Ein Verfahren zur Ermittlung der optimalen Trimmlage eines Schiffes

Dipl.-Ing. *Hans-Reinhard Detlefs*, Potsdam, AdW, Zentralinstitut für solar-terrestrische Physik

Dipl.-Ing. *Friedrich Mewis*, VEB Kombinat Schiffbau, Schiffbau—Versuchsanstalt Potsdam

Ing. *Hans-Jürgen Röpcke*, VEB Kombinat Schiffbau, Schiffbau—Versuchsanstalt Potsdam

Einleitung

Im praktischen Betrieb von Frachtschiffen mit Bugwulst treten Beladungszustände auf, bei denen der Bugwulst oder der Heckbereich teilweise austaucht, wodurch sich die Widerstands- und Propulsionseigenschaften erheblich ändern können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein mathematisches Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe es möglich ist, aus Propulsionsversuchen mit Schiffsmodellen bei systematisch veränderten Trimmlagen und Verdrängungen für eine vorgegebene Schiffsgeschwindigkeit eine dem Brennstoffverbrauch optimale Trimmlage zu berechnen. Als Ergebnis werden

- Kapitänsunterlagen zur sofortigen Ermittlung einer optimalen Trimmlage in Diagrammform aufbereitet,
- die Ergebnisse für eine Nutzung beim Laderechner überprüft.

Der Nachweis der Eignung der mathematischen Methode wird an den Fahrzeugen „Meridian", OBC und Typ 271 erbracht.

Die Modellversuche wurden im Auftrag des Wissenschaftlich Technischen Zentrums des VEB Kombinat Seeverkehr und Hafenwirtschaft Rostock in der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam durchgeführt.

1. Physikalisches Modell

Unter „Trimmoptimierung" soll eine Methode verstanden werden, mit deren Hilfe es möglich ist, für ein naturgroßes Schiff oder dessen Modell bei einer gewünschten Fahrgeschwindigkeit und Wasserverdrängung bzw. mittlerem Tiefgang einen bezüglich der erforderlichen Wellenleistung günstigen Trimm zu berechnen.

Da der „optimale" Trimm durch Konstruktion und ladetechnische Beschränkungen sowie die charakteristischen Fahreigenschaften des Schiffes bei extremen Trimmlagen (z. B. Austauchen des Propellers bei Kopflastigkeit) nicht für jeden Fall erreichbar ist, ist grundsätzlich nur eine bezüglich der Leistung bzw. des Brennstoffverbrauches günstige Trimmlage erreichbar. In diesem Sinne ist der Begriff „optimal" eingeschränkt zu verstehen.

Die Methode soll im Ergebnis auch die Möglichkeit einer Verdrängungs- und Geschwindigkeitsänderung mit dem Ziel der Leistungsverminderung beinhalten. Dieser Variation sind gegenüber der Trimmvariation engere Grenzen gesetzt, da eine Verdrängungsänderung nur durch Ballastaufnahme und eine Geschwindigkeitsänderung nur im Rahmen der Charakteristik der Antriebsmaschine und ökonomischen Bedingungen möglich ist.

Ausgangsgrößen für die Berechnungsmethode sind die in systematisch durchgeführten Propulsionsversuchen mit Schiffsmodellen gewonnenen Wellenleistungen P_D für die Großausführung. Nach einem vorgegebenen Schema sind die Parameter

- Geschwindigkeit,
- Verdrängung bzw. Tiefgang und
- Trimm

zu variieren.

Bekanntlich ist die Leistungsvorhersage aus Modellversuchen von dem verwendeten Umrechnungsverfahren des Modells auf die Großausführung, von den Reibungsbeiwerten, Formfaktoren, Zuschlägen für Rauhigkeit, Wind, Seegang und Manövrieren sowie von der Abweichung der Geometrie des Modellpropellers von der der Großausführung, die sich u. a. in unterschiedlichen Wirkungsgraden ausdrückt, abhängig. Weitere Korrelationseinflüsse sind die bei Modell und Großausführung unterschiedlichen Propellercharakteristiken auch bei geometrischer Ähnlichkeit.

Aus den genannten Gründen sind die absoluten Leistungsangaben P_D für die Großausführung mehr oder weniger fehlerbehaftet. Im Rahmen der Aufgabenstellung einer Trimmoptimierung sind jedoch nur die Leistungsänderungen bzw. Brennstoffeinsparung in Abhängigkeit von den oben genannten Parametern entscheidend. Damit ist der Fehler der aus der Vorhersage ermittelten Leistungsänderung von 2. Ordnung.

Beispiel:

Bei $P_D = 10000$ kW sei der Fehler $\pm$ 500 kW (5%). Die Leistungseinsparung beträgt 500 kW (5%), so daß bei Trimmoptimierung eine Wellenleistung von $P_D = 9500$ kW erreichbar ist. Der Fehler der Leistungseinsparung beträgt dann nur 25 kW (0,25% der Gesamtleistung).

Für den praktischen Gebrauch ist die Brennstoffeinsparung in [t/d] aussagekräftiger und besser kontrollierbar als die Leistungseinsparung. Ausgangswert für die Umrechnung der Wellenleistung auf den Brennstoffverbrauch ist der spezifische Brennstoffverbrauch in [g/kWh]. Obgleich hierin eine weitere Ungenauigkeit für den absoluten tatsächlichen Brennstoffverbrauch liegt, ist wiederum der Fehler bei der Berechnung der Brennstoffeinsparung von 2. Ordnung.

Die Berechnungsmethode soll für beide funktionalen Abhängigkeiten angewendet werden.

Für das physikalische Modell ergibt sich folgender allgemeiner Ansatz

$$U = f(V, T_m, \Delta T) \qquad (1)$$

Bemerkungen zu den unabhängigen Parametern in (1):

Die Grenzen für die Parameter sind für die Modellversuche derart festzulegen, daß

- Tendenzen eindeutig meßbar sind, auch wenn extreme Parameterwerte in der Praxis nicht realisierbar sind,
- genügend viele, geeignet angeordnete Meßpunkte für eine mathematische Funktion zur Verfügung stehen, ohne die Notwendigkeit einer ingenieurtypischen Manipulation,
- die Anordnung der unabhängigen Parameter dem mathematischen Verfahren genügt.

Wenn die Geschwindigkeitsabstufung $\leqq 0{,}5$ kn beträgt, kann diese unabhängige Variable als jeweils konstanter Parameter betrachtet werden.

Im Modellversuch wird im allgemeinen für jeweils eine konstante Verdrängung die Trimmlage variiert. Damit gelten die ermittelten Wellenleistungen genau genommen nur für die untersuchte Verdrängung, während der tatsächliche mittlere Tiefgang in Abhängigkeit von der Vertrimmung nicht konstant ist. Zum Beispiel führt hecklastige Vertrimmung in Abhängigkeit von dem Spantausfall an den Schiffsenden zur Austauchung. Beim „Meridian" beträgt die Austauchung z. B. bei 4,5 m Hecklastigkeit maximal ca. 0,16 m.

