

Der Umlauftank des Instituts für Schiffbau der Fachhochschule Kiel

Copyright © Dr.-Ing. Ulrich Remmlinger, 2011, ulrich@remmlinger.com

Zusammenfassung. Der Bericht beschreibt den Umlauftank und die Messeinrichtungen und gibt Anhaltswerte für die Genauigkeit der Messergebnisse. Im gegenwärtigen Zustand ist der Umlauftank für die quantitative Bestimmung des Schiffswiderstandes nicht einsetzbar. Maßnahmen zur Verbesserung der Strömungsqualität werden vorgeschlagen.

FORMELZEICHEN

c	Phasengeschwindigkeit der Welle	p_{stat}	statischer Druck
d	Innendurchmesser	q	dynamischer Druck
f	Frequenz	u	Geschwindigkeit der Anströmung in x
$F_x F_y F_z$	Kräfte in Richtung der Koordinatenachsen	x	Längsachse des Kanals, raumfest
g	Erdbeschleunigung	y	Querachse des Kanals, raumfest
h	Wassertiefe im Kanal	z	Hochachse des Kanals, raumfest
L	Schlauchlänge	δ	Abdriftwinkel
$M_x M_y M_z$	Momente um die Koordinatenachsen	λ	Wellenlänge

1. EINLEITUNG

Ein Wasser-Umlauftank wird als Alternative zum Schlepptank bei der Widerstandsbestimmung von Schiffsmo-
dellen eingesetzt. Er bietet gegenüber dem Schlepptank den Vorteil der unbegrenzten Messzeit und erlaubt das
Sichtbarmachen und ungestörte Beobachten der Strömung. Besonders bei der Widerstandsbestimmung einer
Segelyacht, bei der sehr viele Parameterkombinationen für Geschwindigkeit, Abdrift, Krängung und Ruderwin-
kel gemessen werden müssen, ist die Zeitersparnis bei den Messungen beträchtlich. Nachteilig ist die einge-
schränkte Genauigkeit der Messergebnisse. Aus den Messwerten im Umlauftank kann nicht mit der notwendigen
Genauigkeit auf den Absolutwert des Widerstandes der Großausführung geschlossen werden. Tamashima et al.
[1] messen im Umlauftank für eine schlanke Schiffsform Wellenwiderstände, die um 13% von den Werten des
gleichen Modells in einem konventionellen Schlepptank abweichen. Wenn somit eine Vorhersage des Absolut-
werts des Widerstands nicht möglich ist, so liefert doch auch der relative Vergleich verschiedener Rumpfformen
gegeneinander wertvolle Hinweise zur Optimierung der Form.

In den letzten Jahren hat die Computersimulation in der Strömungsmechanik (CFD) gewaltige Fortschritte ge-
macht und liefert Ergebnisse, die in Bezug auf die Genauigkeit mit den Messungen im Schlepptank konkurrieren
können. Trotzdem ist das Interesse an Wasser-Umlauftanks nicht erloschen [2], besonders in Japan werden sie in
großer Zahl betrieben [3]. Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage, ob der Umlauftank an der FH Kiel re-
produzierbare Ergebnisse liefert, die für vergleichende Untersuchungen genutzt werden können und welche Ab-
weichungen sich gegenüber den Ergebnissen im Schlepptank ergeben. Zur Verfügung stand ein Modell der
Dehler 33 und Messergebnisse für dieses Modell ermittelt im Schlepptank der SVA Potsdam.

2. AUFBAU DES UMLAUFTANKS

Bei dem Umlauftank an der FH Kiel handelt es sich um den Typ F10 der Fa. Kempf & Remmers, Hamburg. Er
wurde im Jahre 1964 gebaut, 1979 wurde eine Einrichtung zur Beschleunigung der Grenzschicht am Düsenaus-
tritt hinzugefügt. Im Jahre 2002 erfolgte der Umzug an den heutigen Standort. 1997 übernahm die englische Fa.
Cussons Technology Ltd. das Geschäft von Kempf & Remmers, Verkauf und Betreuung der Kunden erfolgt
heute aus England. Der Umlauftank vom Typ F10 wird weiterhin angeboten. Der Aufbau des Tanks und die we-
sentlichen Abmessungen sind aus Bild 1 ersichtlich. Die Messstrecke hat eine Breite von 149 cm und eine Was-
sertiefe von 68 cm. Der Antrieb erfolgt über einen 7,8 kW Motor, der über eine Keilriemenuntersetzung auf ei-
nen dreiflügeligen Propeller wirkt. Nach Messungen besteht folgender Zusammenhang zwischen der Strömungs-
geschwindigkeit in der Mitte der Messstrecke und der Flügelfrequenz, die der dreifachen Propellerdrehzahl ent-
spricht:

$$f = 7,77 \frac{\text{Hz}}{\text{m/s}} \cdot u \quad (1)$$

Die Düse hat ein Kontraktionsverhältnis von 3:1, die Beruhigungskammer vor der Düse wird entlüftet und ent-
hält einen Gleichrichter mit einer Wabengröße von 50x50 mm. Die Siebe in der Beruhigungskammer, die für
eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung sorgen sollen, sind teilweise entfernt worden. Der Boden im of-

fenen Teil des Kanals kann in der Neigung verstellt werden, dadurch ist die Neigung des Wasserspiegels beeinflussbar. Dem gleichen Zweck dient eine verstellbare Stauklappe am Ende des offenen Kanals. Das Wasser kann bis auf 42°C erwärmt werden.

