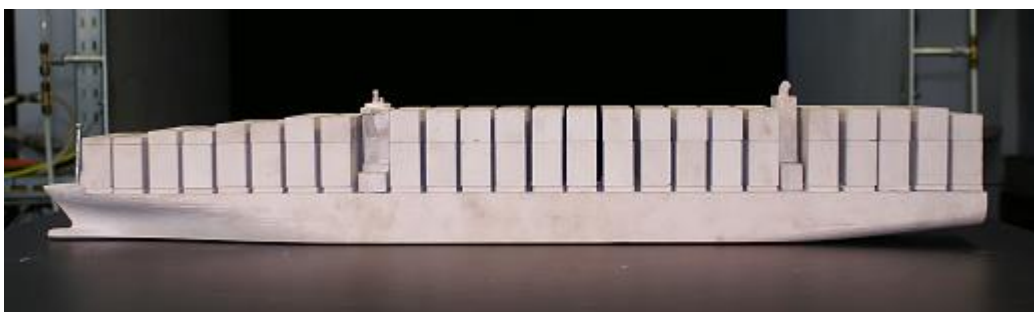


Abb. 9: „Globe“- Modell, Tiefgang 10 m, voll beladen, in der 90°-Position

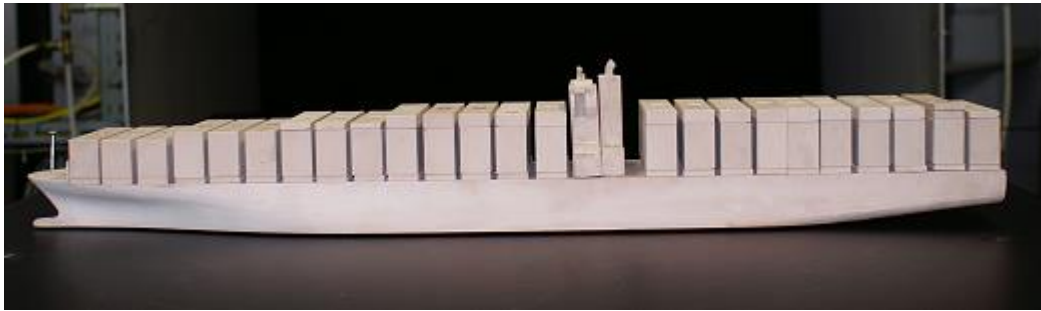


Abb. 10: „Emma“- Modell, Tiefgang 10 m, voll beladen, in der 90°-Position

Die Wahl der Anströmgeschwindigkeiten erfolgte aus den Ergebnissen zur Ermittlung der Modelldaten über die Reynolds-Ähnlichkeit gemäß Tabelle 1 und wurde im Rahmen der technischen Möglichkeiten des Windkanals mit gleichen Abstufungen eingeteilt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Festlegung der Anströmgeschwindigkeiten für die Versuche

Position der Auftragspezifikation	Titel für die Messungen	Strömungsgeschwindigkeit		Reynoldszahl Re [-]
		Bezeichnung	vs [m/s]	
II-1	Messreihe	V_{s_M}	40	2,21E+06
II-2	Vergleich_1	V_{s_V1}	10	5,52E+05
II-2	Vergleich_2	V_{s_V2}	25	1,38E+06
II-2	Vergleich_3	V_{s_V3}	55	3,03E+06

Das Procedere der Messungen folgte einem festgelegten Schema, mit dem eine weitgehende Objektivierung und Reproduzierbarkeit der Messungen erreicht wird,

Für den Ausgangszustand jeder Messreihe wurde mit dem in Strömungsrichtung ausgerichteten Modell nach dem Nullabgleich und der Nullmessung eine Feinjustierung unter der gemäß Tabelle 2 gewählten Anströmgeschwindigkeit vorgenommen. Ziel dieser Justierung war das Einstellen eines Anströmwinkels mit minimaler Querkraft F_{yW} , um alle weiteren Messungen mit veränderten Anströmwinkeln auf diese Gleichgewichtslage beziehen zu können.

Im Anschluss an diese Einstellungen wurde das Versuchsprogramm gemäß Anlage 2 durchgeführt. Jede Messdauer nach gewähltem Messprogramm betrug dabei 25 Sekunden mit 50 Einzelmessungen je Sekunde. Die Daten dieser in Summe 1250 Messungen wurden durch das Programm catman® zu einem Mittelwert zusammengefasst, der in einer Datentabelle abgelegt und gespeichert wurde, die beispielhaft in Anlage 3 dargestellt ist.

Nach Abschluss jeder Messreihe wurde wieder eine Nullmessung durchgeführt, um gegebenenfalls eine Grundlage für Kompensationsberechnungen bei z.B. großen

Temperaturgradienten, die über die Umweltdaten einen Einfluss auf die angezeigte und gemessene Kanalgeschwindigkeit haben.

4. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in der Anlage 4 aufgeführt, die in elektronischer Form vorliegt.

Für diesen Versuchsbericht werden Zusammenfassungen der Ergebnis-Diagramme je Messreihe genutzt. Damit werden vergleichende Übersichten hergestellt, die eine Bewertung der Ergebnisse ermöglichen.

Als erste Überprüfung der durchgeführten Messungen wurden die gemessenen Kräfte, die durch das Modell auf die 6-Komponenten-Waage aufgebracht wurden, auf Plausibilität zur Bewertung der Messreihenqualität geprüft. Diese Ergebnisse sind in Anlage 4 aufgeführt und mit entsprechenden Diagrammen dargestellt.

4.1 Kräfte-Koeffizienten

Die Beiwertberechnungen aus den Messwerten ergaben Koeffizienten, die für die graphische Darstellung gemäß der im Abschnitt 2.1.2 „*Mathematische Modellierung*“ beschriebenen Berechnungsmethode ermittelt wurden.

Die für eine Koeffizientenbildung möglichen bzw. notwendigen Bezugsflächen sind in Anlage 1 aufgeführt. Hierhin sind auch Abstandsangaben zur Nutzung als Hebelarme bei der Momentenberechnung angegeben.

In den folgenden Abbildungen 11 und 12 sind die Graphen der Beiwertberechnung für die Windkraftkoeffizienten CF_{x_s} (siehe Anlage 6 a und 6 b) und CF_{y_s} (siehe Anlage 7 a und 7b) zusammengefasst.

Diese folgend aufgeführten Zusammenstellungen sind differenziert in den Auswertungstabellen mit den entsprechenden Diagrammen in der Anlage 5 dargestellt:

- Beide Schiffe mit gleichem Beladungszustand bei unterschiedlichen Tiefgängen
- Beide Schiffe mit unterschiedlichen Beladungszuständen bei gleichem Tiefgang
- Je Schiff mit unterschiedlichen Beladungszuständen und unterschiedlichen Tiefgängen

Weiterhin wurden für die Auswertung der Messungen mit dem Modelltiefgang 10 m Diagramme erstellt, deren Werte für eine direkte Vergleichbarkeit auf die laterale Fläche des 13 m - Tiefganges als Bezug für die Koeffizientenbildung normiert wurden. Dadurch wurden übersichtliche Vergleichsmöglichkeiten geschaffen. Die entsprechenden Diagramme in den Tabellen der Anlage 5 sind mit dem Indizes-Zusatz „norm“ betitelt.

In Abbildung 11 ist deutlich zu erkennen, dass der qualitative Verlauf der Belastung in Schiffslängsrichtung bei allen Konfigurationen ähnlich ist.

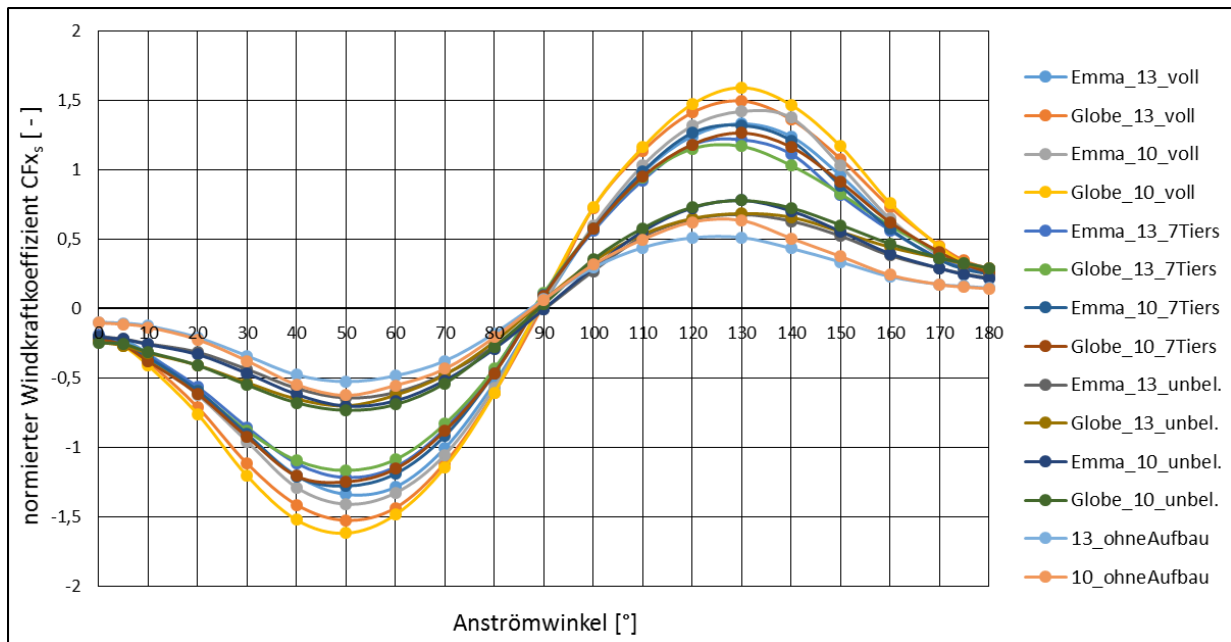


Abb. 11: Normierte Windkraftkoeffizienten für die Kraft in x-Richtung der Schiffsmodelle

