

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Abdel-Maksoud, A.; Rieck, Karsten

Wellensystem eines Schiffes bei stationärem Fahrtzustand

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104135>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Abdel-Maksoud, A.; Rieck, Karsten (1996): Wellensystem eines Schiffes bei stationärem Fahrtzustand. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wellen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 9. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 55-74.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Wellensystem eines Schiffes bei stationärem Fahrtzustand

Dr.-Ing. M. Abdel-Maksoud,
Dipl.-Ing. K. Rieck

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH

1. Einleitung

Im Bereich der Schiffstechnik begegnen uns Wellen in 2 Problemkreisen:

- durch Naturkräfte hervorgerufene Wellen (Schiff im Seegang) und
- durch das Druckfeld des Schiffes hervorgerufene Wellen (Wellensystem eines Schiffes).

Wellen, die von Natur aus, z. B. durch Wind, entstehen und solche, die durch ein Schiff verursacht werden, gehorchen gleichen physikalischen Gesetzen.

2. Wellensystem eines Schiffes

Von einem Schiff erzeugte Wellen erscheinen von diesem aus betrachtet als "stehende Wellen". Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit ist bei stationärer Fahrt des Schiffes gleich der Schiffsgeschwindigkeit.

Bei einem auf freier Wasseroberfläche fahrenden Schiff findet unter der Wirkung der Druckverteilung am Schiff eine Verformung der freien Wasseroberfläche statt. Am Bug und am Heck, im Bereich der Staupunkte, bildet sich ein Wellenberg aus. Im mittleren Teil des Schiffes, in dem Übergeschwindigkeiten auftreten, erfolgt eine Absenkung des Wasserspiegels. Dieses Wellensystem heißt primäres Wellensystem und stellt eine Gleichgewichtsstörung der freien Wasseroberfläche dar (Wellenzug 1 in Abb. 1). Seine Länge entspricht der Schiffslänge. Es bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Schiff fort.

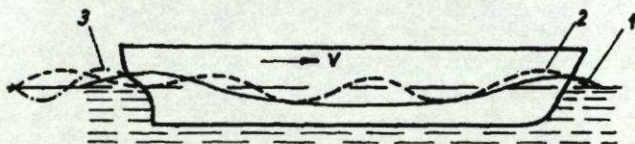


Abb. 1

Wellenbild an einem Schiff (Schema)

An der Außenhaut des Schiffes entstehen entsprechend der Krümmungstendenz der strakenden Schiffsform kontinuierlich neue Wellen, z. B. am Bug und Heck sowie an der vorderen und hinteren Schulter, deren Phase infolge der Trägheit der Flüssigkeit gegenüber den ursprünglichen Druckstörungen verschoben ist. Die Wellenzüge 2 und 3 in Abb. 1 stellen die Bug- und die Heckwelle dar. Dieses Sekundärwellensystem pflanzt sich hinter dem Schiff in einem keilförmigen Bereich entgegengesetzt der Fahrtrichtung fort.

3. Grundlagen der Wellenbildung

3.1 Tiefwasser

Zur Veranschaulichung der Sekundärwellenerzeugung kann man sich z. B. die Bugwelle durch ein unendlich kleines Überdruckgebiet (Druckpunkt) ersetzt vorstellen. Dieser Druckpunkt bewegt sich mit Schiffsgeschwindigkeit und erzeugt in idealer Flüssigkeit ein System von Diagonal- und Querwellen (Abb. 2). Die leicht gekrümmten divergierenden Diagonalwellen breiten sich in einem keilförmigen Sektor mit den halben Öffnungswinkel von $19^{\circ} 28'$ (Kelvinscher Winkel) aus. Vom ersten Wellenberg an folgen Querwellen in regelmäßigem Abstand λ aufeinander. Dieser Abstand entspricht der Wellenlänge λ einer freien Oberflächenwelle, die sich mit der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c_w zu

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \cdot c_w^2 \quad (1)$$

ergibt. Da $c_w = v$ ist, hängt die Wellenlänge der Querwelle von der Schiffsgeschwindigkeit v ab. Abb. 3 zeigt die Überlagerung der Sekundärwellen, die von Bug und Heck eines Schiffes ausgehen. Das Sekundärwellensystem macht sich am Schiff erst bei höherer Geschwindigkeit bemerkbar als das Primärwellensystem. Alle Wellen interferieren miteinander.

Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Sekundärwellen auf tiefem Wasser wird infolge

- der Geschwindigkeitsänderung des Wassers neben dem Schiff durch Verdrängungs- und Reibungseinfluß und
- des längeren Weges der Wellen entlang der Schiffsaußenhaut im Vergleich zur Seitenprojektion durch die endliche Schiffsbreite

leicht verändert.

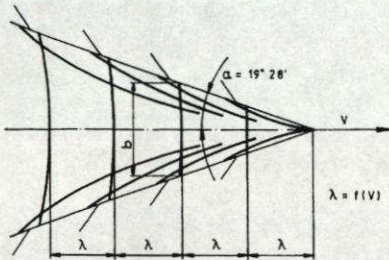


Abb. 2 Wellensystem eines wandernden Druckpunktes

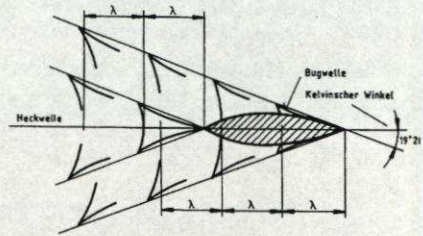


Abb. 3 Sekundärwellen an Bug und Heck eines Schiffes

Bei der Zunahme des Strömungswinkels, bei Auslenkung der Strömung von der Mittschiffsebene, wird das Wasser "aufgestaut". Es bildet sich ein Wellenberg. Dies ist z. B. am Bug und am Wasserlinienauslauf der Fall. Bei der Abnahme des Strömungswinkels, d. h. bei Umlenkung zur Mittschiffsebene, hat das Wasser durch seine Trägheit das Bestreben in seiner alten Richtung weiterzufließen. Dadurch bildet sich ein Wellental. Die Abb. 4 zeigt für eine idealisierte Schiffsförm mit ausgeprägten Schultern die entstehenden Wellensysteme und ihre Interferenz. Alle Wellen sind stark überhöht dargestellt.