Da jedoch nur die Leistungsänderungen betrachtet werden sollen, ist auch dieser Fehler von untergeordneter Bedeu-

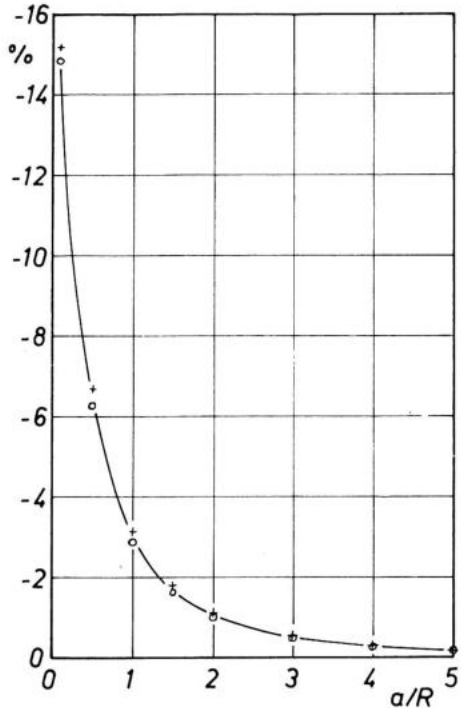

Bild 9. Die durch die Idealisierung bedingten Fehler der Korrekturfaktoren für Zug (○, Tafel 3, $\varphi = 90°$) und Schub (+, Tafel 4, $\varphi = 45°$) bezogen auf die Werte von *Hsu* [6]

von der Genauigkeit der numerischen Integration, andererseits aber auch von systematischen Fehlern ab, die durch die Art der Idealisierung bedingt sind.

Die Genauigkeit der Integrationsmethode läßt sich veranschaulichen, indem das Verfahren bei Berücksichtigung der Unterteilung in 5 Teilbereiche auf die Integrale nach Gl. (29) und nach Gl. (30) angewendet wird. Wird zur Vereinfachung $a = 1$ angenommen, so müssen sich als theoretische Resultate π und $\pi/2$ ergeben. Die numerisch ermittelten Integralwerte sind für das Integral nach Gl. (29) 3,141 553 870, für das Integral nach Gl. (30) 1,570 753 891. Bei diesen Beispielen treten Differenzen zur exakten Lösung erst in der 5. Stelle nach dem Komma auf. Auch wenn die Integrationsgrenzen weiter auseinander liegen als bei diesen beiden Beispielen, dürfte die Genauigkeit der numerischen Integration für die praktischen Belange vollkommen ausreichen.

4.2. Vergleich der Spannungsintensitätsfaktoren bei Zug und Schub mit der Lösung von Hsu [6]

Um die Genauigkeit der Näherungslösung in Hinsicht auf die systematischen Fehler, die durch die Vernachlässigung der Wechselwirkung zwischen Riß und Bohrung bedingt sind, einschätzen zu können, werden die gewonnenen Resultate den Berechnungsergebnissen von *Hsu* [6] gegenübergestellt. Der Vergleich wird auf die Fälle der Zugbeanspruchung bei einer Rißneigung von $\varphi = \pi/2$ und der Schubbeanspruchung bei einer Rißneigung von $\varphi = \pi/4$ beschränkt, da in diesen Fällen die größten Beanspruchungen auftreten. Den Vergleich auch noch bei anderen Rißneigungen durchführen zu wollen, ist nicht zweckmäßig, da mit abnehmender Größe des Spannungsintensitätsfaktors der relative Fehler so zunehmen kann, so daß die vergleichende Gegenüberstellung ihren Sinn verliert.

Bild 9 zeigt, daß — wie erwartet — die Fehler mit abnehmender Anrißlänge zunehmen. Die relativen Fehler für die beiden betrachteten Beispiele lassen sich durch einen gemeinsamen Kurvenzug annähern, der zweifellos auch auf den Fall der Biegebeanspruchung — zumindest bei Rißlagen mit $\varphi = \pi/2$ — angewendet werden kann. Zu erwarten sind dementsprechend Fehler von -3% bei $a/R = 1$, von -1% bei $a/R = 2$ und von $-0{,}5\%$ bei $a/R = 3$.

5. Zusammenfassung

Die Spannungsintensitätsfaktoren K_I und K_{II} für Anrisse an Bohrungen in der unendlich großen Scheibe bei Zug-, Schub- und Biegebeanspruchung lassen sich relativ einfach aus den Spannungen berechnen, die in der anrißfreien Scheibe auftreten. Diese Näherungswerte für die Rißspitzenbeanspruchung sind geringer als die exakten Werte, da die Wechselwirkung zwischen der Bohrung und dem Riß nicht berücksichtigt wird. Mit Hilfe bekannter Beanspruchungsfälle läßt sich die Größe der auftretenden Fehler angeben. Bei großer Rißlänge ergeben sich die Spannungsintensitätsfaktoren für schräg zur Beanspruchungsrichtung liegende, gerade Anrisse.

6. Literatur

[1] *Bowie, O. L.:* Analysis of an infinite plate containing radial cracks originating from the boundary of an internal circular hole. Journal of Mathematics and Physics **35** (1956), S. 60—71

[2] *Berezhnitskii, L. T.:* Propagation of cracks terminating at the edge of a curvilinear hole in a plate. Soviet Materials Science **2** (1966), S. 16—23

[3] *Newman, J. C.:* An improved method of collocation for the stress analysis of cracked plates with various shaped boundaries. NASA Technical Note, NASA TN D-6376, Aug. 1971

[4] *Hall, L. R., Shah, R. C., Engstrom, W. L.:* Fracture and fatigue crack growth behavior of surface flaws and flaws originating at fastener holes. Wright Patterson Air Force Base, Ohio, AFFDL-TR-74-47 (1974)

[5] *Shah, R. C.:* Stress intensity factors for through and partthrough cracks originating at fastener holes. American Society for Testing and Materials, Spec. Techn. Publ. No. 590 (1976) S. 429 ff.

[6] *Hsu, Y. C.:* The infinite sheet with two radial cracks from cylindrical hole under inclined tension or in-plane shear. International Journal of Fracture **13** (1977) 6, S. 839—845

[7] *Kirsch, G.:* Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf **42** (1898), S. 797 ff.

[8] *Vocke, W.:* Lineare Elastizität. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1966.

[9] *Tada, H., Paris, P. C., Irwin, G. R.:* The stress analysis of cracks. Handbook. Del Research Corporation, Hellertown (Pennsylvania, USA), 1973

[10] *Geiger, H., Scheel, K.* (Herausgeber): Handbuch der Physik. Bd. III (Mathematische Hilfsmittel in der Physik). Berlin: Springer 1928.

[11] *Gröbner, W., Hofreiter, N.:* Integraltafel. T. 2. Wien, New York: Springer-Verlag 1966.

tung, wenn näherungsweise die Verdrängung durch einen mittleren Tiefgang entsprechend der gleichlastigen Trimmlage ersetzt wird.

2. Lösungsweg

Es wurden 2 verschiedene mathematische Ansätze zur Ermittlung einer Interpolationsfunktion untersucht.

2.1. Regressionsanalyse

Mit Hilfe der mehrfachen Regression wird eine Funktion

$$U = a_0 + \sum_{i=1}^{n} [a_i \cdot f_i (x_1, x_2, \cdots, x_m)] \qquad (2)$$

bestimmt.

Die Funktionen f_i können Glieder von Polynomen oder beliebigen anderen linear-unabhängigen Funktionen sein. Diese Methode ist an den speziellen Funktionscharakter gut anpaßbar, sie hat den Vorteil, daß die diskreten vorgegebenen Funktionswerte geglättet werden.