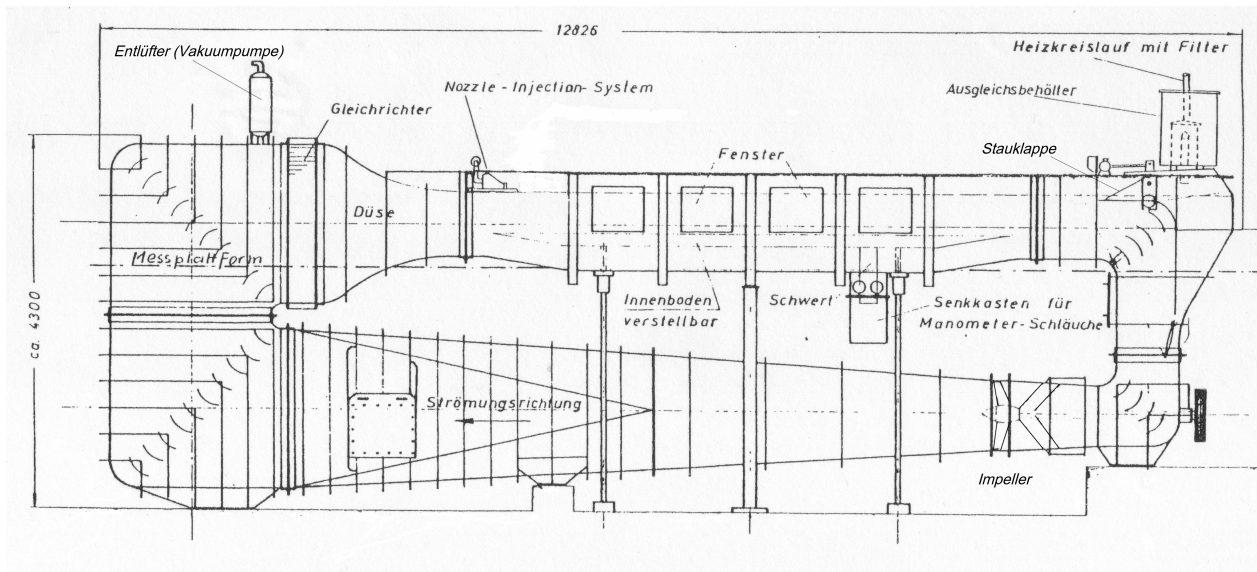


Bild 1. Seitenansicht des Umlauftanks

3. STRÖMUNGSQUALITÄT IN DER MESSSTRECKE

Vorbedingung für quantitative Messungen des Schiffswiderstandes sind eine gleichmäßige Strömung im offenen Kanal mit einer zeitlich und örtlich konstanten Geschwindigkeit, sowie eine ebene und glatte Wasseroberfläche. Die Turbulenz im Kanal sollte möglichst gering sein.

3.1 Räumliche Geschwindigkeitsverteilung

Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung vor dem Modell wurde mit einem Prandtlrohr gemessen, dessen Durchmesser 7 mm beträgt. Um in der Nähe der Wasseroberfläche eine geringere Störung (Wellenbildung) und eine höhere Auflösung zu erreichen, wurden zusätzlich zwei abgeflachte Pitotrohre mit 50 mm vertikalem Abstand eingesetzt. Damit konnte die Geschwindigkeit bis zu einem Abstand von 1mm unter dem Wasserspiegel gemessen werden. Die Pitotrohre sind in Bild 2 abgebildet. Für kleine Druckdifferenzen kann die Geschwindigkeitsdifferenz in guter Näherung aus der gemessenen dynamischen Druckdifferenz berechnet werden:



Bild 2. Pitotrohre zur Differenzdruckmessung

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (u_1^2 - u_2^2)$$

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta p}{\rho \cdot u^2} \quad (2)$$

Die Geschwindigkeit als Bezugswert für das untere Rohr entnimmt man den Messungen mit dem Prandtlrohr, das in einer Tiefe von 50 mm noch ungestörte Werte liefert. Das Ergebnis der vertikalen Traversierung ist in Bild 3 auf der linken Seite dargestellt. Die Geschwindigkeiten wurden mit dem Wert in 150 mm Tiefe normiert. Die Geschwindigkeit in dieser Tiefe wurde zusätzlich zum Vergleich noch mit einem werksseitig kalibrierten Flügelradzähler gemessen. Die Werte stimmen mit denen des Prandtlrohres gut überein. Wie man sieht, gibt es in der Nähe der Wasseroberfläche ein erhebliches Geschwindigkeitsdefizit, das von der Reibungsgrenzschicht am Düsenaustritt hervorgerufen wird. Um die Grenzschicht in diesem Bereich zu beschleunigen wurde im Jahr 1979 an der Düse nachträglich eine Einrichtung zur wandparallelen Wassereinspritzung aus einem 1 mm hohen Spalt angebaut (Bild 4). Die Einstellung der Austrittsgeschwindigkeit erfolgte bisher nach einer Tabelle. Die Werte auf der linken Seite von Bild 3 stellen den Zustand

The figure consists of two side-by-side line graphs, both plotting 'Wassertiefe (mm)' (Water depth) on the y-axis (0 to 700 mm, inverted) against 'Geschwindigkeitsverhältnis' (Velocity ratio) on the x-axis (0.70 to 1.10).

Left Graph: Grenzschichteinspritzung alt

- Legend:**
 - Red line with circles: Messung Pitot-Rohr
 - Blue line with 'x' markers: $V_{prandtl} / V_{ott}$
- Data Trends:**
 - The blue line ($V_{prandtl} / V_{ott}$) starts at a velocity ratio of approximately 0.75 at 650 mm depth and increases to about 1.05 at 90 mm depth.
 - The red line (Messung Pitot-Rohr) starts at a velocity ratio of approximately 0.95 at 10 mm depth and increases to about 1.05 at 60 mm depth.

Right Graph: Grenzschichteinspritzung neu

- Legend:**
 - Blue line with 'x' markers: $V_{prandtl} / V_{ott}$
- Data Trends:**
 - The blue line ($V_{prandtl} / V_{ott}$) starts at a velocity ratio of approximately 0.72 at 650 mm depth and increases to about 1.02 at 90 mm depth.