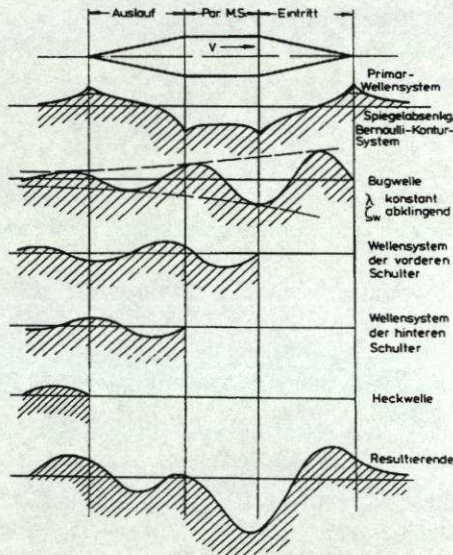


Abb. 4 Wellensystem an einer idealisierten Schiffsförm (aus Schneekluth "Hydrodynamik zum Schiffsentwurf")

Zum Erzeugen der Wellen ist Energie notwendig, die das sich bewegende Schiff aufbringen muß. Die Energie aller Querwellen mit der Länge λ ist gleich. Da die Wellenbreite b linear mit dem Abstand vom Druckpunkt zunimmt, wird die Wellenhöhe ζ_w mit der Wurzel aus diesem Abstand abnehmen. Unter Vernachlässigung der divergierenden Wellen muß zur Aufrechterhaltung des Wellensystems der Frontwelle pro Wellenlänge Fortschrittsweg die Energie

$$E \sim \rho \cdot g \cdot \lambda \cdot b \cdot \zeta_w^2 \quad (2)$$

b Wellenbreite

$$\zeta_w \text{ Wellenhöhe} \quad \zeta_w = 2 \cdot c_w^2 / g$$

zugeführt werden. Ein an der Wasseroberfläche sich bewegender Körper, der Wellen erzeugt und der Flüssigkeit Energie zuführt, erfährt dadurch einen Widerstand. Die Energie entspricht dem Wellenbildungswiderstand R_{WP} :

$$R_{WP} \sim \rho \cdot g \cdot b \cdot \zeta_w^2 \quad (3)$$

Der Wellenbildungswiderstand hängt hauptsächlich von der Wellenhöhe ζ_w ab. Er kommt in erster Linie durch das Sekundärwellensystem zustande. Für den in Abb. 3 dargestellten Fall der Überlagerung von Bug- und Heckwelle ergibt sich die Wellenhöhe der resultierenden Querwelle:

$$\zeta_{Wresult}^2 = \zeta_{WBug}^2 + \zeta_{WHeck}^2 + 2 \cdot \zeta_{WBug} \cdot \zeta_{WHeck} \cdot \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right) \quad (4)$$

Der Abstand a ist der Ausdruck für die Phasenverschiebung zweier aufeinanderfolgenden Wellenberge der beiden Komponentenwellen.

Das gesamte Wellensystem eines Schiffes kann man sich aus einer unendlichen Anzahl von Punktstörungen vorstellen. Alle ablaufenden Wellen bewegen sich mit der gleichen Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und überlagern sich zum resultierenden Wellensystem hinter dem Schiff. Eine analytische Behandlung des Wellensystems eines Schiffes ist derzeit nicht möglich.

Ein Beispiel für die gezielte Anwendung der Überlagerung von Wellensystemen ist der Bugwulst. Bei größeren Geschwindigkeiten bietet er günstige Möglichkeiten zur Beeinflussung des Wellensystems. Durch den Bugwulst wird ein zusätzliches Wellensystem erzeugt, das sich mit der Bugwelle überlagert (Abb. 5).

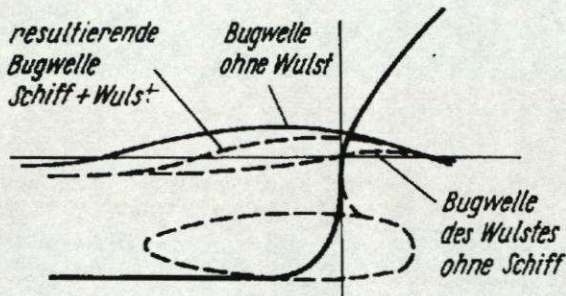


Abb. 5 Bugwelle am Schiff mit und ohne Bugwulst

Die Höhe der resultierenden Welle ist gegenüber der Bugwelle verringert. Der Wellenberg wurde weiter nach vorn verlagert. Dadurch wirken sich ungünstige Überlagerungen mit dem Heckwellensystem nicht so stark aus und treten bei anderen Geschwindigkeiten auf.

3.2 Beschränktes Fahrwasser

Zwei Formen des beschränkten Fahrwassers werden unterschieden:

- Flachwasser - Wasser nach unten begrenzt und
- Kanal - Wasser allseits begrenzt.

Flachwasser- und Kanaleffekt sind verschiedenartig. Sie können nicht durch dieselben Umrechnungsmethoden berücksichtigt oder durch dieselbe in irgendeinem Verhältnis zu den räumlichen Beschränkungen stehende Kennzahl festgelegt werden. Der Flachwassereffekt verändert das sekundäre Wellensystem. Der Kanaleffekt dagegen beruht auf einer Verzerrung des primären Wellensystems.