Nachteilig ist, daß die Funktionen f_i für jeden Funktionsverlauf so zu definieren sind, daß dieser optimal approximiert wird. Da beim vorliegenden Problem der Funktionsverlauf sehr unterschiedlich sein kann — z. B. durch Wulsteinfluß, Heckaustauchung — sind die Funktionen f_i sehr unterschiedlich definiert. Damit wäre für eine Aufbereitung des Verfahrens für einen Ladeprozessor außer den Koeffizienten der Funktion auch die Funktion (2) selbst für jeden Schiffstyp neu zu definieren. Um letzteres zu vermeiden, ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Beschränkung auf ein System orthogonaler Polynome, verknüpft mit der Regression, am Beispiel des OBC untersucht worden. Die entstandenen Abweichungen zwischen den vorgegebenen Leistungen und den approximierten lagen aber nicht im zulässigen Toleranzbereich. Für den praktischen Fall erwies sich die vereinfachte, allgemeine Regressionsfunktion als ungeeignet.

2.2. Zweidimensionale Spline-Interpolation

Die Spline-Funktion zeichnet sich durch minimale Gesamtkrümmung, damit durch geringe Welligkeit und hohe Glätte aus.

Im zweidimensionalen Fall wird eine möglichst glatte Interpolationsfläche über dem Rechteckgitter

$$y_1 < y_2 < \cdots < y_m, \; x_1 < x_2 \cdots < x_n$$

gesucht.

Für jedes Flächenelement $R_{j,i}$ in den Grenzen

$$y[j] \leqq y \leqq y[j+1], \; x[i] \leqq x \leqq x[i+1]$$

gilt die Funktion

$$f[j,i](y,x) = \sum_{l,k=1}^{4} a[j,i,l,k] \cdot p[l](y) \cdot p[k](x),$$

$$j = 1(1)m - 1, \; i = 1(1)n - 1 \qquad (3)$$

mit

$$p[1](z) = 1, \; p[2](z) = z - z[q],$$
$$p[3](z) = (z - z[q])^2, \; p[4](z) = (z - z[q])^3$$

Die Gesamtfunktion

$$U = u(y,x)$$

wird mit folgenden Bedingungen bestimmt:

- die Koeffizienten a [j, i, l, k] werden so berechnet, daß u (y[j], x[i]) = u[j,i]
- und u im gesamten Bereich zweimal stetig differenzierbar ist.

Für eine eindeutige Lösung werden außer den Funktionswerten in den Gitterpunkten die partiellen Ableitungen u_x und u_y auf dem Rand und die gemischten Ableitungen u_{xy} in den Eckpunkten nach folgendem Schema benötigt:

		x_1	x_2	$\cdots$	x_n	
	$u_{xy}[1,1]$	$u_y[1,1]$	$u_y[1,2]$	$\cdots$	$u_y[1,n]$	$u_{xy}[1,n]$
y_1	$u_x[1,1]$	$u[1,1]$	$u[1,2]$	$\cdots$	$u[1,n]$	$u_x[1,n]$
y_2	$u_x[2,1]$	$u[2,1]$	$u[2,2]$	$\cdots$	$u[2,n]$	$u_x[2,n]$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdots$	$\cdot$	$\cdot$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdots$	$\cdot$	$\cdot$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdots$	$\cdot$	$\cdot$
y_m	$u_x[m,1]$	$u[m,1]$	$u[m,2]$	$\cdots$	$u[m,n]$	$u_x[m,n]$
	$u_{xy}[m,1]$	$u_y[m,1]$	$u_y[m,2]$	$\cdots$	$u_y[m,n]$	$u_{xy}[m,n]$

Für den charakteristischen Funktionsverlauf im Rahmen der Aufgabenstellung genügt es nicht, anstelle der Ableitungen auf dem Rand die Differenzenquotienten zu verwenden, bzw. für den Krümmungszusammenhang in x- und y-Richtung an den Ecken $u_{xy} = 0$ zu setzen.

Das nachfolgend beschriebene Verfahren für die Abschätzung der Randbedingungen wurde anhand der Meßergebnisse mit dem Fahrzeug „Meridian" auf Eignung überprüft:

- Die partiellen Ableitungen u_x, u_y auf dem Rand werden aus quadratischen Parabeln, die aus 3 Punkten berechnet werden, ermittelt.
- Die Ableitungen u_{xy} an den Eckpunkten werden mittels folgender Annahme abgeschätzt:
  . die partiellen Ableitungen ändern sich an den Eckpunkten linear,
  . u_{xy} werden aus Mittelwerten von u_x und u_y berechnet.
  Damit ergibt sich die Näherung im Punkt (1,1) zu

$$u_{xy}[1,1] = \left(\frac{u_y[1,2] - u_y[1,1]}{x[2] - x[1]} + \frac{u_x[2,1] - u_x[1,1]}{y[2] - y[1]} \right) / 2 \qquad (4)$$

  Entsprechend werden $u_{xy}[1,n]$, $u_{xy}[m,1]$, $u_{xy}[m,n]$ berechnet.

Im Gegensatz zur Regressionsanalyse werden bei der Spline-Interpolationsfunktion die Eingabedaten nicht geglättet. Hierdurch ist es notwendig, vor einer Funktionsberechnung die Leistungen manuell zu straken, damit unreale Funktionsverläufe vermieden werden. Dieser ingenieurmäßige Eingriff ermöglicht eine frühzeitige Erkennung von Tendenzen und eventuellen Meßfehlern und damit deren Korrektur.

3. Prüfung der Berechnungsmethode

3.1. Test des Verfahrens

Die Richtigkeit des Verfahrens zur Berechnung der Interpolationsfunktion und der Randbedingungen wurde anhand der Funktion $u = x^2 + y^2$ mit nachfolgenden Werten entsprechend dem o. g. Schema geprüft:

$n = 4$
$m = 3$

		$x_1 = -1$	$x_2 = 0$	$x_3 = 2$	
	$u_{xy} = 0$	$u_{y_{1,1}} = -4$	$u_{y_{2,1}} = -4$	$u_{y_{3,1}} = -4$	$u_{xy} = 0$
$y_1 = -2$	$u_{x_{1,1}} = -2$	5	4	8	$u_{x_{3,1}} = 4$
$y_2 = 0$	$u_{x_{1,2}} = -2$	1	0	4	$u_{x_{3,2}} = 4$
$y_3 = 1$	$u_{x_{1,3}} = -2$	2	1	5	$u_{x_{3,3}} = 4$
$y_4 = 5$	$u_{x_{1,4}} = -2$	26	25	29	$u_{x_{3,4}} = 4$
	$u_{xy} = 0$	$u_{y_{1,m}} = 10$	$u_{y_{2,m}} = 10$	$u_{y_{3,m}} = 10$	$u_{xy} = 0$

Für diese Funktion stimmen die interpolierten Werte mit den exakten genau überein. Auch die abgeschätzten Werte für u_{xy} sind gleich den exakten.

