

Reynoldszahl-Effekte an Schiffsanhängen

Reynolds Number Effects on Ship Appendages

Dipl.-Ing. Rainer Grabert, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH (SVA)
Dipl.-Ing. Friedrich Mewis, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA)

Summary

The conversion of model test results to the ship scale has substantial uncertainties at the correlation of the drag of appendages. Exemplifying a twin screw vessel model tests were carried out, sponsored by the German Ministry of Research and Technology. During the tests the drag of singular appendages was measured. For the tests models with different scales were used. Additional CFD analyses were made for the models and the full scaled ship. Based on these results a new correlation method for ships with appendages has been acquired.

1 Einleitung

Die genaue Prognose der erforderlichen Antriebsleistung eines Schiffes aus Modellversuchsergebnissen ist eine der wichtigsten Grundaufgaben von Schiffbauversuchsanstalten. Bei der Umrechnung von Modellversuchsergebnissen auf die Großausführung gibt es insbesondere bei Mehrschraubern erhebliche Unsicherheiten bei der Korrelation des Widerstandes von Anhängen. Aber auch bei Einschraubern werden die Widerstände von Anhängen und Schiffsöffnungen oft nur nach den Erfahrungen der Versuchsanstalten umgerechnet. Der z.Zt. übliche Weg bei Zweischaubern ist, über Modellversuche mit und ohne Anhängen den Widerstandsanteil der Anhänge im Modellversuch zu bestimmen und einen Anteil davon empirisch zu korrelieren.

Als Anhänge sind bei einem Einschraubenschiff im allgemeinen Schlingerkiele und Ruder vorhanden. Bei Zweischaubenschiffen gibt es zusätzlich Wellenleitungen, Wellenbocklager und Wellenbockarme zu berücksichtigen. Auch die Widerstandsanteile von Öffnungen von Querstrahlrudern und Stabilisierungsflossen sind einzubeziehen.



Abb. 1: Ausgeklappte Stabilisierungsflosse

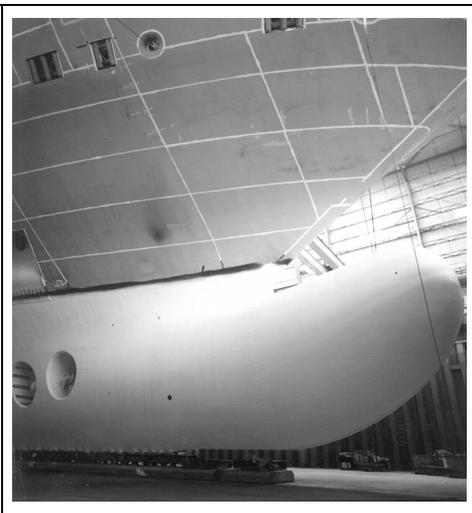


Abb. 2: Zwei Bugstrahlruder

Die experimentelle Erfassung des Widerstandes eines Anhanges ist nur dadurch möglich, dass das Modell mit und ohne diesen Anhang geschleppt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass auch der Interferenzanteil erfasst wird. Dieser Anteil entsteht dadurch, dass sich die Schiffsumströmung durch die Anwesenheit des Anhangs ändert. Mit diesen Messungen ermittelt man den Widerstand im Modellmaßstab.

Das eigentliche Problem ist die Extrapolation auf die Großausführung. Im Modellversuch wird das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz eingehalten. Die meist tiefgetauchten Anhänge haben aber keinen

schwerkraftabhängigen Widerstandsanteil. Für die Anhänge gilt also das Reynoldsche Ähnlichkeitsgesetz, welches aber nicht eingehalten wird. Sie sind im Modellversuch anderen Bedingungen ausgesetzt als am Schiff.

Aus den Erfahrungen heraus haben sich verschiedene Extrapolationsverfahren entwickelt. Eine verbreitete Methode ist, den Widerstand aller Anhänge am Modell gemeinsam zu messen und für die Umrechnung auf den Schiffswiderstand nur einen Teil (ca. 50% bis 80%) zu benutzen. Diese Methode ist einfach, liefert aber nicht immer ordentliche Ergebnisse.

Es wurde auch vorgeschlagen, die Extrapolation nur für das Modell ohne Anhänge vorzunehmen und den Widerstand der Anhänge entsprechend den Ergebnissen von Hoerner zu berechnen. Für den Interferenzanteil gibt Hoerner eine separate Formel an.