3.2.1 Flachwasser

Auf flachem Wasser verändern sich die Bahnen der Wasserteilchen in der Welle, die in unendlich tiefem Wasser Kreise darstellen zu Ellipsen. Für die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c_w auf beliebiger Wassertiefe gilt:

$$c_w = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot h\right)} \quad (5)$$

h Wassertiefe

Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit hängt also von der Wellenlänge und der Wassertiefe ab. Für große Wassertiefen wird das Argument des tanh groß und der tanh selbst geht gegen eins. Man erhält die Gleichung 1. Das ist schon annähernd der Fall, wenn das Argument des tanh den Wert drei erreicht, d. h. wenn die Wassertiefe die Größe der halben Wellenlänge annimmt.

Für sehr kleine Wassertiefen h kann man den tanh gleich seinem Argument setzen, was eine sehr vereinfachte Form der Gleichung 5 ergibt:

$$c_w \approx \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot h} = \sqrt{g \cdot h} \quad (6)$$

Hier fällt der Einfluß der Wellenlänge gänzlich heraus. Man erhält die nur noch von der Wassertiefe abhängige größtmögliche Wellengeschwindigkeit auf flachem Wasser (Stauwellengeschwindigkeit bzw. Schwallgeschwindigkeit). Der Fließzustand des Wassers unterhalb der Stauwellengeschwindigkeit heißt "Strömen", der darüber "Schießen".

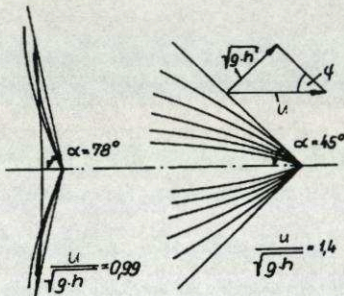


Abb. 6 Wellensysteme auf flachem Wasser

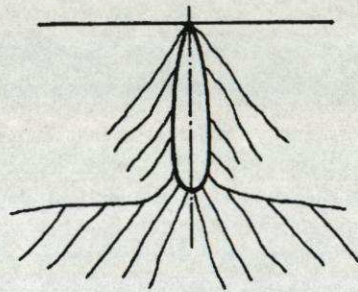


Abb. 7 Bug- und Heckwellensystem an einem auf flachem Wasser fahrenden Schiff

In dem Maße, wie sich die Fortschrittsgeschwindigkeit des Druckpunktes erhöht, nimmt der Abstrahlungswinkel der Diagonalwellen zu (Abb. 6). Es wird

ein größerer Sektor der freien Wasseroberfläche vom Sekundärwellensystem bedeckt. Für

$$\frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = Fn_h = 1 \quad (7)$$

erreicht dieser Winkel einen Wert von 90° . Diagonal- und Querwellen fallen zu einer großen Querwelle, der Stauwelle, zusammen. Mit weiterer Erhöhung der Fortschrittsgeschwindigkeit treten keine Querwellen, sondern nur noch konvex gekrümmte Diagonalwellen auf (Abb. 6). Der Winkel zwischen der Bahn des Druckpunktes und der Tangente an die Diagonalwelle beträgt:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{Fn_h}\right) \quad (8)$$

Die gleichen Überlegungen gelten für ein Schiff als bewegtes System von Druckpunkten auf flachem Wasser. Bug- und Heckwellensystem bilden sich in den beiden Geschwindigkeitsbereichen analog aus und werden bei $Fn_h = 1$ zu zwei großen Querwellen. Es werden zwei Geschwindigkeitsbereiche unterschieden:

- | | |
|------------|---|
| $Fn_h < 1$ | - unterkritischer Geschwindigkeitsbereich und |
| $Fn_h > 1$ | - überkritischer Geschwindigkeitsbereich mit |
| $Fn_h = 1$ | - kritische Geschwindigkeit. |

Im überkritischen Geschwindigkeitsbereich nimmt die Breite des von den Diagonalwellen bedeckten Sektors mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit ab. Diese Tatsache und das Verschwinden der Querwellen führen zu einer Verringerung des Wellenwiderstandes im überkritischen Bereich. Der Wellenwiderstand kann in Abhängigkeit von Schiffsform, Fn_h und h/T unter den Wellenwiderstand bei Fahrt auf tiefem Wasser sinken.

Bei Fahrt auf flachem Wasser erhöht sich der Widerstand eines Schiffes im Vergleich zur Fahrt auf Tiefwasser erheblich. Eine Ursache dafür ist die bei abnehmender Wassertiefe auftretende Umwandlung des 3-dimensionalen Strömungszustandes in einen zunehmend 2-dimensionalen. Dadurch wird der druckmindernde Einfluß der Querkrümmung des Schiffes zunehmend aufgehoben. Es entstehen höhere Übergeschwindigkeiten, stärker ausgebildete Druckverteilungen mit einem kräftiger ausgeprägten Primärwellensystem, das ein entsprechendes Sekundärwellensystem erzeugt. Der Zähigkeitswiderstand erhöht sich ebenfalls. Eine zweite Ursache sind die beschriebenen Veränderungen des Tiefwasserwellenbilds.

Bei der Fahrt eines Schiffes auf flachem Wasser erfährt es nicht nur eine Erhöhung des Widerstandes, sondern auch eine Veränderung von Tiefgang und Trimm. Bei $F_{n_h} = 1$ erreicht der Trimm ein Maximum. Bedingt durch das Eintauchen völligerer Teile des Hecks vergrößern sich der Druck- und Ablösewiderstand. Bei geringen Wassertiefen $1,2 < h/T < 1,5$ kann durch die aus den Übergeschwindigkeiten resultierenden Unterdrücke am Schiffsboden das Ansaugen an den Grund des Fahrwassers erfolgen. Die Gefahr dazu besteht beim Passieren z. B. von Sandbänken.