Die Koeffizienten der $(n-1)\cdot(m-1) = 6$ zweidimensionalen, interpolierenden Splinefunktion nehmen für dieses Beispiel genau folgende Werte an:

a [1, 1, 1, 1] = 5
a [1, 1, 1, 2] = −4
a [1, 1, 1, 3] = 1
a [1, 1, 2, 1] = −2
a [1, 1, 3, 1] = 1
a [1, 2, 1, 1] = 4
a [1, 2, 1, 2] = −4
a [1, 2, 1, 3] = 1
a [1, 2, 3, 1] = 1
a [1, 3, 1, 1] = 1
a [1, 3, 1, 3] = 1
a [1, 3, 2, 1] = −2
a [1, 3, 3, 1] = 1
a [2, 1, 1, 3] = 1
a [2, 1, 3, 1] = 1
a [2, 2, 1, 1] = 2
a [2, 2, 1, 2] = 2
a [2, 2, 1, 3] = 1
a [2, 2, 2, 1] = −2
a [2, 2, 3, 1] = 1
a [2, 3, 1, 1] = 1
a [2, 3, 1, 2] = 2
a [2, 3, 1, 3] = 1
a [2, 3, 3, 1] = 1

Alle übrigen Koeffizienten der Matrix a [j, i, l, k] sind Null.

Bei diesem analytischen Testbeispiel werden auch für die näherungsweise Berechnung der partiellen Ableitungen u_x, u_y, u_{xy} auf dem Rand exakte Werte berechnet. Um jedoch die Eignung dieser Ansätze für den charakteristischen Funktionsverlauf der Leistungsfunktion des Schiffes zu untersuchen, wurden die Meß- und Berechnungsergebnisse mit dem „Meridian" benutzt. Um einen Fehlereinfluß der Randbedingungen abschätzen zu können, wurden Rechnungen mit im Randbereich veränderten Stützstellenabständen durchgeführt. Damit veränderte sich die Ableitung auf dem Rand. Die Größenordnung der entstandenen Differenzen der Ableitungen war bei den untersuchten Fällen vernachlässigbar klein, so daß in beiden Rechnungen auch annähernd die gleichen Funktionswerte P_D im mittleren Diagrammbereich berechnet wurden.

Für die Ableitungen u_{xy} in den Eckpunkten ergaben sich folgende Zahlenwerte:

u_{xy}	Variante 0	Variante 1	max. Leistungsdifferenz	
	$n = 5$ $m = 5$	$n = 7$ $m = 5$	ΔP_D [kW]	[%]
u_{11}	0,164	0,162	10	0,20
u_{1n}	−0,055	−0,086	22	0,42
u_{m1}	0,089	0,110	14	0,21
u_{mn}	−0,093	−0,087	2	0,03

Damit liegen auch die Differenzen der Leistungswerte in den Eckbereichen unterhalb 0,5%.

Es kann abgeschätzt werden, daß das Verfahren zur Berechnung der Randbedingungen der Toleranzforderung (Fehler < 0,5%) bei Beachtung der mindest erforderlichen Stützstellenverteilung genügt.

3.2. Ermittlung des Versuchsumfanges

Um die Kosten für die Erstellung der Ausgangsdaten, d. h., um den Umfang der erforderlichen Propulsionsversuche möglichst gering zu halten, wurde zwecks Minimierung des Versuchsumfanges die Anzahl der Stützstellen (Standard: $n = 5$, $m = 5$) variiert. Der Einfluß einer Erweiterung auf ($n = 5$, $m = 7$) auf die berechneten P_D-Werte ist in 3.1 diskutiert und zeigt, daß eine Vergrößerung des Versuchsumfanges vom Standard bei dem untersuchten Beispiel nicht erforderlich ist.

Eine Verringerung auf jeweils 4 bzw. 3 Stützstellen für Trimm bzw. Verdrängung ist nur möglich, wenn keine besonderen Einflüsse wie z. B. Wulsteinfluß oder Ein- bzw. Austauchen des Hecks zu erwarten sind, und außerdem nur ein kleiner Trimmbereich und Verdrängungsbereich untersucht werden soll.

Da in der Auswertmethode die Schiffsgeschwindigkeit als konstanter Parameter behandelt wird, ist der zu untersuchende Geschwindigkeitsbereich ohne Einfluß auf das Verfahren. Es muß jedoch gewährleistet werden, daß

1. der gesamte Geschwindigkeitsbereich, in dem das Schiff auch unter Überlastbedingungen fährt, überdeckt wird und
2. ein Straken der einzelnen Meßwerte des Propulsionsversuches möglich ist.

Diese Bedingungen erfordern, daß alle Propulsionsversuche eines Modells denselben Geschwindigkeitsbereich überdecken, auch, wenn unreale Überlastbedingungen untersucht werden.

4. Adaption der Methode für die konkrete Aufgabenstellung

4.1. Vorschrift für das Modellversuchsprogramm

Für die Trimmoptimierungsrechnungen eines Schiffes werden nur die Propulsionsversuchsergebnisse des Modells benötigt. Es ist nicht erforderlich, zusätzliche Widerstandsversuche und Propellerfreifahrtsversuche durchzuführen, wenn die Propellerfreifahrtcharakteristik des Modellpropellers etwa der der Großausführung entspricht. Sämtliche Propulsionsversuche sind mit derselben Reibungskorrelationslinie und denselben Rauhigkeitszuschlägen ΔC_F und Formfaktoren auf die Großausführung umzurechnen.

Zu untersuchende Bereiche:

- Geschwindigkeit: In Abhängigkeit vom Schiffstyp ca. 70% bis ca. 105% der Nenngeschwindigkeit für mindestens 5 Geschwindigkeiten.
- Verdrängung: Von Ballastverdrängung bis voll beladen bei 4 verschiedenen Verdrängungen etwa gleicher Verdrängungsdifferenz.
- Trimm: Von extrem hecklastig bis extrem kopflastig bei 5 verschiedenen Trimmlagen, annähernd gleich verteilt. Hierbei ist es zweckmäßig, die 2. und 4. Trimmlage etwas dichter an die 1. bzw. 5. Trimmlage zu legen, um den möglichen Fehler durch den freien Randeinfluß zu reduzieren (z. B. −3 m, −2 m, −0,5 m, 1 m, 2 m).

Um das Berechnungsverfahren anwenden zu können, ist zu beachten, daß auch Trimmlagen untersucht werden müssen, die im realen Fahrzustand nicht erreicht werden.

WELLENLEISTUNG 1.00×PD [KW] = F(VERDR.,TRIMM)
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT V[KN]=18.0

T_M [M]