Eine genauere Methode ist, die Modellversuche mit allen Anhängen durchzuführen, den Anhangswiderstand für das Modell zu berechnen und abzuziehen. Nachdem der sich daraus ergebende Modellwiderstand auf die Großausführung umgerechnet wurde, kann der Anhangswiderstand für das Schiff berechnet und addiert werden.

Die Berechnung des Anhangswiderstandes ist aber stark fehlerbehaftet, weil die Zuströmung nicht vollständig bekannt ist. Die Anhänge können sich teils in und teils außerhalb der Grenzschicht befinden und werden über der Profillänge nicht mit konstantem Winkel angeströmt.

In einem vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Forschungsprojekt wurde gemeinsam in der HSVA und der SVA ein Verfahren entwickelt, das eine präzisere Korrelation der Anhängewiderstände gestattet und damit die Prognosegenauigkeit erheblich erhöht.

2 Lösungsweg

Zur Entwicklung und Validierung des Verfahrens wurden Berechnungen der viskosen Umströmung von Rumpf und Anhängen für 3 Modellmaßstäbe verwendet sowie Messungen mit einzelnen Anhangselementen an 2 Schiffsmodellen vorgenommen. Dabei wurden die in der HSVA und SVA üblichen Modellmaßstäbe verwendet.

Für die Versuche wurde ein Schiffmodell eines Zwei-Schrauben-Schiffes der Jos. L. Meyer Werft, Papenburg, verwendet, das von der Werft freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.

Die durchgeführten Berechnungen und Modellversuche dienten dazu, die notwendige Datenbasis für die Entwicklung des Übertragungsverfahrens zu beschaffen.

Um den gesamten interessierenden Reynoldszahlbereich abzudecken, wurden die folgenden Validierungsstufen gewählt:

| | | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| <u>Berechnungen:</u> | kleine Reynoldszahl, SVA-Modell | $\lambda = 36,25$ |
| | mittlere Reynoldszahl, HSVA-Modell | $\lambda = 23,20$ |
| | weiterer Modellmaßstab | $\lambda = 11,20$ |
| | große Reynoldszahl, Großausführung | $\lambda = 1$ |
| <u>Modellversuche:</u> | SVA-Modell | $\lambda = 36,25$ |
| | HSVA-Modell | $\lambda = 23,20$ |
| <u>Großausführungsmessungen:</u> | Probefahrtmeßergebnisse liegen vor | $\lambda = 1$ |

Es wurden zwei Serien von Widerstandsversuchen so durchgeführt, dass der Einfluss jedes einzelnen Anhangs bzw. jeder Öffnung ermittelt werden konnte. In der ersten Serie wurden die großen Außenhaut-Öffnungen, d.h. Querstrahlruder und Taschen der Stabilisierungsflossen, in der zweiten die Anhänge der Wellenanlage und die Ruder untersucht. Ergebnisse

2.1 Messungen

Es wurde in der HSVA ein Modell im Maßstab 1:23,2 und in der SVA ein Modell im Maßstab 1:36,25 hergestellt. Es wurden jeweils die gleichen Anhänge (2 V-Wellenböcke, 2 I-Wellenböcke, 2 ummantelte Wellen mit Wellenhosen und 2 Ruder) und Öffnungen (2 Bugstrahlruder, 1 Heckstrahlruder und 2 Taschen für Stabilisierungsflossen) angeordnet (siehe Abb. 3 und Abb. 4).