3.2.2 Kanal

Die hydrodynamischen Effekte bei Fahrt eines Schiffes im allseits begrenzten Fahrwasser (Kanal) sind denen auf Flachwasser ähnlich. Es treten jedoch zusätzliche Besonderheiten auf. Für eine vereinfachte mathematische Behandlung des Kanalproblems werden folgende Annahmen getroffen:

1. Reibungsfreie Flüssigkeit,
2. Schiff besitzt über die gesamte Länge gleichen Querschnitt (Keine Einflüsse aus Zuspitzung des Rumpfes am Bug und Heck),
3. Schiff befindet sich in Ruhe und wird mit der Geschwindigkeit v_0 angeströmt,
4. Rechteckiger Kanalquerschnitt und
5. Kein Einfluß des Sekundärwellensystems.

Die Abbildung 8 zeigt die Verhältnisse für den Fall kleiner Geschwindigkeiten.

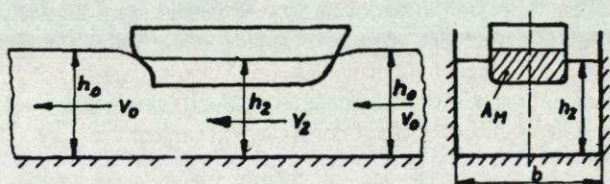


Abb. 8 Schiff im Kanal im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich

In der ungestörten Strömung unendlich weit vor dem Schiff ist der Strömungsquerschnitt $A_0 = h_0 \cdot b$ und die Geschwindigkeit v_0 . Nach der Kontinuitätsgleichung ist neben dem Schiff durch die Querschnittsverengung die sich einstellende Geschwindigkeit v_2 größer als v_0 . Gemäß der Bernoulli-Gleichung wird infolge des verringerten Drucks hier eine Spiegelabsenkung $h_0 -$

h_2 einstellen. Die Spiegelabsenkung und der eingetauchte Schiffsquerschnitt ergeben die Querschnittsverängung. Aus der Kontinuität folgt:

$$A_0 \cdot V_0 = A_2 \cdot V_2 \quad (9)$$

und

$$A_2 = A_0 - A_M - b(h_0 - h_2) \quad (10)$$

Mit dem Verängungsfaktor $k = A_M / A_0$ folgt:

$$h_0 \cdot V_0 = [h_0 \cdot (1 - k) - (h_0 - h_2)] \cdot V_2 \quad (11)$$

Die Spiegelabsenkung wird mit der Bernoulli-Gleichung bestimmt:

$$\rho / 2 \cdot V_0^2 + \rho \cdot g \cdot h_0 = \rho / 2 \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (12)$$

Wird $h_0 - h_2$ aus den letzten beiden Gleichungen eliminiert, so erhält man in dimensionsloser Form die Gleichung für das Kanalproblem:

$$Fn_{h_0} = \frac{V_0}{C} = \frac{V_2}{C} \left[1 - k - \frac{\left(\frac{V_2}{C}\right)^2 - \left(\frac{V_0}{C}\right)^2}{2} \right] \quad (13)$$

mit der Stauwellengeschwindigkeit $C = \sqrt{g \cdot h}$.

Die Abbildung 9 zeigt die Kanalgleichung in der Form $\frac{V_2}{C} = f(V_0, k)$ als grafische Darstellung. Die gestrichelten Kurven haben keine physikalische Bedeutung.

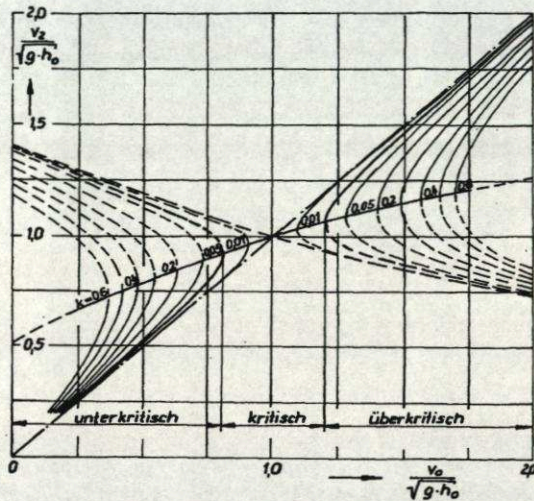


Abb. 9 Grundgleichung für das Kanalproblem

Es lassen sich eindeutig drei Geschwindigkeitsbereiche unterscheiden.

Im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich stellt sich neben dem Schiff eine Übergeschwindigkeit und eine entsprechende Spiegelabsenkung ein (siehe Abb. 8). Das Produkt aus Geschwindigkeit und verfügbarem Querschnitt nimmt immer Werte derart an, daß die Kontinuitäts- und die Bernoulli-Gleichung erfüllt werden. Mit Zunahme der Fahrtgeschwindigkeit tritt eine Vergrößerung der Wasserspiegelabsenkung auf. Dabei ist die Gefahr gegeben, daß größere Schiffe bei relativ hoher Geschwindigkeit den Kanalboden berühren.

Das zweite Gebiet reeller Lösungen ist der überkritische Geschwindigkeitsbereich. Hier liegt schießende Wasserbewegung vor. Der Wasserspiegel neben dem Schiff liegt höher als weit vor oder hinter ihm. Die sekundliche Wassermenge passiert den Bereich neben dem Schiff mit Untergeschwindigkeit bei erweitertem Querschnitt.

Zwischen beiden genannten Bereichen liegt der kritische Geschwindigkeitsbereich. In ihm werden die Kontinuitäts- und die Bernoulli-Gleichung nicht mehr erfüllt. Für diese Gebiet weist die Kanalgleichung keine reellen Lösungen auf. Es stellt sich kein stationärer Strömungszustand ein. Am Schiff herrscht ein Grenzzustand zwischen Strömen und Schießen. Ein Teil der Wassermenge passiert das Schiff, der Rest wird vor dem Schiff

aufgestaut (Abb. 10). Hinter dem Schiff tritt eine Niveauabsenkung mit einer ablaufenden negativen Stauwelle auf.