6800 6600

VERDR.																									
20000	X	6850	6811	6774	6739	5705	6674	6645	6618	6592	6569	6546	6524	6502	6480	6458	6438	6421	6408	6399	6395	6397	6403	6414
19800	X	6850	6808	6767	6727	6690	6654	6620	6589	6560	6532	6507	6483	6460	6437	6417	6400	6386	6376	6372	6374	6382	6393	6408
19600	X	6848	6802	6756	6711	6667	6626	6587	6550	6515	6483	6454	6427	6402	6380	6362	6347	6337	6333	6335	6344	6359	6377	6397
19400	X	6845	6793	6743	6693	6645	6598	6554	6512	6473	6436	6403	6374	6348	6326	6309	6297	6291	6291	6299	6313	6334	6358	6384
19200	X	6839	6784	6729	6675	6622	6571	6523	6476	6432	6392	6356	6324	6296	6274	6258	6249	6246	6250	6262	6281	6307	6336	6366
19000	X	6832	6772	6713	6656	6599	6545	6492	6442	6394	6350	6311	6276	6248	6226	6211	6203	6203	6210	6225	6248	6277	6310	6344
18800	X	6822	6759	6697	6636	6577	6519	6464	6410	6359	6311	6269	6233	6203	6181	6166	6160	6161	6171	6188	6213	6244	6280	6318
18600	X	6810	6744	6679	6616	6555	6495	6436	6380	6326	6276	6231	6192	6161	6139	6125	6119	6122	6132	6151	6177	6209	6245	6285
18400	X	6797	6728	6661	6596	6533	6471	6411	6352	6295	6243	6196	6155	6123	6100	6086	6080	6083	6094	6112	6138	6169	6206	6247
18200	X	6781	6711	6642	6576	6512	6449	6387	6326	6268	6213	6164	6122	6088	6064	6050	6044	6046	6056	6073	6097	6127	6162	6201
18000	X	6764	6692	6623	6556	6491	6428	6365	6303	6243	6187	6136	6093	6058	6032	6017	6010	6011	6019	6033	6054	6080	6112	6149
17800	X	6744	6673	6604	6537	6472	6408	6345	6282	6222	6164	6113	6067	6031	6004	5987	5978	5976	5981	5992	6008	6029	6056	6088
17600	X	6723	6652	6584	6518	6453	6390	6327	6264	6203	6146	6093	6047	6008	5980	5960	5948	5943	5944	5949	5959	5974	5993	6019
17400	X	6700	6630	6564	6499	6436	6373	6311	6249	6188	6131	6077	6030	5990	5959	5936	5920	5911	5906	5906	5908	5914	5925	5942
17200	X	6675	6608	6543	6480	6419	6358	6297	6236	6176	6118	6065	6016	5975	5941	5915	5895	5880	5869	5861	5855	5852	5853	5859
17000	X	6647	6583	6522	6461	6402	6343	6284	6225	6166	6109	6055	6006	5963	5927	5897	5872	5851	5833	5816	5801	5788	5778	5771
16800	X	6618	6558	6499	6442	6386	6329	6272	6214	6157	6101	6048	5998	5953	5914	5880	5850	5823	5797	5773	5748	5724	5702	5682
16600	X	6587	6531	6476	6422	6368	6315	6260	6205	6149	6095	6042	5992	5946	5904	5866	5831	5797	5764	5730	5696	5661	5626	5593
16400	X	6553	6502	6451	6401	6351	6300	6248	6195	6142	6089	6037	5987	5940	5895	5853	5813	5773	5732	5690	5645	5599	5553	5507
16200	X	6517	6471	6425	6378	6331	6284	6235	6185	6134	6083	6033	5983	5934	5888	5842	5797	5750	5702	5652	5598	5542	5483	5424
16000	X	6479	6438	6396	6354	6311	6267	6221	6174	6126	6077	6028	5979	5930	5881	5832	5782	5730	5676	5617	5555	5489	5420	5348
15800	X	6438	6403	6366	6328	6289	6248	6205	6162	6116	6070	6022	5974	5925	5875	5823	5769	5712	5652	5587	5517	5442	5363	5280
15600	X	6396	6365	6333	6299	6264	6227	6188	6147	6105	6061	6016	5968	5919	5868	5815	5758	5697	5632	5561	5485	5403	5315	5223
15400	X	6351	6325	6298	6268	6237	6203	6168	6131	6092	6051	6007	5961	5913	5861	5806	5748	5684	5615	5540	5459	5371	5277	5177
15200	X	6303	6283	6260	6235	6207	6178	6146	6112	6076	6038	5997	5953	5905	5854	5799	5738	5673	5601	5523	5438	5346	5247	5142
15000	X	6254	6239	6221	6200	6176	6150	6122	6091	6059	6023	5985	5942	5896	5846	5791	5730	5664	5590	5510	5423	5328	5225	5116
14800	X	6203	6193	6179	6162	6142	6120	6095	6068	6039	6006	5970	5931	5886	5837	5783	5722	5655	5582	5500	5412	5315	5210	5098
14600	X	6151	6145	6136	6123	6107	6088	6067	6044	6017	5988	5955	5917	5875	5827	5774	5714	5648	5574	5493	5404	5306	5200	5086
14400	X	6098	6096	6091	6082	6070	6055	6037	6017	5994	5967	5937	5902	5862	5816	5764	5706	5641	5568	5487	5398	5301	5195	5081
14200	X	6043	6046	6045	6040	6031	6020	6005	5988	5969	5945	5918	5885	5848	5804	5754	5697	5633	5562	5483	5395	5298	5193	5080
14000	X	5988	5995	5997	5996	5991	5983	5972	5958	5941	5921	5896	5867	5832	5790	5743	5688	5626	5556	5478	5392	5298	5194	5082
13800	X	5933	5943	5949	5951	5949	5945	5937	5926	5913	5895	5873	5846	5814	5775	5730	5677	5617	5550	5474	5390	5298	5197	5087
13600	X	5877	5890	5900	5905	5907	5905	5900	5893	5882	5868	5848	5824	5794	5758	5715	5665	5608	5543	5469	5388	5298	5199	5092
13400	X	5821	5837	5850	5858	5863	5864	5863	5858	5850	5838	5822	5800	5773	5739	5699	5651	5596	5534	5463	5384	5297	5201	5097
13200	X	5765	5784	5799	5811	5818	5822	5824	5822	5816	5807	5793	5774	5749	5718	5680	5635	5583	5523	5455	5379	5294	5201	5100
13000	X	5710	5731	5749	5763	5773	5780	5783	5784	5781	5775	5763	5746	5724	5695	5660	5617	5567	5510	5444	5371	5289	5199	5101
12800	X	5655	5678	5698	5714	5727	5736	5742	5745	5745	5740	5731	5717	5696	5670	5636	5596	5548	5493	5430	5359	5280	5193	5098
12600	X	5601	5626	5648	5666	5680	5692	5700	5705	5707	5704	5697	5685	5667	5642	5610	5572	5526	5473	5412	5343	5267	5182	5091
12400	X	5548	5574	5597	5617	5633	5647	5657	5664	5668	5667	5662	5651	5634	5611	5582	5545	5501	5450	5390	5323	5249	5167	5078
12200	X	5495	5522	5547	5568	5586	5601	5613	5621	5627	5628	5624	5615	5600	5579	5550	5515	5473	5423	5365	5300	5227	5147	5061
12000	X	5443	5471	5496	5518	5538	5554	5567	5578	5585	5587	5585	5577	5564	5544	5517	5483	5441	5393	5337	5273	5202	5124	5040
11800	X	5392	5420	5446	5469	5489	5506	5521	5533	5541	5545	5544	5538	5525	5506	5480	5447	5407	5360	5305	5243	5173	5097	5015
11600	X	5341	5369	5395	5419	5440	5458	5474	5486	5496	5501	5501	5496	5485	5467	5442	5410	5371	5324	5271	5209	5141	5067	4987
11400	X	5291	5319	5345	5369	5390	5409	5425	5439	5449	5455	5457	5452	5442	5425	5401	5370	5331	5286	5233	5173	5107	5035	4957
11200	X	5241	5269	5294	5318	5339	5359	5376	5390	5401	5408	5410	5407	5397	5381	5357	5327	5290	5245	5194	5135	5070	4999	4924
11000	X	5191	5218	5243	5267	5288	5308	5325	5339	5351	5359	5362	5359	5350	5335	5312	5282	5246	5202	5152	5094	5031	4962	4889
10800	X	5142	5168	5192	5215	5236	5255	5273	5288	5300	5308	5312	5310	5302	5287	5264	5235	5199	5157	5108	5052	4991	4924	4852
10600	X	5092	5118	5141	5163	5184	5202	5219	5234	5247	5255	5260	5259	5251	5236	5215	5186	5151	5110	5062	5008	4948	4884	4814
10400	X	5043	5067	5090	5111	5130	5148	5164	5179	5192	5201	5206	5205	5198	5184	5163	5135	5101	5061	5014	4962	4905	4843	4776
10200	X	4994	5017	5038	5058	5076	5093	5108	5123	5136	5145	5150	5150	5144	5130	5110	5083	5049	5010	4965	4916	4861	4801	4737
10000	X	4944	4966	4986	5004	5021	5036	5051	5065	5077	5087	5093	5093	5088	5075	5055	5028	4996	4958	4915	4868	4816	4760	4698