Die Wassergeschwindigkeit im Kanal weist leider zeitlich stark schwankende Anteile auf. Zur Messung mit dem Prandtlrohr steht ein induktiver Differenzdruckaufnehmer mit einem Messbereich von 0,01 bar zur Verfügung. Die Messmembran ist elastisch gelagert und bildet mit der Masse der Wassersäule in den angeschlossenen

Schläuchen ein schwingungsfähiges System. Zur Berechnung der Federkonstanten gibt der Hersteller eine Volumenänderung von $0,05 \text{ cm}^3$ in der Messkammer für den Messbereichsendwert an. Mit diesen Werten und der Dichte für Wasser folgt für die Eigenfrequenz der Messkette als Funktion von Schlauchlänge und Innendurchmesser (siehe hierzu auch [4]):

$$f = 630,8 \frac{\text{Hz}}{\text{m}^{0,5}} \cdot \frac{d}{\sqrt{L}} \quad (3)$$

Um eine hohe Eigenfrequenz zu erreichen, verwendet man also große Durchmesser und kurze Längen. Für $d = 7 \text{ mm}$ und $L = 12 \text{ m}$ folgt $f = 1,27 \text{ Hz}$. Da die festen Rohre in der Halterung des Prandtlrohres einen geringeren Durchmesser aufweisen als die Schläuche, ist die tatsächliche Eigenfrequenz noch geringer. Diese misst man durch Aufbringen einer Druckstörung, etwa durch kurzes Zusammenquetschen und wieder loslassen des Schlauches. Die Frequenz der abklingenden Störung beträgt hier $0,62 \text{ Hz}$. Um diese Eigenschwingungen aus den Zeitfunktionen der Geschwindigkeitsmessungen zu eliminieren, werden die Messpunkte im Folgenden über die Periodendauer der Eigenschwingung gemittelt.

Bild 5 zeigt die Geschwindigkeit auf drei verschiedenen Tiefen: 89mm, 339mm und 616mm unter der Wasseroberfläche, wobei sich die Position 616 um etwa 33mm über dem Tankboden befindet. Die drei Zeitfunktionen wurden nicht synchron aufgenommen, sondern zeitlich versetzt, im Rahmen der Traversierung. Wie man sieht, weist die Geschwindigkeit am Tankboden in der Wandgrenzschicht starke Schwankungen auf, die nach oben hin abklingen. Allerdings wird durch die Einspritzung an der Wasseroberfläche eine starke Geschwindigkeitsschwankung erzeugt, die sich noch in 89mm Tiefe bemerkbar macht. Bei den Messungen des Modellwiderstands versucht man den instationären Anteilen dadurch Rechnung zu tragen, dass man alle Parameter über einen Zeitraum von 5 Sekunden mittelt. Die Propellerfrequenz nach Gleichung 1 liegt über der Eigenfrequenz nach Gleichung 3 und ist daher nicht nachweisbar.

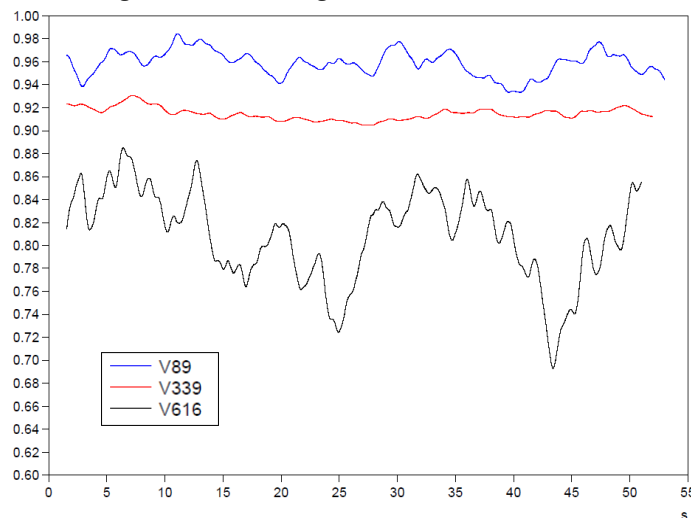
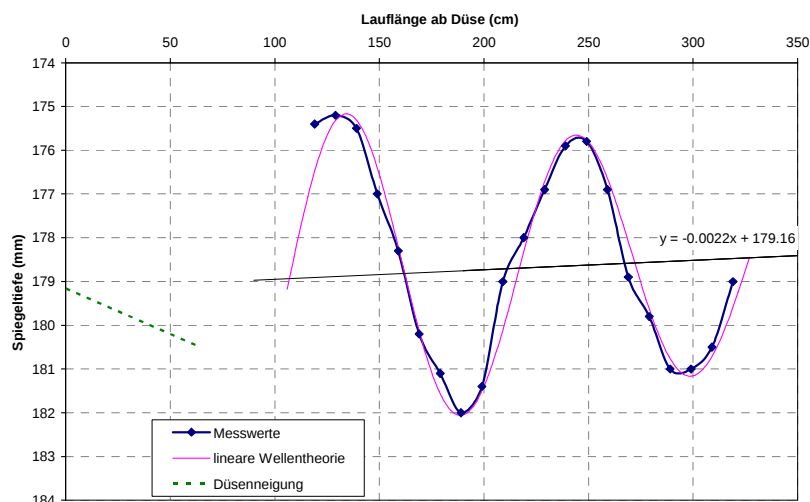


Bild 5. Geschwindigkeit in m/s über einen Zeitraum von 53 Sekunden für 3 verschiedene Wassertiefen