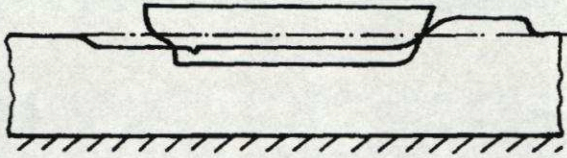


Abb. 10 Wasserspiegel im Kanal im kritischen Geschwindigkeitsbereich

Das Schiff erfährt in diesem Zustand einen stark hecklastigen Trimm. Die Stauwelle vor dem Schiff nimmt bei einer bestimmten Geschwindigkeit an Volumen zu und verschwindet beim Übergang zum überkritischen Bereich.

Gewerbliche Binnenschiffe fahren im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich. Aufgrund des starken Widerstandsanstieges, der Vermeidung von Grundberührungen und der Beschädigung des Kanalbettes durch den Rückstrom soll die Höchstgeschwindigkeit eines Verdrängungsfahrzeuges den Wert $v = 0,6 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}$ nicht überschreiten.

4. Berechnung der Schiffswellen

4.1 Reibungsfreie Strömung

Für die Berechnung des Wellensystems eines Schiffes wird vorausgesetzt, daß die Strömung inkompressibel, rotations- und reibungsfrei ist. Außerdem werden die Oberflächenspannung vernachlässigt und brechende Wellen ausgeschlossen.

Die folgende mathematische Beschreibung gilt für ein geradeaus fahrendes Schiff mit konstanter Geschwindigkeit U . Das Schiff befindet sich im dynamischen Gleichgewicht. Die dynamische Vertikalkraft und das trimmende Moment werden durch Änderung von Absenkung und Trimm ausgeglichen. Für die Formulierung der Gleichungen wird ein kartesisches Koordinatensystem (Abb. 11) verwendet.

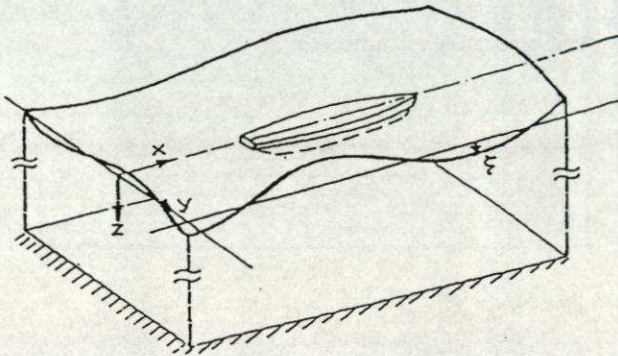


Abb. 11 Koordinatensystem

Das gesuchte Geschwindigkeitspotential muß die Laplace-Gleichung erfüllen:

$$\Delta\Phi = \Phi_{xx} + \Phi_{yy} + \Phi_{zz} = 0 \quad (14)$$

Weitere Bedingungen sind:

- Die Geschwindigkeitskomponente normal zur Schiffsoberfläche ist Null, d. h. Wasser dringt nicht durch die Schiffsoberfläche (Neumann Bedingung):

$$\vec{n} \cdot \nabla\Phi = 0 \quad (15)$$

\vec{n} Einheitsnormalenvektor auf der Schiffsoberfläche

- Die Flüssigkeit an der Wasseroberfläche strömt parallel zu ihr, so daß kein Wasser durch die Wasseroberfläche $z = \zeta$ dringt (Kinematische Bedingung):

$$\nabla\Phi \cdot \nabla\zeta = \Phi_z \quad (16)$$

- Der Druck an der Wasseroberfläche $z = \zeta$ ist gleich dem Luftdruck (Dynamische Bedingung):

$$\frac{1}{2}(\nabla\Phi)^2 - gz = \frac{1}{2}U^2 \quad (17)$$

Weitere Bedingungen die erfüllt sein müssen sind, daß die vom Schiff erzeugten Wellen nur hinter dem Schiff auftreten und daß die Störung der Strömung mit zunehmender Entfernung vom Schiff abnimmt.

4.1.1 Wellenwiderstand nach Michell

Eine analytische Lösung für das Wellenwiderstandsproblem wurde 1898 von Michell veröffentlicht. Er berechnete den Wellenwiderstand durch Druckintegration. Seiner Theorie liegen folgende Annahmen zugrunde:

- | | | |
|---|---|--|
| 1. Ideale Flüssigkeit, rotationsfrei | ⇒ | Potential existiert |
| 2. Kleine Wellenhöhen | | |
| 3. Dünnes Schiff: kleine Wasserlinienwinkel | ⇒ | Linearisierung der
Schiffsrandbedingung |
| 4. Rechteckiger Hauptspantquerschnitt | | |
| 5. Keine Tauchung und Trimm | | |

Die erreichte Lösung ist eine Quell- bzw. Senkenverteilung auf der Symmetrieebene, deren Stärke proportional zur Änderung der Querschnittsfläche in Längsrichtung ist.

Diese genannten Voraussetzungen sind für reale Schiffsförmungen nicht gegeben, was die erheblichen Unterschieden zwischen den Ergebnissen dieser Berechnungsmethode und Experimenten erklärt. Deshalb werden Panel-Methoden in der Praxis bevorzugt.

4.1.2 Panel-Methoden

Bei den Panel-Methoden werden die Außenhaut und die freie Wasseroberfläche mit Panel belegt. Jedes Panel verhält sich wie eine über die Panel-Fläche verteilte Quelle bzw. Senke. Deshalb wird ein Panel als Flächensingularität bezeichnet. Die Geschwindigkeit, die eine Quelle in einem Punkt erzeugt, ergibt sich aus der Quellstärke (dem Potential) geteilt durch den Abstand zwischen Quelle und dem betrachteten Punkt. Die Ableitung des Potentials in beliebiger Raumrichtung gibt die Geschwindigkeitskomponente in diese Richtung an. Die zu bestimmende Strömung entsteht durch die Überlagerung der Quell-Senke-Strömungen aller Panel mit der Anströmgeschwindigkeit.