TRIMM[M] -4.50 -4.25 -4.00 -3.75 -3.50 -3.25 -3.00 -2.75 -2.50 -2.25 -2.00 -1.75 -1.50 -1.25 -1.00 -.75 -.50 -.25 .00 .25 .50 .75 1.00

P_D =6400 KW

6200 6000 5800 5600 5400 5200 5000

9,0 8,5 8,0 7,5 7,0 6,5 6,0 5,5 5,0

4,5 M HECKLASTIG

4,0 M KOPFLASTIG

Bild 1. Trimmoptimierungsblatt
Antriebsleistung P_D
Schiffstyp Meridian V = 18 kn

BRENNSTOFFVERBRAUCH PRO TAG [100×T/D]
BEI SPEZIF. BRENNSTOFFVERBRAUCH VON .240[KG/KWH]
SCHIFFSGESCHWINDIGKEIT V[KN]=18.0

VERDR.	38																							
20000	3945	3923	3902	3881	3862	3844	3827	3812	3797	3784	3770	3758	3745	3732	3720	3708	3699	3691	3686	3684	3685	3688	3694
19800	3946	3921	3898	3875	3853	3833	3813	3795	3778	3763	3748	3734	3721	3708	3696	3686	3678	3673	3670	3672	3676	3683	3691
19600	3945	3918	3891	3865	3840	3817	3794	3773	3753	3734	3717	3702	3688	3675	3664	3656	3650	3648	3649	3654	3663	3673	3685
19400	3943	3913	3884	3855	3827	3801	3775	3751	3728	3707	3688	3671	3656	3644	3634	3627	3623	3624	3628	3637	3648	3662	3677
19200	3939	3907	3876	3845	3814	3785	3757	3730	3705	3682	3661	3642	3627	3614	3605	3599	3598	3600	3607	3618	3633	3649	3667
19000	3935	3901	3867	3834	3801	3770	3740	3711	3683	3658	3635	3615	3599	3586	3578	3573	3573	3577	3586	3599	3616	3634	3654
18800	3929	3893	3857	3822	3788	3755	3723	3692	3663	3635	3611	3590	3573	3560	3552	3548	3549	3554	3564	3579	3597	3617	3639
18600	3923	3885	3847	3811	3776	3741	3707	3675	3644	3615	3589	3567	3549	3536	3528	3525	3526	3532	3543	3558	3576	3597	3620
18400	3915	3875	3837	3799	3763	3727	3692	3658	3626	3596	3569	3545	3527	3513	3505	3502	3504	3510	3521	3535	3554	3575	3598
18200	3906	3865	3826	3788	3751	3714	3679	3644	3610	3579	3551	3526	3507	3493	3485	3481	3483	3488	3498	3512	3529	3549	3572
18000	3896	3855	3815	3776	3739	3702	3666	3630	3596	3564	3535	3509	3489	3475	3466	3462	3462	3467	3475	3487	3502	3520	3542
17800	3885	3843	3804	3765	3728	3691	3655	3619	3584	3551	3521	3495	3474	3458	3448	3443	3442	3445	3451	3461	3473	3488	3507
17600	3872	3832	3792	3754	3717	3681	3644	3608	3573	3540	3509	3483	3461	3444	3433	3426	3423	3424	3427	3433	3441	3452	3467
17400	3859	3819	3781	3743	3707	3671	3635	3600	3565	3531	3500	3473	3450	3432	3419	3410	3405	3402	3402	3403	3407	3413	3422
17200	3845	3806	3769	3733	3697	3662	3627	3592	3557	3524	3493	3465	3442	3422	3407	3396	3387	3381	3376	3373	3371	3371	3375
17000	3829	3792	3756	3722	3688	3654	3620	3585	3551	3519	3488	3459	3435	3414	3396	3382	3370	3360	3350	3342	3334	3328	3324
16800	3812	3777	3744	3711	3678	3645	3613	3579	3546	3514	3483	3455	3429	3407	3387	3370	3354	3339	3325	3311	3297	3284	3273
16600	3794	3762	3730	3699	3668	3637	3606	3574	3542	3510	3480	3451	3425	3401	3379	3358	3339	3320	3301	3281	3260	3241	3222
16400	3774	3745	3716	3687	3658	3629	3599	3568	3538	3507	3477	3448	3421	3396	3371	3348	3325	3302	3277	3252	3225	3198	3172
16200	3754	3727	3701	3674	3647	3619	3591	3563	3533	3504	3475	3446	3418	3391	3365	3339	3312	3285	3256	3225	3192	3158	3124
16000	3732	3708	3684	3660	3635	3610	3583	3556	3529	3500	3472	3444	3415	3387	3359	3331	3301	3269	3236	3200	3162	3122	3080
15800	3709	3688	3667	3645	3622	3599	3574	3549	3523	3496	3469	3441	3413	3384	3354	3323	3290	3256	3218	3178	3135	3089	3041
15600	3684	3666	3648	3628	3608	3587	3564	3541	3517	3491	3465	3438	3409	3380	3349	3316	3281	3244	3203	3159	3112	3062	3008
15400	3658	3643	3628	3611	3592	3573	3553	3531	3509	3485	3460	3434	3406	3376	3345	3311	3274	3234	3191	3144	3094	3040	2982
15200	3631	3619	3606	3591	3576	3558	3540	3521	3500	3478	3454	3429	3401	3372	3340	3305	3268	3226	3181	3132	3079	3022	2962
15000	3602	3594	3583	3571	3557	3542	3526	3509	3490	3469	3447	3423	3396	3367	3335	3301	3262	3220	3174	3124	3069	3010	2947
14800	3573	3567	3559	3549	3538	3525	3511	3495	3478	3460	3439	3416	3390	3362	3331	3296	3257	3215	3168	3117	3061	3001	2936
14600	3543	3540	3534	3527	3518	3507	3495	3481	3466	3449	3430	3408	3384	3356	3326	3291	3253	3211	3164	3112	3056	2995	2930
14400	3512	3511	3508	3503	3496	3488	3477	3466	3452	3437	3420	3400	3377	3350	3320	3287	3249	3207	3161	3109	3053	2992	2927
14200	3481	3483	3482	3479	3474	3467	3459	3449	3438	3424	3409	3390	3368	3343	3314	3282	3245	3204	3158	3107	3052	2991	2926
14000	3449	3453	3454	3454	3451	3446	3440	3432	3422	3411	3396	3379	3359	3335	3308	3276	3241	3200	3156	3106	3051	2992	2927
13800	3417	3423	3427	3428	3427	3424	3420	3414	3406	3396	3383	3368	3349	3326	3300	3270	3236	3197	3153	3105	3051	2993	2930
13600	3385	3393	3398	3401	3402	3401	3399	3394	3388	3380	3369	3355	3338	3317	3292	3263	3230	3193	3150	3103	3052	2995	2933
13400	3353	3362	3369	3374	3377	3378	3377	3374	3370	3363	3353	3341	3325	3306	3282	3255	3224	3187	3147	3101	3051	2996	2936
13200	3321	3332	3340	3347	3351	3354	3354	3353	3350	3345	3337	3326	3312	3294	3272	3246	3216	3181	3142	3098	3049	2996	2938
13000	3289	3301	3311	3319	3325	3329	3331	3332	3330	3326	3320	3310	3297	3280	3260	3235	3207	3173	3136	3093	3046	2995	2938
12800	3257	3271	3282	3291	3299	3304	3307	3309	3309	3306	3301	3293	3281	3266	3247	3223	3196	3164	3128	3087	3041	2991	2937
12600	3226	3241	3253	3263	3272	3278	3283	3286	3287	3286	3282	3274	3264	3250	3232	3209	3183	3152	3117	3078	3034	2985	2932
12400	3195	3211	3224	3235	3245	3252	3258	3262	3264	3264	3261	3255	3245	3232	3215	3194	3169	3139	3105	3066	3023	2976	2925
12200	3165	3181	3195	3207	3217	3226	3233	3238	3241	3242	3240	3234	3226	3213	3197	3177	3152	3124	3090	3053	3011	2965	2915
12000	3135	3151	3166	3179	3190	3199	3207	3213	3217	3218	3217	3213	3205	3193	3178	3158	3134	3106	3074	3037	2996	2951	2903
11800	3106	3122	3137	3150	3162	3172	3180	3187	3192	3194	3193	3190	3183	3172	3157	3138	3115	3087	3056	3020	2980	2936	2889
11600	3077	3093	3108	3121	3133	3144	3153	3160	3166	3168	3169	3166	3159	3149	3134	3116	3093	3067	3036	3001	2961	2919	2873
11400	3048	3064	3079	3092	3105	3116	3125	3133	3139	3142	3143	3141	3135	3125	3111	3093	3071	3045	3014	2980	2942	2900	2855
11200	3019	3035	3049	3063	3076	3087	3096	3105	3111	3115	3116	3114	3109	3099	3086	3068	3047	3021	2991	2958	2920	2880	2836
11000	2990	3006	3020	3034	3046	3057	3067	3075	3082	3087	3088	3087	3082	3073	3060	3043	3021	2996	2967	2934	2898	2858	2816
10800	2962	2977	2991	3004	3016	3027	3037	3046	3053	3057	3059	3058	3054	3045	3032	3016	2995	2970	2942	2910	2875	2836	2795
10600	2933	2948	2961	2974	2986	2996	3006	3015	3022	3027	3030	3029	3025	3016	3004	2987	2967	2943	2916	2885	2850	2813	2773
10400	2905	2919	2932	2944	2955	2965	2975	2983	2991	2996	2999	2998	2994	2986	2974	2958	2938	2915	2888	2858	2825	2789	2751
10200	2876	2890	2902	2913	2924	2933	2942	2951	2958	2964	2967	2967	2963	2955	2943	2928	2908	2886	2860	2831	2800	2766	2728
10000	2848	2860	2872	2882	2892	2901	2909	2917	2925	2930	2933	2934	2930	2923	2911	2896	2878	2856	2831	2804	2774	2742	2706
TRIMM[M]	-4.50	-4.25	-4.00	-3.75	-3.50	-3.25	-3.00	-2.75	-2.50	-2.25	-2.00	-1.75	-1.50	-1.25	-1.00	-.75	-.50	-.25	.00	.25	.50	.75	1.00