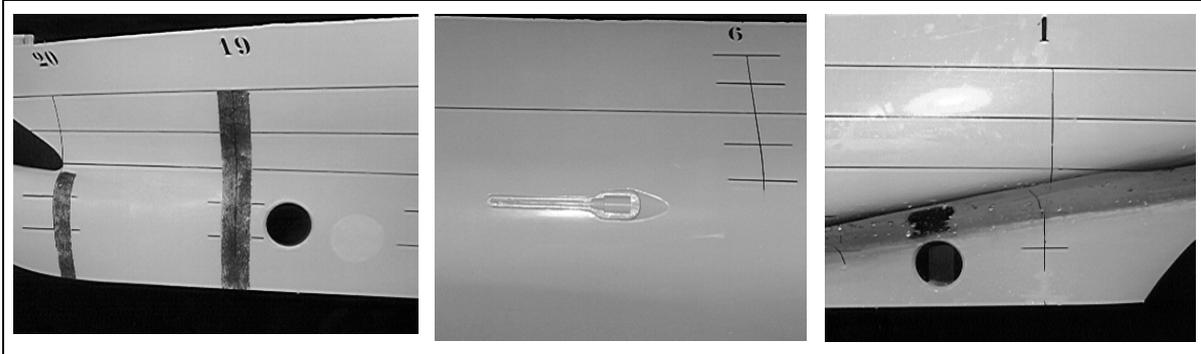


Abb. 3: Öffnungen am Modell, 1 Bugstrahlruder geschlossen

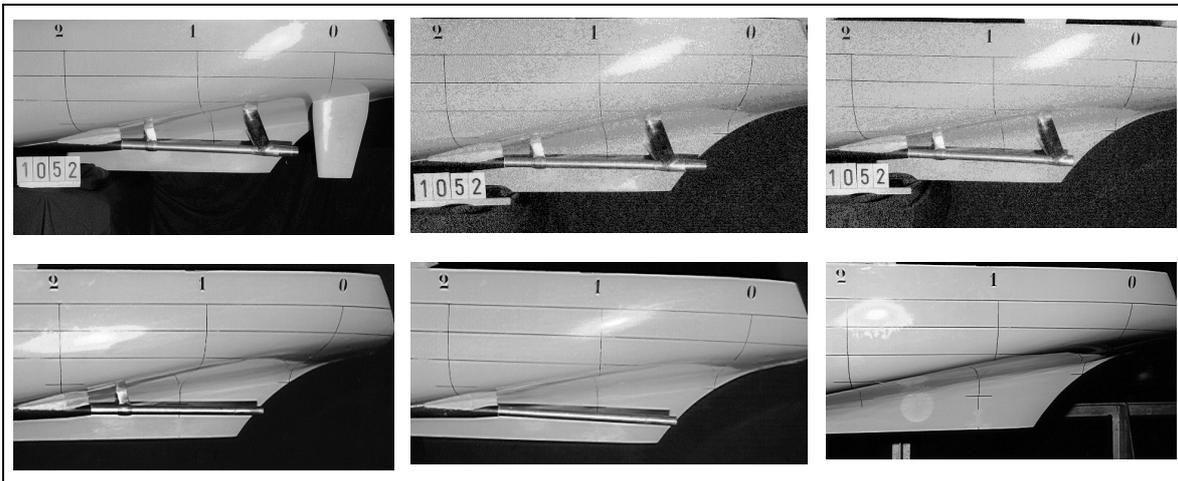


Abb. 4: Anhänge am Modell, schrittweise entfernt

Mit den Modellen wurden Widerstandsversuche im Geschwindigkeitsbereich von $V = 20$ kn bis $V = 26$ kn für den Konstruktionstiefgang durchgeführt. Die Messungen erfolgten so, dass die Öffnungen nacheinander geöffnet wurden, bzw. die Anhänge nacheinander entfernt wurden. Um den Einfluss jeder einzelnen Komponente zu ermitteln, wurde die Differenz zum vorgehenden Versuch ins Verhältnis gesetzt zum nackten Modell. In Tab. 1 sind die prozentualen Widerstandsanteile, bezogen auf das Modell ohne Anhänge und Öffnungen, für $V = 24$ kn zusammengefasst.

| | R_{APP} [%] | | | |
|--------------------------|---------------|----------|--------------|----------|
| | SVA | | HSVA | |
| Modellmaßstab | 36,25 | 1 | 23,20 | 1 |
| Öffnungen: | | | | |
| 1. Bugstrahlöffnung | 0,7 | 1,1 | 1,2 | 1,8 |
| 2. Bugstrahlöffnung | 1,6 | 2,8 | 1,2 | 1,8 |
| beide Bugstrahlöffnungen | 2,3 | 3,9 | 2,4 | 3,6 |
| Heckstrahlöffnung | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,3 |

| | | | | |
|--|------|------|------|------|
| Stabitaschen | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,7 |
| Anhänge: | | | | |
| Schlengerkiele | 1,7 | 2,9 | | |
| 2 Ruder (Modell ohne weitere Anhänge) | | | 2,2 | 3,2 |
| 2 Ruder (Modell mit allen weiteren Anhängen) | 1,4 | 2,3 | 1,6 | 2,4 |
| V-Wellenböcke | 3,1 | 5,3 | 3,0 | 4,6 |
| I-Wellenböcke | -1,3 | -2,2 | -0,1 | -0,2 |
| Wellenleitungen und Wellenhosen | 2,8 | 4,3 | 2,5 | 4,0 |