An der Wasseroberfläche $z = \zeta$ werden die Neumann Bedingung und eine kombinierte Bedingung aus kinematischer und dynamischer Randbedingung

erfüllt. Durch diese Kombination wird zuerst die unbekannte Wellenerhebung aus den Gleichungen (16) und (17) eliminiert.

$$\frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi)^2 - g \Phi_z = 0 \quad (18)$$

Nach Lösung dieser Gleichung ist die Stärke der Singularitätenbelegung bekannt. Die Geschwindigkeiten lassen sich durch die Bernoulli-Gleichung bestimmen.

Die Erfüllung der kombinierten nichtlinearen Randbedingung an der unbekanntenen freien Wasseroberfläche ist numerisch aufwendig. Ob bzw. welche Vereinfachungen dieser Randbedingung (Linearisierung) genutzt werden, ist für die Qualität des Rechenverfahrens entscheidend. Klassischen Verfahren verwenden eine grobe Vereinfachung dieser Randbedingung wie folgt:

$$U^2 \cdot \Phi_{xx} - g \Phi_z = 0 \quad (19)$$

Diese Näherung ist heute bei Panel-Methoden für die Praxis nicht ausreichend. Dagegen erfüllen moderne Verfahren die korrekte nichtlineare Randbedingung iterativ (Bertram und Jensen (1987), Jensen (1988), Ni (1987)), in dem sie eine Taylor-Reihe verwenden, die nach dem linearen Glied abgebrochen wird. Die Randbedingung wird an der bekannten freien Wasseroberfläche aus der letzten Iteration linearisiert. Die erste Iteration startet von der glatten Wasseroberfläche aus. Konvergenz ist erreicht, wenn die berechneten Wellenhöhen und Quellverteilungen sich nicht mehr ändern.

Während für die Bestimmung der Kräfte und Momente die meisten Verfahren den Drucks über die Schiffsoberfläche integrieren, wird bei anderen Verfahren die Wellenenergie hinter dem Schiff an verschiedenen Schnitten quer zur Fahrtrichtung analysiert. Diese Vorgehensweise ist bei kleinen Froudezahlen, wo der Wellenwiderstand verschwindend klein ist, vorteilhaft. Jedoch ist die dafür erforderliche Netzgröße hinter dem Schiff bezüglich Rechenzeit und Rechnerkapazität nachteilig. Bei kleinen Froudezahlen liefert die Druckintegration über die Schiffsoberfläche einen höheren Wellenwiderstand.

Leider sind Abweichungen beim Wellenwiderstand bis zu 100 % keine Seltenheit. Der Grund dafür ist, daß der Wellenwiderstand aus der Differenz zwischen der Kraft auf das Vorschiff und der Kraft auf das Hinterschiff gebildet wird. Beide Kräfte sind ähnlich groß, während die Differenz Zehnerpotenzen kleiner ist. Von diesem Problem ist neben dem Wellenwiderstand auch der Trimm betroffen, der aus den Momenten der Kräfte auf Vor- und Hinterschiff berechnet wird. Die Absenkung des Schiffes wird dagegen gut wiedergegeben.

Flachwassereinfluß wird durch Spiegelung der Panel am Gewässerboden simuliert. Vertikale Kanalwände können ähnlich behandelt werden. Nichtsenkrechte Kanalwände werden wie die Schiffsaußenhaut berücksichtigt (Neumann-Bedingung). Auf Flachwasser ist die Bestimmung des trimmenden Moments, wegen der in der Natur vorherrschenden Reibungseinflüsse, die durch den potentialtheoretischen Ansatz nicht erfaßt werden, mit merklichen Abweichungen behaftet. Das kann dazu führen, daß bei extremem Flachwasser der Trimm mit entgegengesetztem Vorzeichen berechnet wird.

4.2 Reibungsbehaftete Strömung

Strömungen mit freier Wasseroberfläche zählen zu den schwierigsten Problemen der Strömungsmechanik. Die Bestimmung der Lage der freien Wasseroberfläche und die Erfüllung der dort geltenden Randbedingungen bei zwei- und dreidimensionalen viskosen Strömungen ist eine Herausforderung an numerische Berechnungsverfahren.

Die Wellenbildung bewirkt eine Änderung der Druckverteilung um das Schiff als auch eine Veränderung der Reibungswirkung. Letztere resultiert aus der Veränderung der Geschwindigkeitsprofile in der Wandgrenzschicht und aus der Änderung der benetzten Oberfläche des Schiffes. Deshalb muß eine gekoppelte Berechnung der Strömung unter Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche angestrebt werden. Die meisten Verfahren beruhen auf der Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode und deren numerischer Lösung.

Die Methoden zur Berechnung der viskosen Strömung mit freier Wasseroberfläche können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Nutzung eines im Raum fixierten Gitters bzw.
- Nutzung eines die freie Wasseroberfläche verfolgenden bewegten Gitters.

Bei den zuerst genannten Methoden wird die Wasseroberfläche nicht als eine scharfe Grenze zwischen Flüssigkeit und Gas betrachtet. Sie stellt einen aus mehreren Zellschichten bestehenden Bereich dar, der mit Flüssigkeit und mit Gas gefüllt ist. Diese Verfahren lassen sich auch auf brechende Wellen anwenden. Bei den zweiten Methoden wird eine scharfe Grenze zwischen Flüssigkeit und Gas angenommen, die mit der Grenze des Lösungsgebietes übereinstimmt. Die Formulierung der Randbedingungen an der freien Wasseroberfläche ist möglich, da Gitterlinien direkt an der Wasseroberfläche liegen. Schwierigkeiten bereitet die Kontrolle des Gitters im Inneren des

Berechnungsgebietes, weil die Gitterlinien nach jedem Iterationsschritt an die berechnete freie Wasseroberfläche angepaßt werden müssen. Brechende Wellen sind nicht erfaßbar, weil an diesen Stellen die Verformung des Gitters an der Wasseroberfläche zu numerischen Problemen führt.