T_M [M]: 9,0 / 8,5 / 8,0 / 7,5 / 7,0 / 6,5 / 6,0 / 5,5 / 5,0

4,5 M HECKLASTIG — 4,0 M KOPFLASTIG

B_e=36 t/d

34

32

30

28

Bild 2. Trimmoptimierungsblatt
Brennstoffverbrauch B_e Schiffstyp Meridian V = 18 kn

Das bedeutet, daß im Ballastzustand die gleiche Kopflastigkeit wie voll beladen und andererseits die extreme Hecklastigkeit des Ballastzustandes auch beim vollbeladenen Schiff untersucht werden muß.

4.2. Bemerkungen zum Applikationsprogramm

Das Berechnungsverfahren ist in der Schiffbau-Versuchsanstalt für die dort installierte EDVA ODRA 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 programmiert. Der Speicherbedarf beträgt ca. 4050 Worte (24-Bit-Wortlänge).

Das Programm besteht aus

- Hauptprogramm
- Unterprogrammen zur Berechnung 2-dimensionaler Interpolations-Spline-Funktionen.

Das Hauptprogramm ist dem speziellen Anwendungsfall angepaßt, gestattet aber eine Einsatzmöglichkeit für andere ähnliche Aufgabenstellungen.

In Ermangelung eines geeigneten numerisch gesteuerten Zeichengerätes in der SVA sind manuelle Ergänzungen bei der Erstellung des Trimmoptimierungsblattes erforderlich.

5. Anwendung der Ergebnisse

5.1. Spline-Koeffizienten

Die Spline-Koeffizienten sind nur im Rahmen einer mit Hilfe eines Laderechners vorzunehmenden Trimmoptimierung anwendbar. Darüber hinaus können die P_D-Funktionen auch bei anderen Algorithmen vom Bordrechner angewendet werden. Die Koeffizienten werden von der Schiffsführung nicht benötigt.

5.2. Trimmoptimierungsblatt

Das Trimmoptimierungsblatt dient der Erkennbarkeit einer bezüglich der notwendigen Wellenleistung eines Schiffes günstigen Trimmlage bei vorgegebener Fahrgeschwindigkeit und Wasserverdrängung. Andererseits kann dem Blatt auch entnommen werden, ob eine Ballastaufnahme mit dem Ziel der Leistungsverminderung mittels Verdrängungsvergrößerung sinnvoll ist.

Beim Vergleich mehrerer Trimmoptimierungsblätter bei verschiedenen Geschwindigkeiten kann außerdem der Einfluß einer Geschwindigkeitsänderung auf die Leistung bzw. den Brennstoffverbrauch abgelesen werden.

Jedes Trimmoptimierungsblatt gibt für eine diskrete Geschwindigkeitsstufe die Wellenleistungen bzw. den Brennstoffverbrauch pro Tag auf 2 Arten an:

- Tabellenwerte (P_D [kW] bzw. B_e [t/d]).
  Hierbei ist zu beachten, daß für eine günstige Tabellenform die Stellenzahl auf 4 begrenzt ist. Der Skalierungsfaktor ist in der Beschriftung angegeben.
  Wegen Bewuchsveränderungen, anderer Rauhigkeitszuschläge, veränderter Propellercharakteristika usw. ist zu beachten, daß die angegebenen Wellenleistungen von den tatsächlichen abweichen können.
- Um die Änderungstendenzen der Wellenleistungen in Abhängigkeit von Trimm und Verdrängung besser erkennen zu können, werden Kurven konstanter Leistung bzw. konstanten Brennstoffverbrauches eingetragen.