Unterschiede gibt es aber in Bezug auf die Quantität dieser Belastung. Es sind die Abhängigkeiten von den Abmessungen der Beladung und des Freibords plausibel erkennbar, wobei der Beladungszustand zu unterschiedlicher Wichtung je Schiffstyp führt. So drücken die Windkraftkoeffizienten CF_{xs} und CF_{ys} für die „Globe voll beladen“ bei beiden Tiefgängen eine höhere Belastung aus als für die „Emma voll beladen“; in unbeladenem Zustand besteht diese Abhängigkeit maßgeblich aus dem Tiefgangsunterschied – der Schiffstyp spielt eine untergeordnete Rolle. Auch bei der Beladung „7Tiers“ ist diese Tiefgangsabhängigkeit bereits erkennbar.

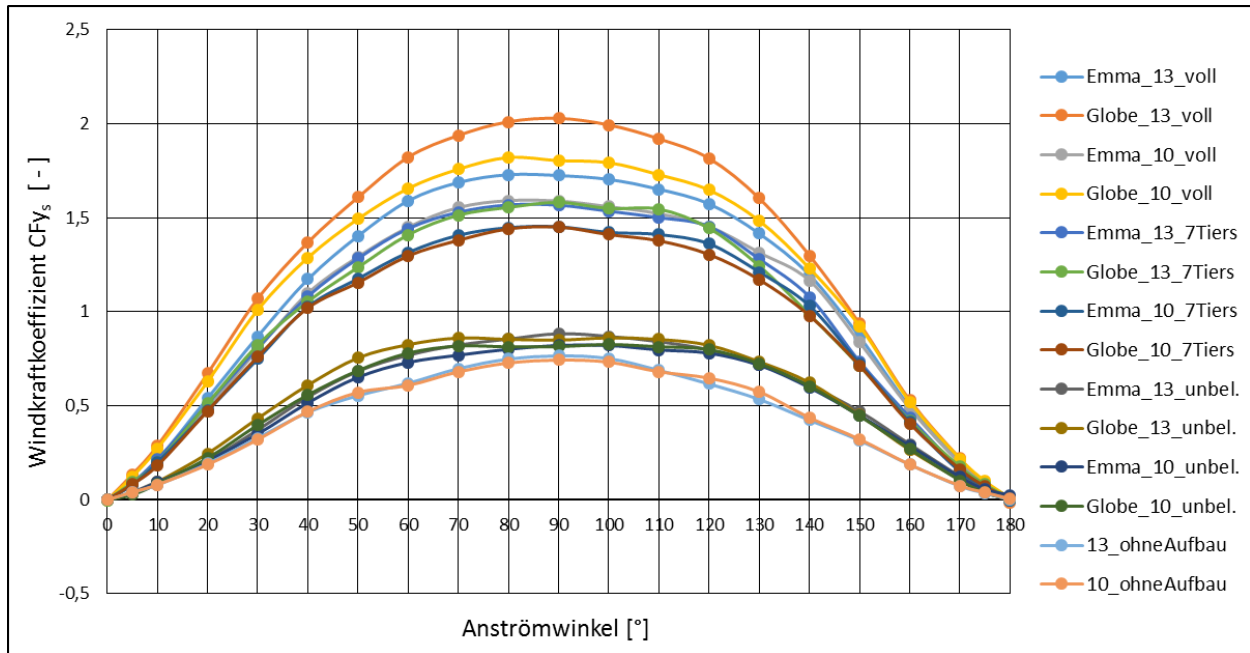


Abb. 12: Normierte Windkraftkoeffizienten für die Kraft in y-Richtung der Schiffsmodelle

Die Effekte, die durch die Formgebung des Schiffsrumpfes und durch die Ladungsanordnung hervorgerufen werden, sind beispielhaft mit der folgenden Abbildung 13 für den Tiefgang von 13 m dokumentiert. Für den Tiefgang von 10 m sind die Graphen qualitativ sehr ähnlich.