3.3 Verlauf des Wasserspiegels

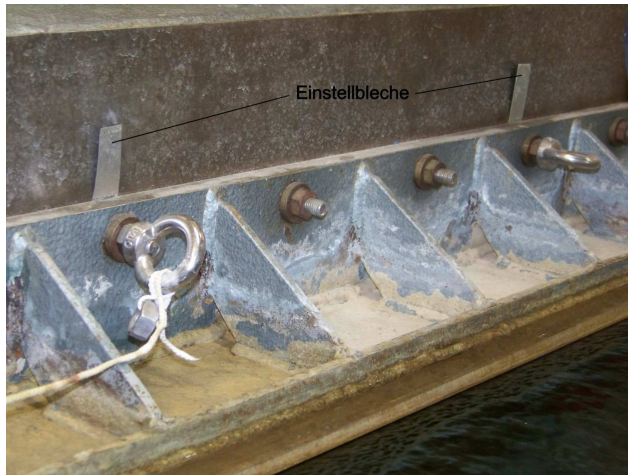
Stromab von der Düse bildet sich systembedingt immer eine stehende Welle, deren Wellenlänge sich aus der Wassergeschwindigkeit ergibt. Der Verlauf des Wasserspiegels in der Symmetrieebene des Kanals wurde durch eine Tiefenmessung ermittelt, mit Hilfe einer höhenverstellbaren Nadel, die an einer verschiebbaren Traverse befestigt war. Das Ergebnis für die Geschwindigkeit $1,3 \text{ m/s}$ ist aus Bild 6 ersichtlich. Zusätzlich zu den Messpunkten ist die theoretische Kurve eingezeichnet, deren Wellenlänge sich unter Beachtung der Tatsache dass $c = u$ aus der folgenden Gleichung der linearen Wellentheorie berechnet:



Das Ergebnis für die Geschwindigkeit $1,3 \text{ m/s}$ ist aus Bild 6 ersichtlich. Zusätzlich zu den Messpunkten ist die theoretische Kurve eingezeichnet, deren Wellenlänge sich unter Beachtung der Tatsache dass $c = u$ aus der folgenden Gleichung der linearen Wellentheorie berechnet:

$$c = \sqrt{\frac{\lambda \cdot g}{2\pi} \cdot \tanh \frac{2\pi \cdot h}{\lambda}} \quad (4)$$

Bild 6. Stehende Welle bei $u = 1,31 \text{ m/s}$



Die Amplitude von 7 mm ist größer als erwartet. Ein möglicher Grund dafür ist die Neigung der Düse am Austritt, die nicht exakt waagrecht verläuft, sondern nach einer ersten groben Messung mit der Wasserwaage eine Neigung von $0,12^\circ$ nach unten aufweist. Bild 7 zeigt den Wasseraustritt aus der Düse und die Einstellbleche, mit denen die Neigung der Abströmplatte korrigiert werden kann. Zum Aufbau des Düsenaustritts siehe auch Bild 4.

Bild 7. Düsenaustritt

Im nächsten Bild 8 ist der Spiegelverlauf für die Geschwindigkeit 0,92 m/s dargestellt. Auffällig ist die fehlende Dämpfung, d.h. die Amplitude klingt nicht ab. Eine Amplitude von 5 mm bei $u = 0,92$ m/s und von 7 mm bei $u = 1,31$ m/s ergibt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Amplitude und Geschwindigkeit. Dies steht im Gegensatz zu den Aussagen in [1] wonach die Amplitude üblicherweise mit der vierten Potenz abnimmt. Bei der Geschwindigkeit 0,92 m/s scheint es also zu einer zusätzlichen Anfachung der Störung zu kommen deren Ursache nicht geklärt ist.

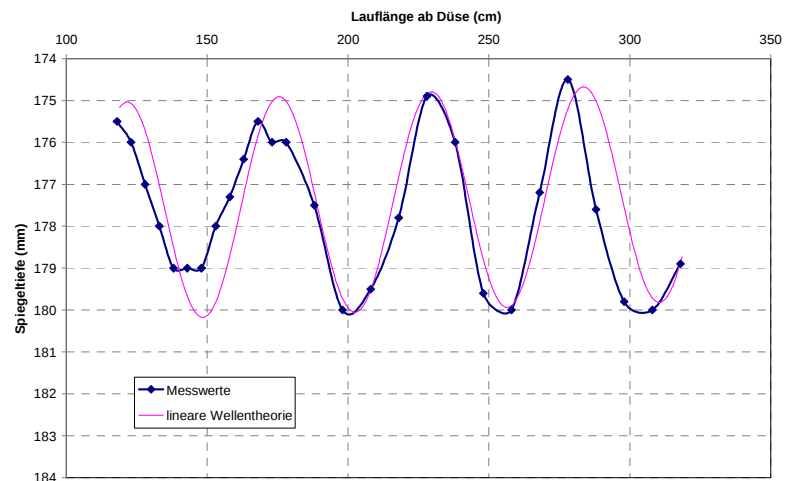


Bild 8. Stehende Welle bei $u = 0,92$ m/s

Eine stehende Welle mit einer solch großen Amplitude verhindert genaue Messung des Schiffswiderstandes. Bei einer Modelllänge von 100 cm muss lt. Bild 8 mit einer Neigung von $\pm 1\%$ gerechnet werden, je nachdem ob sich Bug oder Heck auf einem Wellenberg befinden. Da der Widerstand bei $u = 0,92$ m/s nur 8,8% des Gewichts beträgt, ergibt sich ein Messfehler für den Widerstand von $\pm 11\%$ je nach Position des Modells. D.h. bevor mit dem Kanal quantitative Messungen durchgeführt werden können, muss die Abströmplatte an der Düse so eingestellt werden, dass die Amplitude der stehenden Welle um eine Größenordnung reduziert wird. Aus Bild 4, Einzelheit "A", ist ersichtlich, dass der eingespritzte Wandstrahl eine nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente aufweist. Eine rein waagrechte Ausrichtung der Abströmplatte ist daher eventuell nicht optimal.