Tab. 1: Gemessene Widerstände der Anhänge und Öffnungen

Die Werte für den Maßstab 1 entstanden durch die Umrechnung der Messergebnisse nach der Froudeschen Methode, ohne irgendeine Korrektur für Reynoldszahleffekte.

2.2 Rechnungen

Um den Einfluss der Reynoldszahl auf den Widerstand der Anhänge und Öffnungen zu untersuchen, wurde die viskose Umströmung des Schiffes berechnet. Die Rechnungen wurden für die unter Abschnitt 2 aufgeführten Maßstäbe und einer Schiffsgeschwindigkeit von 24 kn durchgeführt. Dabei wurden die kommerziellen Programme STAR-CD (HSVA) und TASCflow (SVA) benutzt, welche die zeitlich gemittelten Navier-Stokes Gleichungen numerisch lösen. Die Rechnungen wurden für das Schiff ohne jegliche Anhänge und Öffnungen und das Schiff mit allen Anhängen und Öffnungen durchgeführt. Die Anhänge und Öffnungen waren die selben wie im Modellversuch.

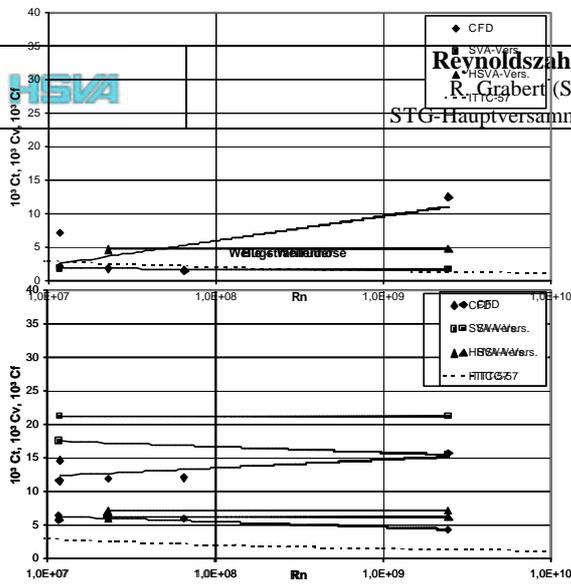
| | R_{APP} [%] | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Maßstab | 1 | 11,60 | 23,20 | 36,25 |
| R_N · 10⁶ | 2449,2 | 64,9 | 22,9 | 11,7 |
| Öffnungen: | | | | |
| beide Bugstrahlöffnungen | 2,6 | 1,6 | 1,4 | 1,2 |
| Heckstrahlöffnung | 1,8 | 0,9 | 0,7 | 0,6 |
| Stabitaschen | 0,7 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Anhänge: | | | | |
| 2 Ruder | 4,3 | 2,4 | 2,2 | 2,1 |
| V-Wellenböcke | 4,0 | 2,9 | 2,6 | 2,3 |
| I-Wellenböcke | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Wellenleitungen und Wellenhosen | 3,0 | 2,3 | 2,2 | 2,0 |

Tab. 2: Berechnete Widerstände der Anhänge und Öffnungen

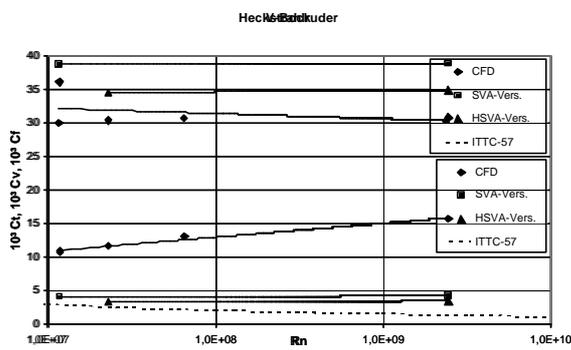
Die Ergebnisse der CFD-Rechnungen zeigen, dass bei einer Extrapolation der Widerstände vom Modell auf das Schiff sowohl von Öffnungen als auch von Anhängen eine Vergrößerung des Widerstandes notwendig ist. Das steht im Gegensatz zu der im Allgemeinen praktizierten 60/40-Methode.