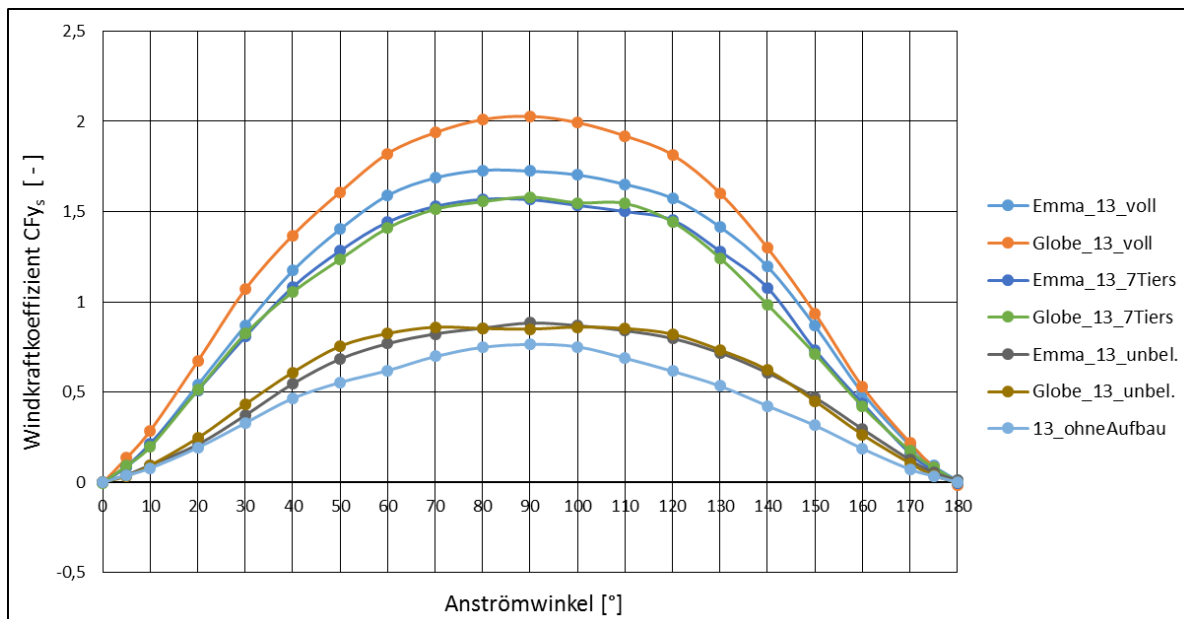


Abb. 13: Normierte Windkraftkoeffizienten für unterschiedliche Beladungszustände je Schiffstyp bei gleichem Tiefgang

Auch macht sich die Anordnung der Aufbauten offensichtlich als Querkraftbeeinflussung (Windkraftkoeffizient CF_{y_s}) bemerkbar, wie aus der Abbildung 14 zu interpretieren ist. Hier ist deutlich ein „Sattel“ im Scheitel der Globe-Graphen zu erkennen, der durch die getrennte Anordnung von Brückenaufbau und Abgasschacht erklärbar ist.

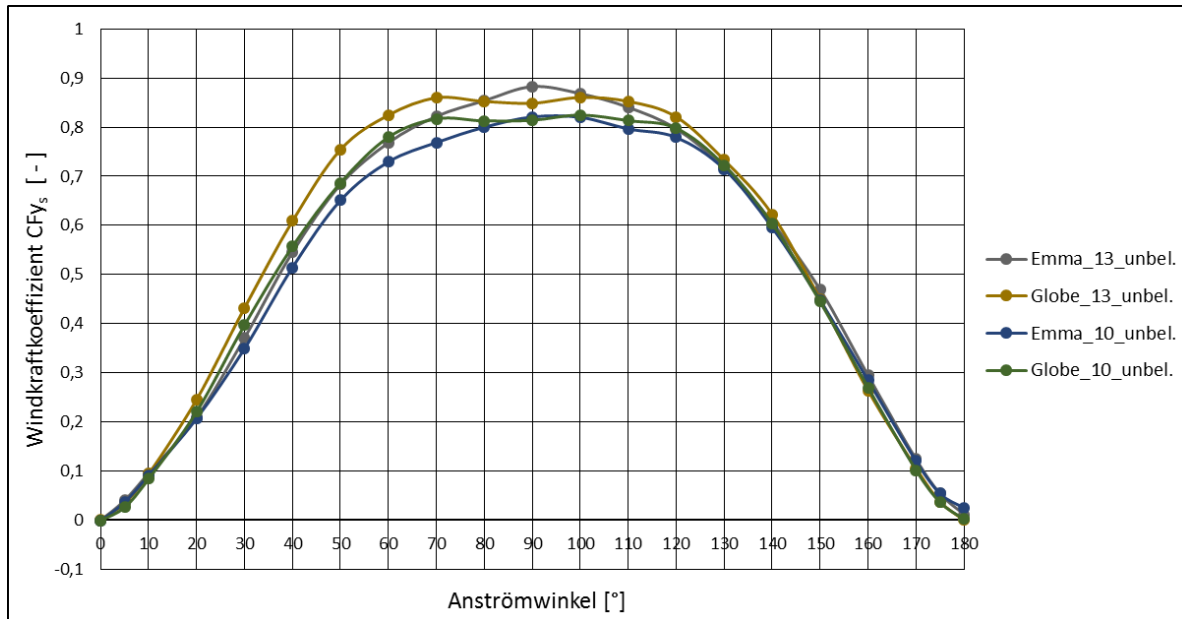


Abb. 14: Normierte Windkraftkoeffizienten für die unbeladenen, aber mit Aufbauten gemessenen Schiffstypen

Für die Längskraftkoeffizienten CF_{xS_AF} (siehe Anlage 8 a und 8 b) gemäß Abbildung 15 gelten die für den Windkraftkoeffizienten CF_{xS} getroffenen Aussagen ebenfalls, da hierbei nur eine andere Bezugsfläche gewählt ist.