3.4 Instationäre Schwankungen des Wasserspiegels

Zusätzlich zu der stehenden Welle an der Wasseroberfläche beobachtet man eine periodische Schwankung der Wasserspiegellhöhe, es laufen also an der Oberfläche noch instationäre Wellen. Zur Messung der Wasserhöhe verwendet man einfacherweise eine statische Drucksonde am festen Ort im Kanal. Ein Messergebnis für $u = 1,3$ m/s zeigt Bild 9. Die typische Periodendauer liefert die Fourieranalyse zu 4 Sekunden. Falls die Ursache hierfür ein Pendeln der gesamten Wassersäule des Kanals wäre, müsste nach dem Kontinuitätssatz auch die Geschwindigkeit eine Schwankung gleicher Frequenz aufweisen. Eine Korrelation des statischen Drucks ca. 1,5 m hinter der Düse zu der mit dem Flügelrad an nahezu gleicher Position gemessenen Geschwindigkeit existiert jedoch nicht. Es ist daher anzunehmen, dass es sich um eine Störung an der Wasseroberfläche handelt, die wahrscheinlich durch die Spalteinspritzung (Bild 4) hervorgerufen wird. Bei der Messung der Periodendauer am festen Ort ist zu beachten, dass die Phasengeschwindigkeit c sich der Strömungsgeschwindigkeit u überlagert. Es gilt für eine stromab laufende Störung:

$$\frac{\lambda}{T_{\text{mess}}} = c + u \quad (5)$$

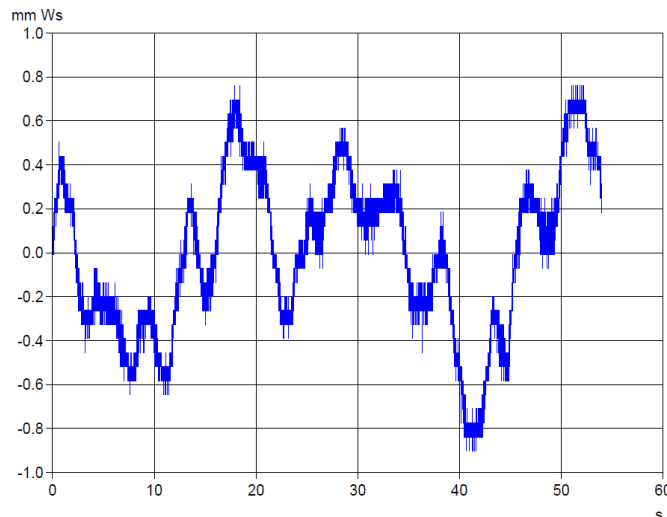


Bild 9. Schwankung der Spiegelhöhe ca. 1,5 m hinter der Düse bei $u = 1,315 \text{ m/s}$

Mit Gleichung 5 eingesetzt in Gleichung 4 lassen sich die in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellten Werte berechnen. Auffallend ist das nahezu konstante Verhältnis von c/u . Die Spiegelneigung erhält man durch Division des Abstandes zwischen Wellenberg und Wellental

u	T_{mess}	λ	c	c/u	Amplitude	Neigung
[m/s]	[s]	[m]	[m/s]	-	[mm]	‰
0.610	1.52	1.13	1.35	2.22	0.4	1.4
0.914	2.33	2.59	2.03	2.22	0.65	1.0
1.315	4.00	6.54	2.95	2.24	0.8	0.5

durch die halbe Wellenlänge. Der Wert bei $u = 0,61 \text{ m/s}$ ist weniger kritisch zu sehen, da das Modell mit einer Länge von 1 m in etwa eine Wellenlänge überspannt. Bei $u = 0,91 \text{ m/s}$ muss dagegen analog zu Abschnitt 3.3 mit einer Schwankung des gemessenen Schiffswiderstandes von bis zu $\pm 11\%$ gerechnet werden, die jedoch durch eine an die Periodendauer angepasste zeitliche Mittelung zumindest teilweise kompensiert werden kann.

4. MODELLTRÄGER UND KRAFTMESSEINRICHTUNG

Die Aufhängung des Modells und die integrierten Dynamometer sind sehr aufwendig gestaltet. Die gesamte Einheit hängt an einem Waagebalken, wobei das Gewicht auf der Gegenseite kompensiert wird. Durch eine Parallelgrammführung kann sich der Modellträger in aufrechter Position frei auf- und abbewegen. In Bild 10 sind als wesentliche Bestandteile der Kraftmesseinrichtung eine obere und untere Traverse zu erkennen. Das Konstruktionsprinzip ist Bild 11 zu entnehmen. Die obere Traverse ist mit dem Waagebalken verbunden, die untere Traverse mit dem Modell. Drei Pendelstützen übertragen vertikale Kräfte zwischen den Traversen und stützen damit die vertikale Kraft F_z und die Momente M_y und M_x ab. Drei Schubstangen, die sich in der horizontalen Ebene befinden, übertragen Kräfte auf je einen Kragarm, der mit Dehnmessstreifen beklebt ist. Damit lassen sich die Kräfte F_x , F_y und das Moment um die Hochachse M_z messen. Im austarierten Zustand wird das Gewicht der



Traverse von den Schwimmkörpern getragen und die Pendelstützen sind kraftfrei. Am unteren Ende des vertikalen Rohrs wird das Modell befestigt. Der Verschraubungspunkt ist mit dem Rumpf über ein Gelenk verbunden (Bild 12). Dadurch kann sich der Trimmwinkel des Modells frei einstellen. Abdrift- und Krängungswinkel werden vor dem Versuch über einen Schneckentrieb manuell eingestellt. Falls ein Ruder eingebaut ist, wird dessen Winkel ebenfalls über einen Schneckentrieb eingestellt.