In [6] werden ein Verfahren zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen und eine Methode zur Berechnung der Lage der freien Wasseroberfläche vorgestellt. Für die analytische Wigley-Schiffsform erfolgte die Berechnung der viskosen Strömung mit freier Wasseroberfläche.

4.3 Potentialtheoretische Berechnungen mit dem Programm Shipflow

In der SVA Potsdam wird das Programm **Shipflow** angewendet [4], [5]. Das implementierte Rechenverfahren erlaubt Panel höherer Ordnung. Dies sind gekrümmte Panel, in den meisten Fällen parabolisch gekrümmte. Die Panel höherer Ordnung ermöglichen, daß mit der gleichen Anzahl eine höhere Genauigkeit erreicht wird. Außerdem sind bilinear veränderliche Quellstärken möglich.

Das Rechenverfahren erfüllt die nichtlineare Randbedingung an der freien Wasseroberfläche iterativ. Nach jeder Iteration wird das Rechengitter an der berechneten freien Wasseroberfläche neu erzeugt und die Randbedingung dort linearisiert. Außerdem werden der Trimm und Tauchung des Schiffes neu bestimmt. Die Iterationen werden solange fortgesetzt, bis die Änderung der Verformung der freien Wasseroberfläche eine gegebene Schranke unterschreitet. Da die Schwimmlage des Modells von der Wellenbildung abhängig ist, muß sie nach jeder Iteration neu berechnet werden. Die neue Schwimmlage beeinflußt wiederum die Wellenbildung. Deshalb ist eine höhere Anzahl von Iterationen für den nichtlinearen Fall mit freier Schwimmlage erforderlich.

Durch die Integration der Druckverteilung an den Außenhaut des Schiffes unter Berücksichtigung der aktuellen Schwimmlage und der Wellenbildung können die am Schiffsrumpf wirkenden Kräfte und Momente bestimmt werden.

Das Verfahren berechnet die Schiffsumströmung nicht nur für Tief-, sondern auch für Flachwasser. Unter Anwendung der linearen Randbedingung an der freien Wasseroberfläche ist für den Fall Schiff in einem beliebig geformten unsymmetrischen Kanal die Berechnung der Geschwindigkeits- und Druckverteilung am Schiff und an den Kanalbegrenzungen möglich.

Möglichkeiten der potentialtheoretischen Berechnung von Umströmung mit freier Wasseroberfläche werden im folgenden an drei Beispielen gezeigt:

1. Containerschiff auf Tiefwasser und moderatem Flachwasser,
2. Containerschiff auf sehr flachem Wasser,
3. Binnenschiff im Kanal.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Schiffs- und Fahrwasserparameter.

Schiffstyp	Containerschiff	Containerschiff	Binnenschiff
Länge	195 m	195 m	78 m
Breite	32 m	32 m	9 m
Tiefgang	11.25 m	11.25 m	2.5 m
Geschwindigkeit	23 kn	12 kn	10 km/h
	$F_n = 0.27$	$F_n = 0.14$	$F_n = 0.10$
Fahrwasser	Tief- / Flachwasser	Flachwasser	Kanal
Wassertiefe	$\infty / 45$ m	15 m	5 m
H/T	$\infty / 4.0$	1.33	2.0
Abbildungen	12	13	14, 15

Tab. 1 Schiffs- und Fahrwasserparameter

Auf Abb. 12 sind die Höhenlinien der verformten Wasseroberfläche für ein mit Dienstgeschwindigkeit fahrendes Containerschiff dargestellt. Die Steuerbordseite zeigt das Wellenbild auf Tiefwasser, die Backbordseite das auf moderatem Flachwasser. Die Wassertiefe beträgt 45 Meter ($H/T = 4$), in dieser Größenordnung in Ost- und Nordsee häufig anzutreffen. Der Wellenberg am Bug und das Wellental von vorderer und hinterer Schulter sind durch den Flachwassereinfluß stärker ausgeprägt. Auf vielen Revieren besonders in den Randmeeren ist für Schiffe dieser Größenordnung schon Flachwassereinfluß vorhanden.

Ein gänzlich anderes Wellenbild erzeugt das gleiche Schiff, wenn es mit langsamer Geschwindigkeit auf extremem Fahrwasser läuft (Abb. 13). Dieser Fall tritt an Flußmündungen und Hafeneinfahrten auf. Wellensysteme von vorderer und hinterer Schulter sind nicht vorhanden. Es existiert lediglich das primäre Wellensystem, bedingt durch die Druckverteilung am Schiff.

Die Abb. 14 und 15 zeigen die Berechnungsergebnisse für ein typisches Binnenschiff in einem trapezförmigen symmetrischen Kanal. Der Kanal ist so eng, daß die Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff bis an das Ufer heranreicht (Abb. 14). Die Erfüllung der Neumann-Bedingung an Kanalboden

und -wand erlaubt auch die Berechnung der Druckverteilung an den Fahrwasserbegrenzungen (Abb. 15).

5. Zusammenfassung

Ein auf freier Wasseroberfläche fahrendes Schiff verursacht immer eine Verformung der Wasseroberfläche, ein Wellenbild. Während im ersten Teil des Vortrags auf die physikalischen Grundlagen der Wellenbildung durch ein Schiff eingegangen wurde, stand die Berechnung des Wellensystem im Mittelpunkt des zweiten Teils. Dabei wurde jeweils auf die Besonderheiten beschränkten Fahrwassers eingegangen. Drei Beispiele zeigen die Anwendung eines Berechnungsverfahrens auf das Wellensystem eines Schiffes.