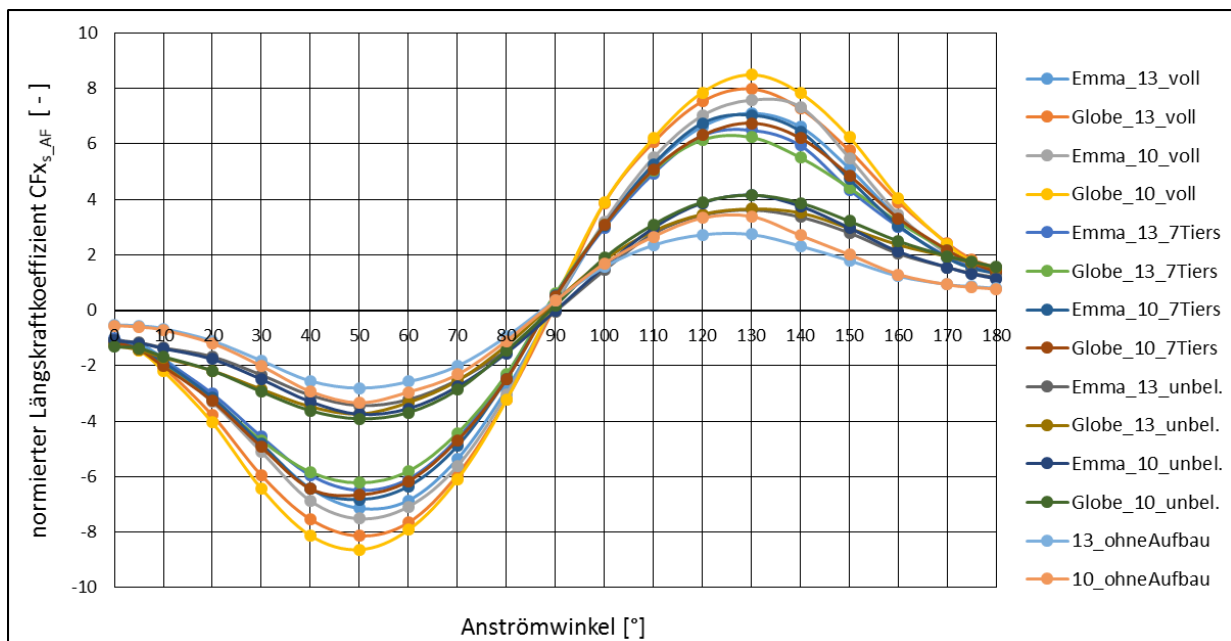


Abb. 15: Normierte Längskraftkoeffizienten auf Basis der frontal angeströmten Fläche

Der gleichermaßen für eine Vergleichbarkeit normierte Längskraftkoeffizient bezieht sich auf die frontal angeströmte Fläche A_F und wie alle normierten Koeffizienten auf den Tiefgang von 13 m (unabhängig von dem tatsächlich gemessenen Tiefgang).

Deutlich erkennbar ist, dass die in der Abbildung 15 zusammengefassten Graphen sich nur im quantitativen Betrag von den Graphen des Windkraftkoeffizienten CF_x s unterscheiden.

Eine weitere Auswertung in den Tabellen und Diagrammen der Anlage 4 erfolgte jeweils auf Basis der lateralen Bezugsflächen für die beiden unterschiedlichen Tiefgänge und ist ohne den Indizes-Zusatz „norm“ betitelt.

4.2 Moment-Koeffizienten

In den folgenden Abbildungen 16 und 17 sind die Graphen der Berechnung für den Giermoment-Koeffizienten CM_{z_s} (siehe Anlagen 9 a und 9 b) und den Rollmoment-Koeffizienten CM_{x_s} (siehe Anlagen 10 a und 10 b) zusammengefasst. Für diese beiden Koeffizienten zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Beladungszustand. Auch ist die Beeinflussung durch den Tiefgang stärker ausgeprägt als durch den Schiffstyp, der hier durch die Anordnung der Aufbauten charakterisiert ist.