Bild 10. Modellaufhängung

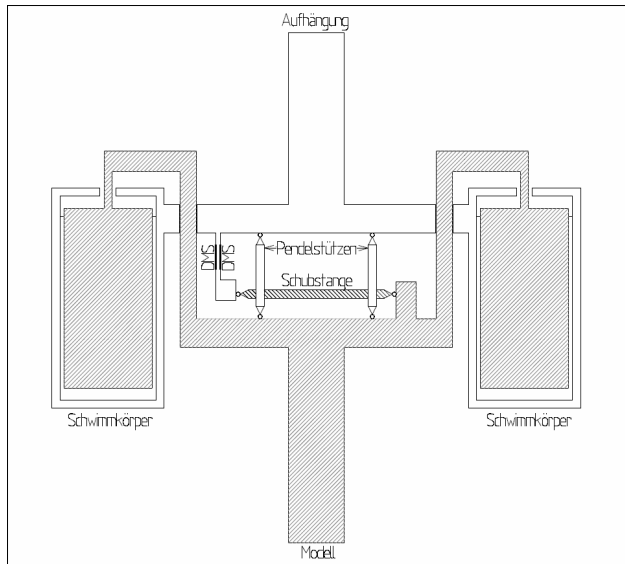


Bild 11. Kraftmesseinrichtung

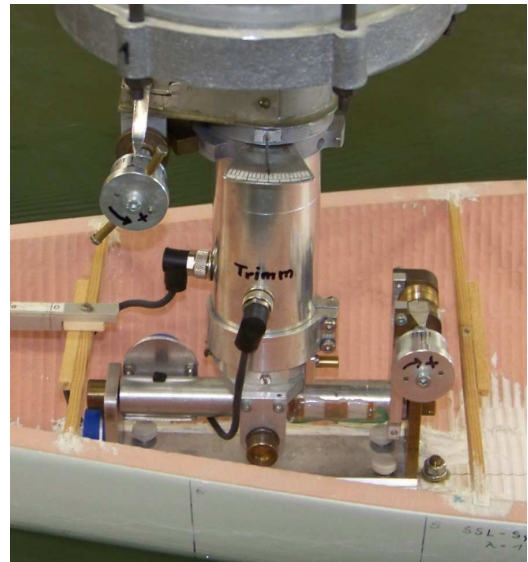
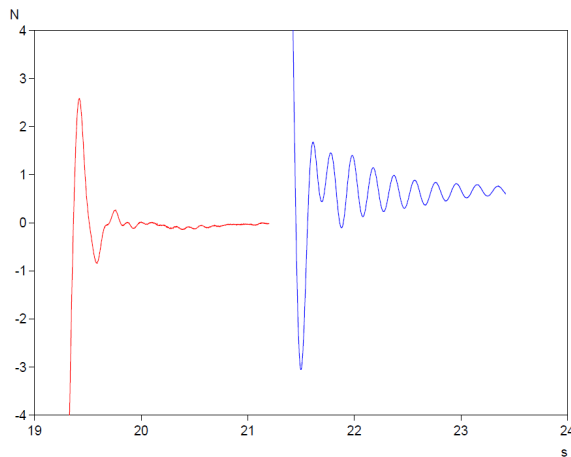


Bild 12. Anschraubgelenk

Die Berechnung der gemessenen Kräfte aus den DMS-Signalen erfolgt in den angeschlossenen Messverstärkern. Zu Beginn jeder Messserie werden die Offset-Werte der Messbrücken kompensiert. Ein Vergleich der angezeigten Messwerte mit einer definierten Belastung durch Gewichte zeigt z.B. für F_x eine gute Messgenauigkeit mit einem Proportionalitätsfehler von 3,6 % und einem Fehler im Offset von 0,02 N.



Zur Beurteilung der Eignung für dynamische Messungen ist eine Bestimmung der Eigenfrequenzen notwendig. Am einfachsten erfolgt dies durch einen Anschlagversuch mit anschließender Aufzeichnung des Ausschwingverhaltens. Bild 13 zeigt das Ergebnis bei laufender Strömung mit angeschlossenem Modell (ohne Kiel). Die Eigenfrequenz der Längskraft F_x beträgt ca. 5 Hz. Die Querkraft F_y wird in ihrer Schwingung durch die größere Lateralfläche stark bedämpft. Ihre Eigenfrequenz beträgt ca. 8,3 Hz. Beide Werte liegen hoch genug, damit die Kraftmessung den Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit folgen kann.

Bild 13. Ausschwingversuch bei $u = 9$ m/s, links F_y rechts F_x

Das Moment M_z wird aus zwei horizontalen Kraftmessungen in y-Richtung berechnet. Die beiden Messstäbe haben einen Abstand in x-Richtung von 221,4 mm. Der Ausschwingversuch zeigt für M_z eine Eigenfrequenz von 8 Hz (Bild 14). Der Schneckentrieb weist ein Spiel auf, das sich bei der Einstellung des Abdriftwinkels als toter Gang zeigt. Das Spiel und die Elastizität der Einspannung um die z-Achse führen zu einer Änderung des tatsächlichen Abdriftwinkels gegenüber dem eingestellten Wert. Die statische Messung ergab folgenden Zusammenhang (M_z eingesetzt in Nm und δ in Grad):

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= 0,319 \cdot M_z^{0,44} + 0,2 & \text{wenn } M_z > 0 \\ \Delta\delta &= -0,319 \cdot |M_z|^{0,44} & \text{wenn } M_z \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

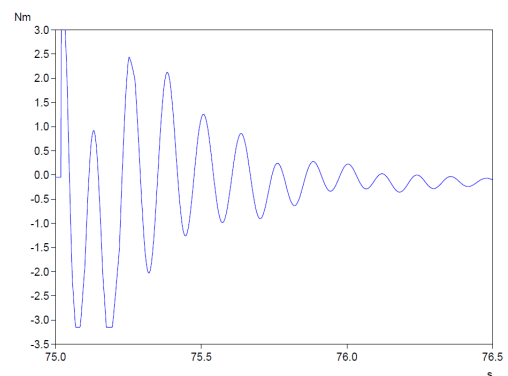


Bild 14. Ausschwingversuch M_z

Dabei ist angenommen, dass die Einstellung des Abdriftwinkels immer durch drehen von - nach + erfolgt. Ein positives M_z vergrößert δ .