6. Quellen

- [1] Schneekloth, H. Hydromechanik zum Schiffsentwurf: Vorlesungen, Herford : Koehler, 1988
- [2] Bertram, V. Numerische Schiffshydrodynamik in der Praxis, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 545, 1994
- [3] Söding, H., Absenkung und Vertrimmung von Schiffen durch Bertram, V., Fahrt in flachem Wasser, 1989, Jensen, G. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft
- [4] Janson, C.-E., Non-Linear Wave Pattern Calculation for the Kim, K.-J., Serie 60 $c_B = 0.6$ Hull, Larsson, L. CFD Workshop, Tokyo, 1994
- [5] Anwendung moderner Methoden zur Optimierung von Schiffen, 2. SVA-Forum, Juni 1995, SVA-Bericht Nr. 2141, 1995
- [6] Lilek, Z. Ein Berechnungsverfahren für dreidimensionale, viskose Strömungen mit freien Oberflächen, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 553, 1995

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. M. Abdel-Maksoud; Dipl.-Ing. K. Rieck
Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
Marquardtter Chaussee 100 · 14469 Potsdam

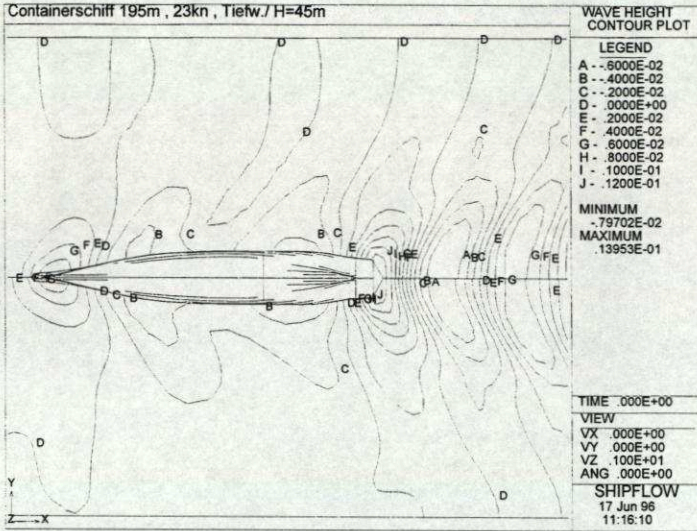


Abb. 12 Wellensystem eines Containerschiffes auf Tiefwasser und moderatem Flachwasser

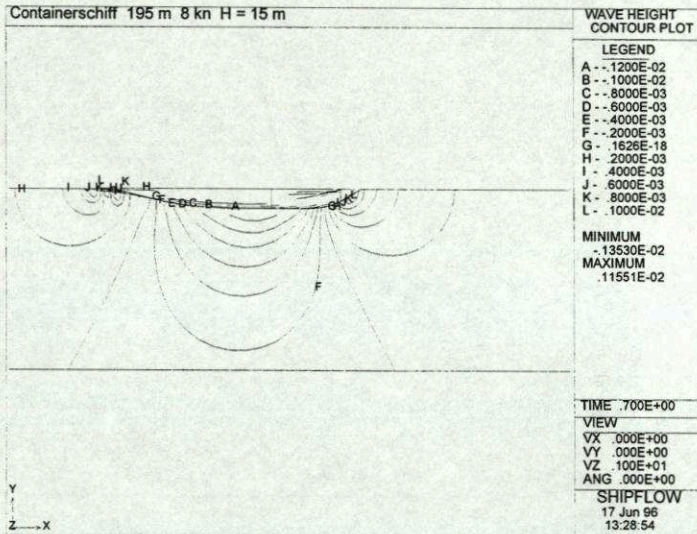


Abb. 13 Wellensystem eines Containerschiffes auf sehr flachem Wasser

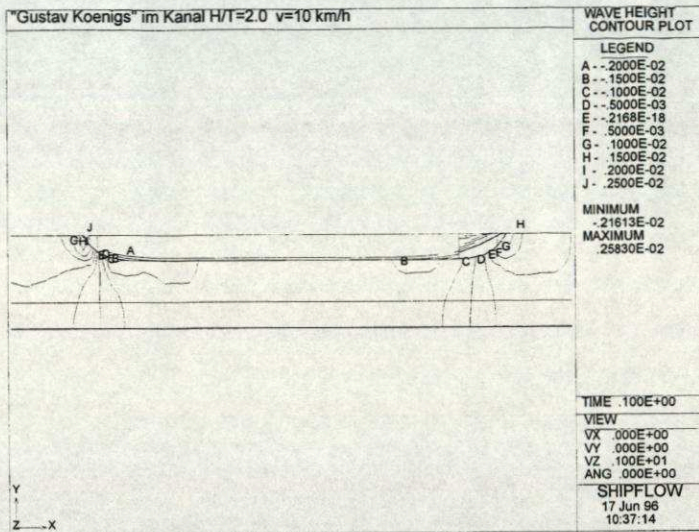


Abb. 14 Wellenbild eines Binnenschiffs im Trapezkanal

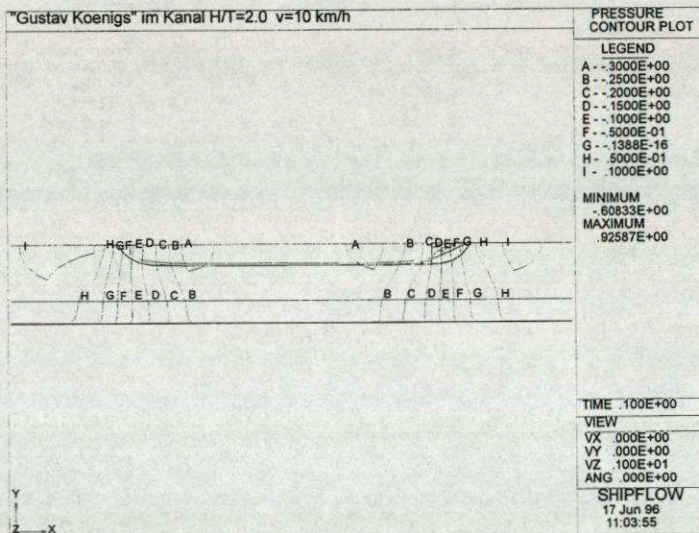


Abb. 15 Druckverteilung an Kanalboden und -seitenwand bei Fahrt eines Binnenschiffes