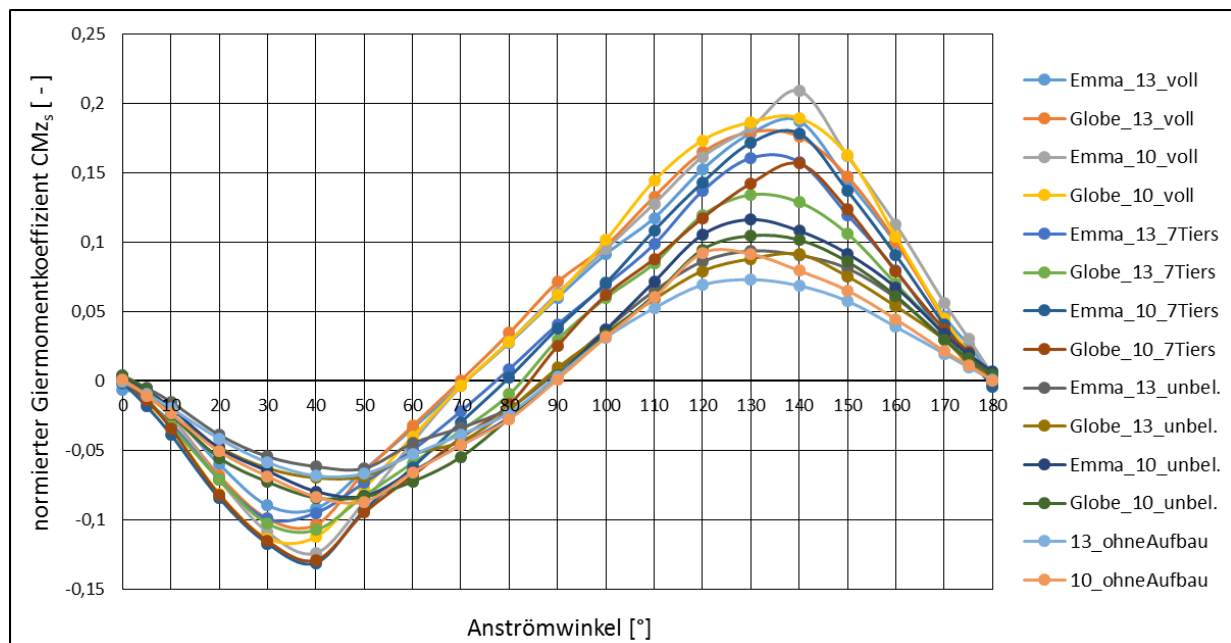


Abb. 16: Normierter Giermoment-Koeffizienten für die Schiffsmodelle

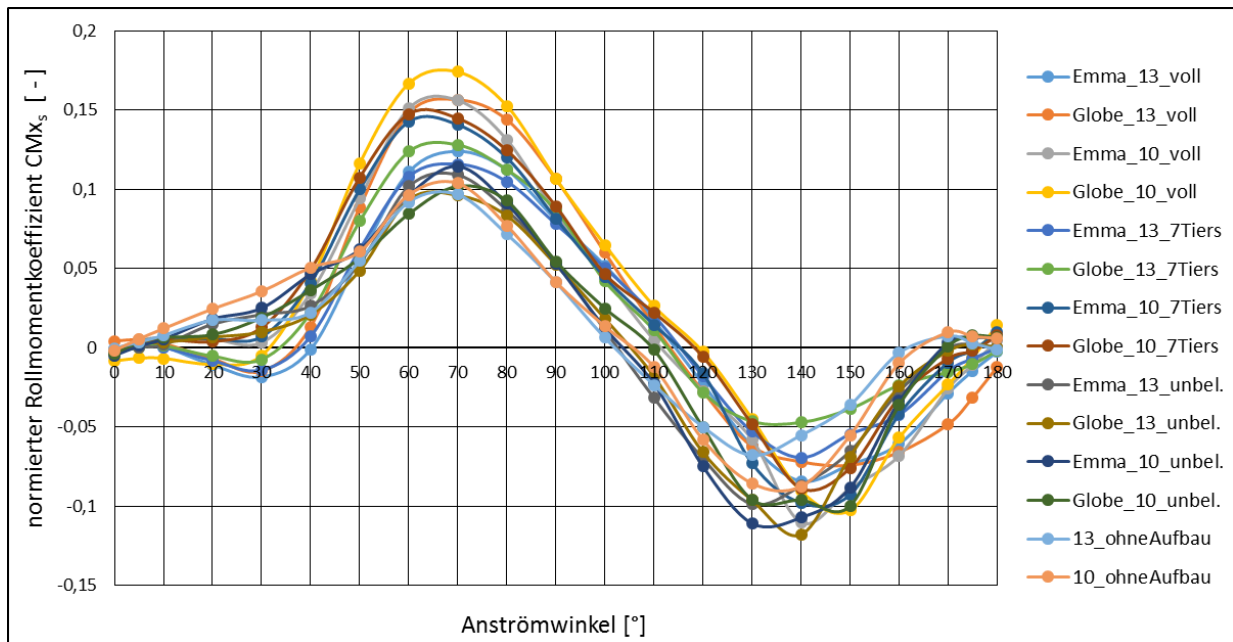


Abb. 17: Normierter Rollmoment-Koeffizienten für die Schiffsmodelle

4.3 Kraftkoeffizienten-Vergleich bei unterschiedlichen Reynoldszahlen

In der Anlage 11 sind die Ergebnisse des Einflussvergleichs unterschiedlicher Reynoldszahlen mit den Koeffizienten CF_{xS} und CF_{yS} gegenübergestellt. Diese Diagramme wurden der Anlage 5 entnommen und zusammengefasst.