5. GESCHWINDIGKEITSMESSUNG

Für die Geschwindigkeitsmessung wird routinemäßig ein Flügelrad der Fa. Ott eingesetzt. Die Umdrehungen werden über magnetische Impulse gezählt. Jedes Exemplar wird in der Fabrik vermessen und erhält ein Kalibrierzeugnis. Ein Vergleich mit dem Prandtlrohr ergab eine gute Übereinstimmung. Auf Grund der geringen Impulszahl ist die Auflösung allerdings begrenzt. z.B. erhält man bei $u = 0,9$ m/s eine Auflösung von 2% mit einer Messfrequenz von 8,8 Hz. Erschwerend kommt hinzu, dass das Flügelrad die Strömung so stark stört, dass eine Positionierung vor dem Modell die Anströmung unzulässig verfälschen würde. Während der Kraftmessung verwendet man daher einen Ott-Flügel, der in der Nähe der Tankwand platziert ist. Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, weist die Strömung in der Nähe der Wand eine deutliche Fluktuation auf. Eine Gegenüberstellung der Messung am Ort des Modells und am Kanalrand in Wandnähe zeigt Bild 14. Jeder Messpunkt stellt eine Mittelung über 5 Sekunden dar. Gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalmitte werden an der Wand Abweichungen von 3% gemessen. Dies ergibt einen zusätzlichen Messfehler von 6% für die Kraftmessung. Es wäre sinnvoll auf den Einsatz eines Flügelrades zu verzichten und in Zukunft die Geschwindigkeit vor dem Modell berührungslos mit dem am Institut vorhandenen LDA zu messen.

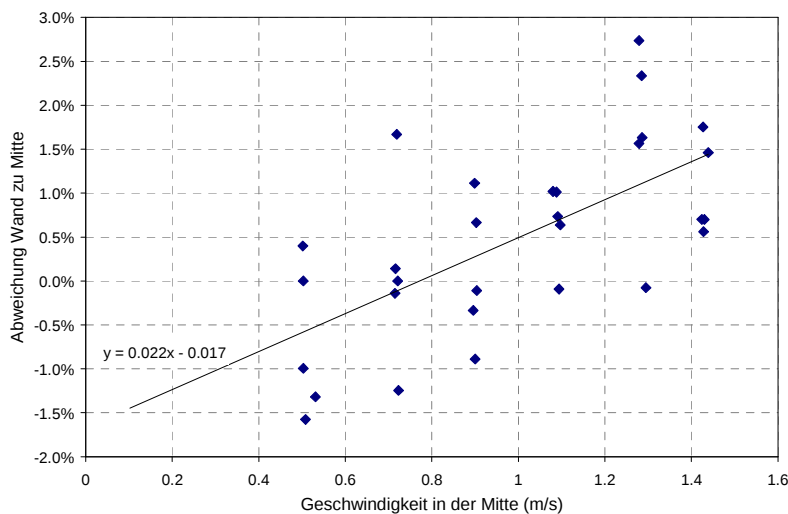
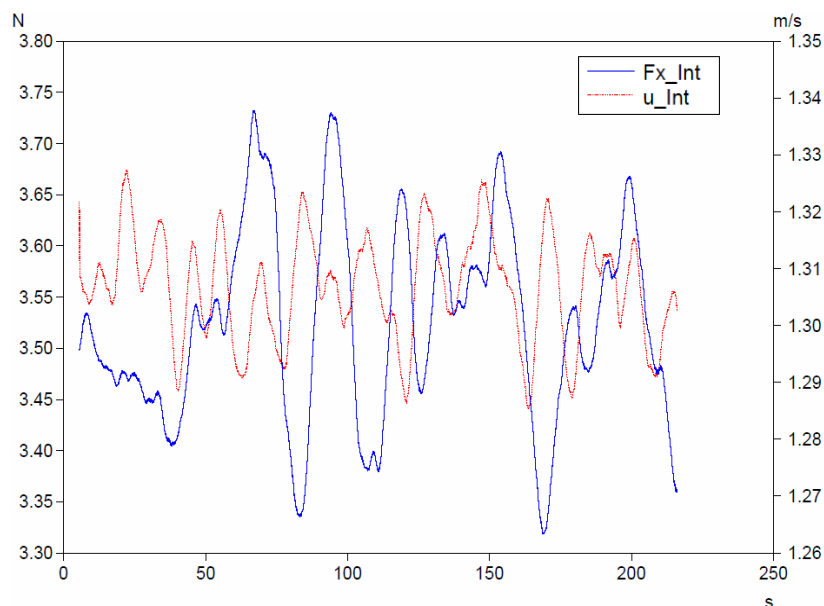


Bild 14. Vergleich der Messpositionen Tankwand und Tankmitte

6. REPRODUZIERBARKEIT DER KRAFTMESSUNG

Aus den bisher dargestellten Ergebnissen ist zu erwarten, dass die gemessenen Modellkräfte mehreren verfälschenden Einflüssen unterliegen. Ein Versuch zur Kompensation, der in der Vergangenheit durchgängig angewendet wurde, ist die zeitliche Mittelung. Im folgenden Kapitel wird die Wirksamkeit diskutiert.

6.1 Zeitlicher Verlauf der Modellkraft



Der zeitliche Verlauf der Widerstandskraft für das Modell mit Anhängen und der Verlauf der mit dem Flügelrad an der Seitenwand gemessenen Geschwindigkeit sind in Bild 15 dargestellt. Beide Funktionen wurden durch Integration über der Zeit geglättet. Aus der Eigenfrequenz der Kraftmessung und der Periodendauer der Flügelradimpulse ergibt sich das kleinste gemeinsame Vielfache für die Integrationszeit zu 5,427 Sekunden.

Bild 15. Zeitfunktionen über 215 Sekunden für $u = 1,3$ m/s

Eine direkte Korrelation der Geschwindigkeit zur Widerstandskraft ist nicht ersichtlich. Die Widerstandsschwankungen sind daher auf eine Änderung der Spiegelneigung zurückzuführen. Eine Analyse durch Kreuzkorrelation zeigt allerdings, dass sich bei einer zeitlichen Verschiebung um ca. 10 Sekunden eine Ähnlichkeit der Kurven ergibt. Eventuell werden durch die Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit an der Stauklappe am Ende des Kanals Wellen erzeugt, die stromauf laufen und mit zeitlicher Verzögerung zu Schwankungen der Spiegelneigung führen. Ohne die genauen Zusammenhänge zu kennen, ist eine Korrektur der Messergebnisse nicht möglich. Aus Bild 15 ergibt sich somit trotz zeitlicher Mittelung eine Ungenauigkeit in der Kraftbestimmung von $\pm 6\%$ und in der Geschwindigkeitsbestimmung von $\pm 1,6\%$.