2.3 Analyse der Ergebnisse und Verbesserung der Korrelationsmethode

In den folgenden Diagrammen werden die Modellversuchsergebnisse von beiden Versuchsanstalten mit den CFD-Ergebnissen verglichen. Dabei sind die Widerstandsbeiwerte jedes einzelnen Anhangs über der Reynoldszahl des Schiffes aufgetragen. Eine Reynoldszahl für jeden Anhang zu bestimmen wäre zwar mit Hilfe der CFD-Ergebnisse möglich, aber nicht mehr in der praktischen Anwendung, wenn nur Modellversuchsergebnisse genutzt werden sollen. Anströmwinkel und



Anströmgeschwindigkeit sind aus Modellversuchsergebnissen nur mit sehr großem Aufwand



bestimmbar.

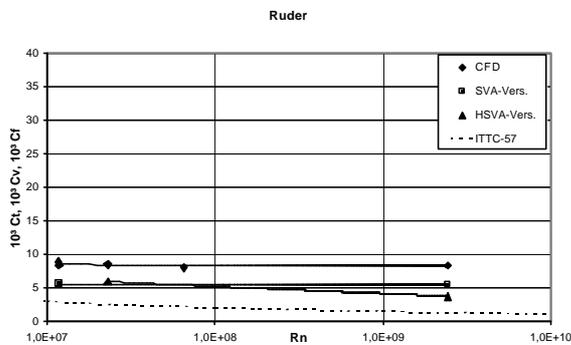


Abb. 5: Vergleich der Ergebnisse

Der in die Diagramme eingetragene Punkt für die große Reynoldszahl (Schiff) ergibt sich aus der Extrapolation für das Schiff, wenn 100% des Anhangswiderstandes verwendet werden. Mit den Punkten der CFD-Ergebnisse sowohl von der HSVA als auch von der SVA wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt.

In der SVA wurden die CFD-Rechnungen für das SVA-Modell und für das Schiff durchgeführt. In der HSVA wurden die Rechnungen für das HSVA-Modell, ein größeres Modell und ebenfalls für das SVA-Modell durchgeführt. Besonders bei Heckstrahlruder, Welle und Ruder passen die Rechnungen sehr

gut zusammen. Dagegen streuen die Werte der Stabtasche. Aus dem Vergleich zwischen Messung und Rechnung kann kein eindeutiger Zusammenhang abgeleitet werden. Der Grund dafür liegt hauptsächlich darin, dass die Anteilwiderstände nicht direkt gemessen werden können, sondern sich aus der Differenz zweier großer Widerstände ergeben. Darum werden zur Ableitung einer neuen Korrelationsmethode nur die Ergebnisse der CFD-Rechnungen verwendet.

Zur Beurteilung des Reynoldszahleinflusses wurden die Widerstandsbeiwerte der Anhänge mit denen der ITTC-Reibungslinie ins Verhältnis gesetzt und daraus Anhangsfaktoren $(1+k_2)$ gebildet (ähnlich denen von Holtrop und Mennen). Der Faktor $(1+k_2)$ ergibt sich aus der Definition des Anhängewiderstandes

$$\eta_{\text{Anh}} = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{\text{Anh}} (1+k_2) \cdot C_F$$

Diese Faktoren wurden sowohl für das Modell als auch für das Schiff gebildet. Das Verhältnis der $(1+k_2)$ -Werte von Schiff und Modell ergibt einen Korrelationsfaktor f_c des jeweiligen Anhanges. Folgende Werte wurden ermittelt:

| Maßstab | 36,25 | | 23,20 | |
|------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| | $(1+k_2)_M$ | f_c | $(1+k_2)_M$ | f_c |
| Öffnungen | | | | |
| Bugstrahlruder | 4,5 | 1,3 | 4,8 | 1,2 |
| Heckstrahlruder | 4,2 | 1,5 | 4,6 | 1,4 |
| Stabtaschen | 2,5 | 1,8 | 2,8 | 1,6 |
| Anhänge | | | | |
| I-Wellenbock | 2,8 | 1,4 | 3,0 | 1,3 |
| V-Wellenbock | 11,0 | 1,0 | 11,0 | 1,0 |
| Welle | 2,2 | 0,7 | 2,2 | 0,7 |
| Ruder | 2,9 | 1,0 | 2,8 | 1,0 |