Für eine Bewertung dieser Diagramme ist zu beachten, dass der Einfluss der Reynoldszahlen umso geringer ist, je enger die Schnittpunkte der Koeffizienten je Anströmwinkel und Reynoldszahl beieinander liegen. Diese Punkte liegen für fast alle Messungen mit den unterschiedlichen Modellkonfigurationen sehr gut beieinander, nur mit der kleinsten Reynoldszahl ist naturgemäß fast immer eine relativ größere Abweichung zu beobachten. Beispielhaft ist dieses in Abbildung 18 gezeigt. Hier ist auch die grundsätzliche Lage der der Schnittpunkte zum vergleichend gemessenen Anströmwinkel bezeichnet.

Einzig bei der Konfiguration „Globe_10_voll“ ist in der Anlage 11 eine teilweise außerordentliche Verteilung der Schnittpunkte für die höchste Reynoldszahl bei 55 m/s zu sehen. Dieses hat aber keine Ursache in dem Messfehler, der durch den Anströmwinkel von ca. 164° statt der üblichen 180° entstanden ist, so dass dieses einer weitergehenden Überprüfung bedarf. Und bei der Konfiguration „Globe_10_unbel.“ liegen fast alle Punkte so außergewöhnlich gut übereinander, dass hier ebenfalls von einer notwendigen intensiveren Überprüfung der Ergebnisse ausgegangen werden muss. Dieses wird noch durch die abnorme Lage der Punkte für die Reynoldszahlen der Prüfgeschwindigkeiten von 55 m/s, 25 m/s und 10 m/s unterstrichen.