Die bisherige Vorgehensweise der zeitlichen Mittelung über 5 Sekunden lässt sich auch mit statistischen Methoden bewerten. Folgende Annahmen müssen vorausgesetzt werden (siehe [5]):

1. alle Parameter werden zeitgleich über 5 Sekunden gemittelt und ergeben einen Messpunkt
2. die Häufigkeitsverteilung aller Messpunkte folgt der Gaußschen Normalverteilung
3. der Mittelwert der Grundgesamtheit entspricht den wahren Werten für Kraft und Geschwindigkeit
4. die Schätzwerte aus der Stichprobe dürfen auf die Grundgesamtheit übertragen werden
5. die Statistische Sicherheit ist mit 99 % ausreichend gewählt

Bei einer Geschwindigkeit von 1,31 m/s, einem Abdriftwinkel von 6° und einer Krängung von 12° wurden für das Modell mit Anhängen 100 Messpunkte aufgenommen. Folgende Werte ließen sich daraus berechnen:

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung	Vertauensbereich für Mittelwert	99% Grenzen für Grundgesamtheit
F_x	3,578 N	2,58 %	$\pm 0,68 \%$	$\pm 6,64 \%$
u	1,310 m/s	0,75 %	$\pm 0,20 \%$	$\pm 1,94 \%$

D.h. begnügt man sich mit einem einzelnen Messpunkt als Schätzung für den Mittelwert der Grundgesamtheit, so folgt eine Genauigkeit von $\pm 7,3 \%$ für F_x und $\pm 2,1 \%$ für u . Ein Versuch mit einer Erhöhung der Mittelungsdauer je Messpunkt von 5 auf 10 Sekunden brachte keine Reduzierung der Standardabweichung, lohnt also nicht. Weiterhin ist die obige Annahme 3. fraglich, so lange die Ursachen für die Schwankungen nicht wirklich verstanden sind. Die Ermittlung des Modellwiderstandes als Funktion der Geschwindigkeit ist im gegenwärtigen Zustand des Kanals also nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich.

6.2 Einfluss der Modellposition

In Abschnitt 3.3 wurde bereits auf den Einfluss der stehenden Welle auf die Widerstandsmessung hingewiesen. Um dies quantitativ abzuklären, wurden an zwei verschiedenen Modellpositionen jeweils 50 Messpunkte aufgenommen und statistisch ausgewertet. Um einen Fehler durch unterschiedliche Ausrichtung des Modells an den beiden Messorten zu vermeiden, wurde das Modell ohne Anhänge gemessen. Der Einfluss des Abdriftwinkels über die Querkraft auf den Widerstand ist dadurch gering. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug 0,96 m/s.

Position Bug hinter Düse	Mittelwert von F_{ix} / u^2	Standardabweichung
164 cm	0,760	1,62 %
194 cm	0,706	1,82 %

Die Abweichung der Mittelwerte von 7,6 % ist als nicht zufällig statistisch abgesichert. Es muss zur der Ungenauigkeit der Messung, die im vorigen Abschnitt ermittelt wurde, also noch die Ungenauigkeit aus der Position hinzu addiert werden.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Im gegenwärtigen Zustand ist der Umlauftank trotz der aufwendigen und genauen Kraftmesseinrichtung für quantitative Messungen des Schiffswiderstandes nicht geeignet. Ursache ist die schlechte Strömungsqualität in der Messstrecke. Folgende Verbesserungsmaßnahmen werden vorgeschlagen:

- o Einbau einer ausreichenden Anzahl von Sieben in der Beruhigungskammer, die einen deutlichen Strömungswiderstand erzeugen, mit dem Ziel einer Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeit
- o Einstellung der Neigung der Ausströmplatte mit dem Ziel die Amplitude der stehenden Welle um eine Größenordnung zu reduzieren
- o Untersuchung des Pumpendruckes in der Vorkammer und damit der Geschwindigkeit der Spaltströmung auf zeitliche Konstanz. Ausschluss instationärer Einflüsse auf die Wasserspiegelhöhe.
- o Beobachtung der Stauklappe am Ende des Kanals in Bezug auf die Reflexion von Wellen und gegebenenfalls aufbringen von Wellenbrechern

Der Erfolg der Maßnahmen sollte durch Traversiermessungen und durch Messung der Wasserspiegelhöhe, sowohl geometrisch als auch mittels statischer Druckmessung, nachgewiesen werden. Geschwindigkeit sowie Spiegelhöhe müssen einen ausreichend konstanten zeitlichen und örtlichen Verlauf aufweisen. Ein Vergleich der Messergebnisse aus dem Umlaufkanal mit Messwerten aus dem Schlepptank ist erst nach Sanierung des Kanals sinnvoll.

8. LITERATUR

1. Tamashima, M.; Matsui, S; Ogura, M (1983), "Quantitative Measurements with Small Models of Ships in a Circulating Water Channel", *Experiments in Fluids*, **1**(3), 135-142.
2. Pullinger, M.G.; Sargison, J.E. (2007), "Using CFD to improve the design of a circulating water Channel", *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Australia.
3. Chen, Z.; Kurokawa, Y; Nishimoto, H. (2006), "CFD Application on the Development of Circulating Water Channel", *16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA.
4. Carolus, T. (1986), "Kunststoffleitungen zwischen Druckmeßstelle und Druckaufnehmer als Fehlerquelle bei der Messung instationärer Drucksignale", *Forschung im Ingenieurwesen*, **52**(6), 191-197
5. Graf, U.; Henning, H-J. (1953), *Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik*, Springer Verlag, D.