Tab. 3: Anhänge- und Korrelationsfaktoren

Weil der Unterschied der Reynoldszahlen der beiden Modelle relativ klein ist, verglichen mit der Reynoldszahl des Schiffes, kommt man bei beiden Maßstäben zu vergleichbaren Ergebnissen, bzw. beide Modelle sind groß genug, um für diese Aufgabe stabile Rechenergebnisse zu erhalten.

An den Korrelationsfaktoren erkennt man, dass es wegen der großen Unterschiede bei den Korrelationsfaktoren ratsam ist, Öffnungen und Anhänge getrennt zu betrachten. Auch aus versuchstechnischer Sicht ist diese Vorgehensweise vorteilhaft, weil im Gegensatz zu den Anhängen, die Öffnungen nur selten nachgebildet werden.

Die Korrelationsfaktoren zeigen an, dass bei den Öffnungen der Widerstand generell erhöht werden muss. Bei den Anhängen kann er je nach Konfiguration auch verringert werden. Es ist aber zu erkennen, dass deutlich mehr als 60% des gemessenen Widerstandes für die Korrelation der Anhänge zu verwenden sind.

Der Vorschlag zur Überprüfung der Korrelationsmethode besteht darin, aus den ermittelten Anhangsfaktoren der einzelnen Öffnungen und Anhänge des Modells einen Anhangsfaktor für das Schiff zu bilden, indem die einzelnen Anhangsfaktoren mit den Korrelationsfaktoren multipliziert werden. Getrennt für Öffnungen und Anhänge werden zusammengefasste Anhangsfaktoren gebildet. Dazu werden die einzelnen Anhangsfaktoren mit der Oberfläche nach der folgenden Formel gewichtet:

$$(1+k_2)_g = \frac{\sum (1+k_2) * S_{APP}}{\sum S_{APP}}$$

Das Verhältnis der zusammengefassten Anhangsfaktoren von Schiff und Modell ergibt jeweils einen Gesamt-Korrelationsfaktor, mit dem der gemessene Widerstand der Öffnungen bzw. Anhänge multipliziert werden muss.

Entsprechend dem vorgeschlagenen Verfahren ist es notwendig, in einem Versuch den Widerstand aller Anhänge und in einem weiteren Versuch den der Öffnungen zu messen. Im folgenden Kapitel wird das Verfahren angewendet.

3 Anwendung des Verfahrens

Für die Anwendung des neuen Verfahrens werden drei Versuche herangezogen:

- Modell ohne Anhänge und ohne Öffnungen
- Modell mit allen Öffnungen und ohne Anhänge
- Modell mit allen Anhängen und ohne Öffnungen.

Die Berechnung des Korrelationsfaktors wird in der oben beschriebenen Weise am Beispiel des kleinere Modells durchgeführt und ist in den beiden folgenden Tabellen ersichtlich.

| $\lambda = 36,25$ | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|----------------------------------|
| Rn $1,17 \cdot 10^7$ | Fläche [m ²] | (1+k ₂) [-] | S*(1+k ₂) [m ²] | (1+k ₂) _g |
| Öffnungen | | | | |
| 1.+2. BSR | 0,026 | 4,5 | 0,118 | |
| HSR | 0,014 | 4,2 | 0,058 | |
| Stabtasche | 0,020 | 2,5 | 0,051 | |
| S Öffnungen | 0,060 | | 0,226 | 3,8 |
| Anhänge | | | | |
| I-Bock | 0,002 | 2,8 | 0,006 | |
| V-Bock | 0,020 | 11,0 | 0,215 | |
| Welle | 0,079 | 2,2 | 0,173 | |
| Ruder | 0,055 | 1,0 | 0,055 | |
| S Anhänge | 0,155 | | 0,449 | 2,9 |