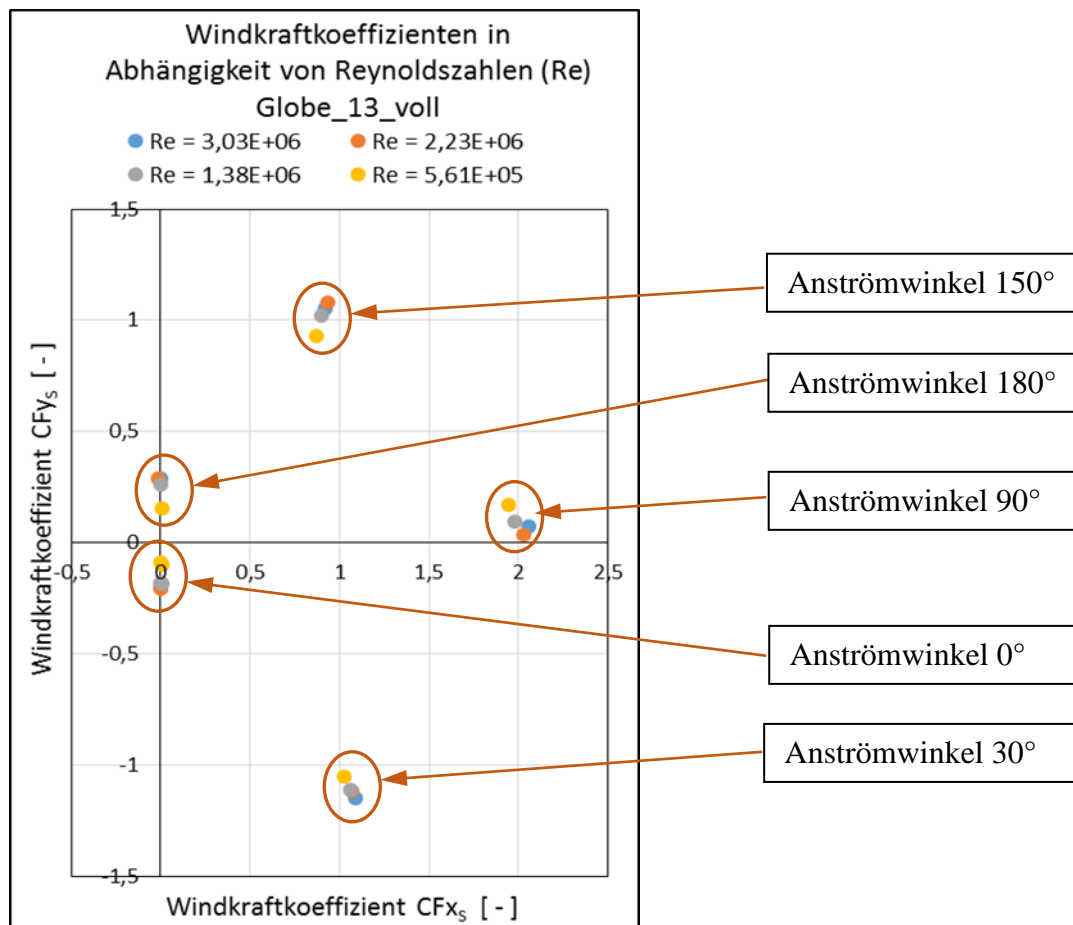


Abb. 18: Beispiel für die Abhängigkeit der Windkraftkoeffizienten je Anströmwinkel von der Reynoldszahl

5. Diskussion der Ergebnisse, Vergleich dieser mit jenen aus der Literatur

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ergeben ein plausibles Bild über die Windbelastungen auf ein Schiff ohne eigene Fahrt bei unterschiedlichen Anströmrichtungen. Auch kann aus den vergleichenden Messungen mit unterschiedlichen Reynoldszahlen geschlussfolgert werden, dass sich die Messmethode mit den benutzten Modellen sehr gut für die Untersuchungen geeignet haben.

Die Abweichungen zu den bisher gängigen Betrachtungen nach Blendermann [1] resultieren mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den zwischenzeitlich erfolgten Konstruktionsmerkmalen und Bauausführungen, insbesondere zur Schiffsgröße, der Beladungszustände und der Anordnung von Aufbauten. Diese These wird unterstützt durch die jüngeren Erkenntnisse nach Andersen [2], allerdings für deutlich kleinere Schiffe, als die, die in den vorliegenden Versuchen betrachtet wurden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabenstellung für die durchgeführten Untersuchungen wurde erfüllt und die Ergebnisse erweitern die Kenntnisse über die windlastabhängigen Bewegungen und damit verbundenen Kräfte der großen Containerschiffe mit 15.000 TEU und 19.000 TEU, wenn sie ohne eigene Fahrt sind.

Der Einfluss unterschiedlicher Geometrien von Schiffsrümpfen sollte vertiefend untersucht werden, da die Umströmung insbesondere durch die Bug- und Heckformen beeinflusst wird und dadurch mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die damit verbundenen Belastungen unterschiedliche Wirkungen haben. Dieses sollte auch bei weiter differenzierten Ladungszuständen betrachtet werden.

Auch können partielle Überprüfungen der vergleichenden Messungen mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten für die Bewertung der Messmethode mit unterschiedlichen Reynoldszahlen angebracht sein.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Blendermann, W.: Manoeuvring Technical Manuel,
Seehafen Verlag Hamburg, (1989) ISBN 3-87743-902-0
- [2] Andersen, I. M. V.: Wind loads on post-panamax container ship,
Ocean Engineering 58, (2013)

8. Anlagen (teilweise ausschließlich in elektronischer Form auf CD)

- Anlage 1: Bezugsdaten aus der Konstruktionsdatei für Flächen und Abstände
- Anlage 2: Versuchsprogramm, tabellarisch
- Anlage 3: Beispiel für die Datenablage der Messwerte
- Anlage 4: Auswertung der Waagen- Kräfte
- Anlage 5: Messungen & Auswertungen
- Anlage 6 a: Zusammenfassung der tiefgangsabhängigen Windkraft-Koeffizienten (Schiffswiderstand) für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 6 b: Zusammenfassung der normierten Windkraft-Koeffizienten (Schiffswiderstand) für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 7 a: Zusammenfassung der tiefgangsabhängigen Windkraft-Koeffizienten (Schiffsquerkraft) für die Konfigurationsvarianten

- Anlage 7 b: Zusammenfassung der normierten Windkraft-Koeffizienten (Schiffsquerkraft) für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 8 a: Zusammenfassung der tiefgangsabhängigen Längskraft-Koeffizienten (Schiffswiderstand) für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 8 b: Zusammenfassung der normierten Längskraft-Koeffizienten (Schiffswiderstand) für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 9 a: Zusammenfassung der tiefgangsabhängigen Giermoment-Koeffizienten für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 9 b: Zusammenfassung der normierten Giermoment-Koeffizienten für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 10 a: Zusammenfassung der tiefgangsabhängigen Rollmoment-Koeffizienten für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 10 b: Zusammenfassung der normierten Rollmoment-Koeffizienten für die Konfigurationsvarianten
- Anlage 11: Übersicht zu den Vergleichen der Windkraftkoeffizienten über die Reynoldszahlen
- Anlage 12: Bilder der untersuchten Ladungs- und Aufbaukonfigurationen
- Anlage 13: Flächen- und Schwerpunktermittlungen durch Fraunhofer AGP