Tab. 4: Ermittlung des Anhangsfaktors

| $\lambda = 1$ | | | | | | |
|--------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|--|----------------------------------|------------------------|
| Rn $2,44E+09$ | S [m ²] | f _c [-] | (1+k ₂) [-] | S*(1+k ₂) [m ²] | (1+k ₂) _g | f _{cg} [-] |
| Öffnungen | | | | | | |
| 1.+2. BSR | 34,7 | 1,3 | 5,6 | 193 | | |
| HSR | 18,1 | 1,5 | 5,8 | 105 | | |
| Stabtasche | 26,8 | 1,8 | 3,7 | 99 | | |
| S Öffnungen | 79,6 | 1,5 | | 397 | 5,0 | 1,33 |
| Anhänge | | | | | | |
| I-Bock | 2,7 | 1,4 | 3,5 | 10 | | |
| V-Bock | 25,7 | 1,0 | 11,0 | 282 | | |

| | | | | | | |
|------------------|--------------|------------|-----|------------|------------|-------------|
| Welle | 103,5 | 0,7 | 1,8 | 190 | | |
| Ruder | 71,8 | 1,0 | 1,0 | 72 | | |
| S Anhänge | 203,6 | 1,0 | | 554 | 2,7 | 0,94 |

Tab. 5: Ermittlung des Korrelationsfaktors

Aus dem Quotienten von $(1+k_2)_g$ für Schiff und Modell erhält man den gesamten Korrelationsfaktor. Es wurden Korrelationsfaktoren von 1,33 für die Öffnungen und 0,94 für die Anhänge ermittelt. Für das größere Modell betragen die Korrelationsfaktoren 1,22 für die Öffnungen und 0,95 für die Anhänge. Das heißt, dass der Widerstand der Öffnungen im Modellversuch wesentlich zu klein gemessen wird und der der Anhänge nur wenig korrigiert werden muss.

Die im Modellversuch ermittelten Widerstände der Anhänge und Öffnungen wurden jeweils mit dem entsprechenden Korrelationsfaktor korrigiert und zum Widerstand des nackten Modells addiert. Damit konnte das Probefahrtsergebnis genau nachgerechnet werden. Die Gegenüberstellung beider Ergebnisse mit dem Ergebnis der Meilenfahrt sieht wie folgt aus:

| | HSVA | | SVA | |
|------------------------|--------|------------|--------|------------|
| | V [kn] | Diff. [kn] | V [kn] | Diff. [kn] |
| Meilenfahrtmessung | 24,00 | | 24,00 | |
| Standardprognose 60/40 | 24,16 | 0,16 | 24,32 | 0,32 |
| neue Prognose | 24,00 | 0 | 24,01 | 0,01 |

Tab. 6: Prognoseergebnisse

Dieses Ergebnis bedeutet, dass zumindest für das gewählte Beispielschiff die Korrelationsmethode 60/40 nicht richtig ist.

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Modellversuchsergebnissen und CFD-Rechnungen, bei denen die Widerstände von einzelnen Anhängen und Öffnungen an einem Schiff ermittelt wurden, wurde ein Korrelationsverfahren zur Umrechnung des Anhangswiderstandes vom Modell auf die Großausführung entwickelt. Das Verfahren beruht darauf, dass für jede einzelne Anhangskomponente bzw. Öffnung ein Anhangsfaktor und ein Korrelationsfaktor existiert. Diese Faktoren werden entsprechend den vorhandenen Anhängen und unter Berücksichtigung ihrer Größe zusammengefasst. Es kann dann, getrennt für Öffnungen und Anhänge, ermittelt werden, welcher Prozentsatz des gemessenen Anhangswiderstandes für die Umrechnung auf die Großausführung verwendet wird.

Die Größe der Anhangs- und Korrelationsfaktoren für die einzelnen Öffnungen und Anhangskomponenten wurde mit Hilfe von Modellversuchen und CFD-Rechnungen am Beispiel eines 2-S Passagierschiffes ermittelt. Die Modellversuche wurden bei zwei verschiedenen Maßstäben, die CFD-Rechnungen für drei Maßstäbe und die Großausführung durchgeführt.

Am Beispiel des hier verwendeten 2-S Passagierschiffes konnte festgestellt werden, dass die 60/40-Methode für die Korrelation der Anhänge bei diesem Schiff nicht zutrifft. Der gemessene Anhangswiderstand kann zu fast 100% mit der ITTC Korrelationslinie umgerechnet werden. Des weiteren wurde festgestellt, dass die Widerstände der Öffnungen für die Großausführung erhöht werden müssen. Im vorliegenden Fall wurde der gemessene Widerstand für Öffnungen um 22% bzw. 33% erhöht.

Es muss weiterhin erwähnt werden, dass streng genommen die oben gemachte Aussage für den untersuchten Schiffstyp, Schiffsgröße und Modellmaßstab gelten. Bei anderen Schiffstypen, -größen und auch Geschwindigkeiten können mit der gleichen Methode durchaus andere Ergebnisse erzielt werden.

Schrifttum

- Abdel-Maksoud, M. Vergleichende numerische und experimentelle Untersuchungen der turbulenten Strömung am schiffsähnlichen Körper mit und ohne Propeller, VDI-Forschungsbericht 7/207, 1992
- Abdel-Maksoud, M., Brandt, H., Nowacki, H. Numerical computation of resistance, thrust deduction and wake fraction using a viscous-flow approach, Ship Technology Research, Vol. 41, 1994
- Abdel-Maksoud, M., Bschoerer, S., Scheuerer, G. Numerische Berechnung der viskosen Strömung um einen rotierenden Propeller, STG-Jahrbuch, 89. Band, 1995
- Abdel-Maksoud, M., Menter, M., Scheuerer, G. Numerische und experimentelle Untersuchungen der viskosen Strömung um einen Skew-Propeller, STG-Jahrbuch, 90. Band, 1996
- Brandt, H., Abdel-Maksoud, M. Numerische und experimentelle Untersuchungen der Grenzschichtströmung, Nachstrom und Widerstand schiffsähnlichen Körper mit und ohne Propeller, Inst. für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin, Bericht 91/5, 1991
- Brandt, H., Abdel-Maksoud, M., Hochkirch, K. Numerische und experimentelle Untersuchungen von Grenzschichtströmung, Nachstrom und Widerstand schiffsähnlicher Körper mit und ohne Propeller - Dreidimensionale numerische und experimentelle Untersuchungen, Inst. für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin, Bericht 94/6, 1994
- Brandt, H., Abdel-Maksoud, M., Hochkirch, K. Berechnung der turbulenten Strömung einer vereinfachten Propellergeometrie, Inst. für Schiffs- und Meerestechnik, TU Berlin, Bericht 95/4, 1995
- Bull, P. The validation of CFD predictions of nominal wake for suboff fully appended geometry, 21th Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Schweden, 1996
- Comstock, J. P. Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1967
- Ding, L., Zhou, L.-D. Numerical Simulation of the effect of the fillet Forms on appendage body juncture flow, Proc. 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, Iowa, USA, 1993
- Hoerner, S. F. Fluid – Dynamic Drag, published by the author 1958, USA
- Holtrop, J., Mennen, G.G.J. An approximate power prediction method, International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No. 335, 1982
- ITTC Report of the Resistance and Flow Committee, 17th International Towing Tank Conference, Göteborg, Sweden, 1984
- ITTC Report of the Resistance and Flow Committee, 18th International Towing Tank Conference, Kobe, Japan, 1987
- ITTC Report of the Resistance and Flow Committee, 19th International Towing Tank Conference, Madrid, Spain, 1990
- ITTC Report of the Resistance and Flow Committee, 20th International Towing Tank Conference, San Francisco, 1993
- ITTC Report of the Resistance and Flow Committee, 21th International Towing Tank Conference, Berg, Norwegen, 1996

| | |
|--------------------|--|
| Li, D., Zhou, L.-D | The effect of juncture form on appendage-body juncture flow, Osaka Colloquium 91, Japan, 1991 |
| Saunders, H. E. | Hydrodynamics in Ship Design, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 1957 |
| Schmidt, D. | Einfluss der Reynoldszahl und der Rauigkeit auf die Propellercharakteristik, berechnet nach der Methode des äquivalenten Profils, 80. Mitteilung der SVA, Schiffbauforschung 11 (1972) |
| Schneekluth, H. | Hydromechanik zum Schiffsentwurf, Koehler, 1988 |
| Wurst, G | Untersuchungen des Maßstabeffektes an Schiffsanhängen |