Bild 1 zeigt als Beispiel für den Schiffstyp „Meridian" das Trimmoptimierungsblatt der Antriebsleistung $P_D = f(\nabla, \triangle T)$ für V = 18 kn.

Im Bild 2 ist für die gleiche Geschwindigkeit das Trimmoptimierungsblatt des Brennstoffverbrauchs $B_e = f(\nabla, \triangle T)$ dargestellt, aus welchem der Brennstoffverbrauch pro Tag ablesbar ist. Die Berechnung basiert auf einem spezifischen Verbrauch von 240 g/kW · h.

Aus beiden Bildern ist erkennbar, daß eine Trimmänderung nur im Bereich stärkeren Kurvenanstiegs einen nennenswerten Einfluß auf die Wellenleistung hat. Im Extremfall ist hier bei V = 18 kn im mittleren Verdrängungsbereich eine theoretische Leistungseinsparung von ca. 18% bei einer Trimmänderung von −4,5 m auf 1,0 m erreichbar. Im selben Verdrängungsbereich wird unter Beachtung realer Ladefälle bei einer Trimmänderung von −1,0 m auf +1,0 m eine Leistungseinsparung von ca. 12% erzielt.

Um anstelle der Abhängigkeit der Wellenleistung von der Verdrängung die Abhängigkeit vom mittleren Tiefgang bestimmen zu können, wurde eine zweite Ordinate mit dem trimmabhängigen mittleren Tiefgang T_m eingezeichnet.

5.3. Versuchsergebnisse

Ergebnisse der Trimmoptimierungsrechnungen auf der Grundlage von systematischen Modellversuchen liegen bisher für drei Schiffstypen der Deutschen Seereederei vor. Die Schiffe besitzen alle einen in Modellversuchen bezüglich der Widerstandseigenschaften hauptsächlich für den Konstruktionstiefgang formoptimierten Bugwulst.

Die drei Schiffe haben die folgenden Hauptdaten:

Schiffstyp		„OBC"	„Meridian"	„Typ 271"
L_{PP}	m	167,40	146,86	112,30
B	m	22,86	21,80	17,60
T_{KWL}	m	10,00	9,00	7,02
C_B	—	0,78	0,68	0,68

Die Bilder 3 bis 17 zeigen für jeweils 5 Geschwindigkeiten für jedes Schiff die aus den Modellversuchen ermittelten Abhängigkeit der Antriebsleistung von der Verdrängung

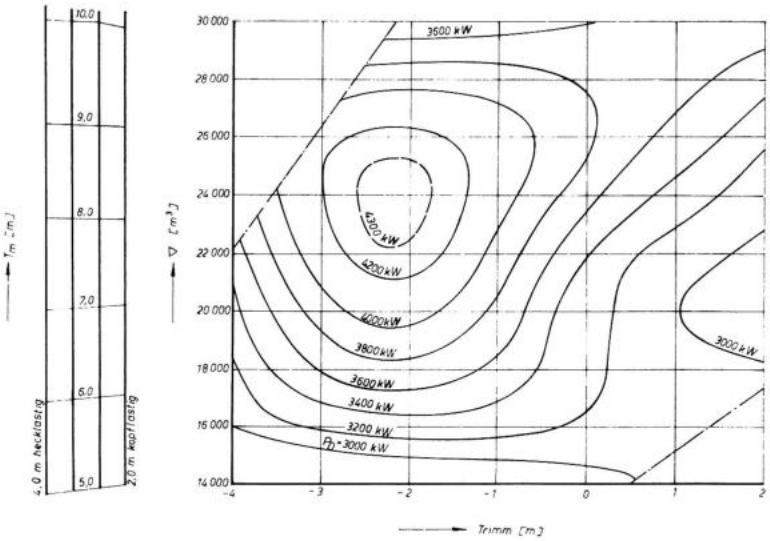

Bild 3. Abhängigkeit der Antriebsleistung P_D von Verdrängung und Trimmlage
Schiffstyp OBC V = 13 kn

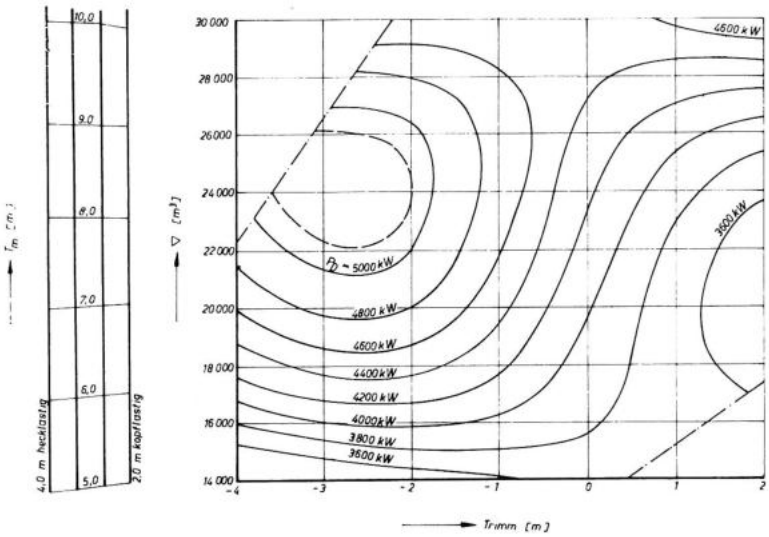

Bild 4. Schiffstyp OBC V = 14 kn

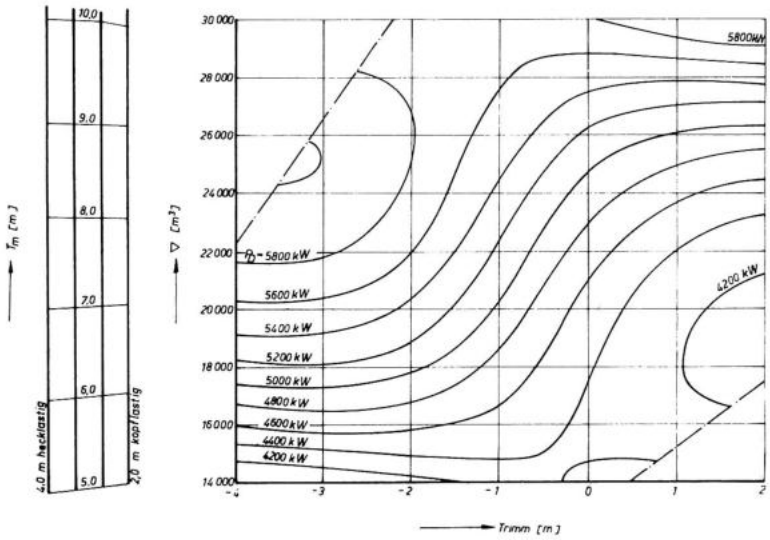

Bild 5. Schiffstyp OBC V = 15 kn

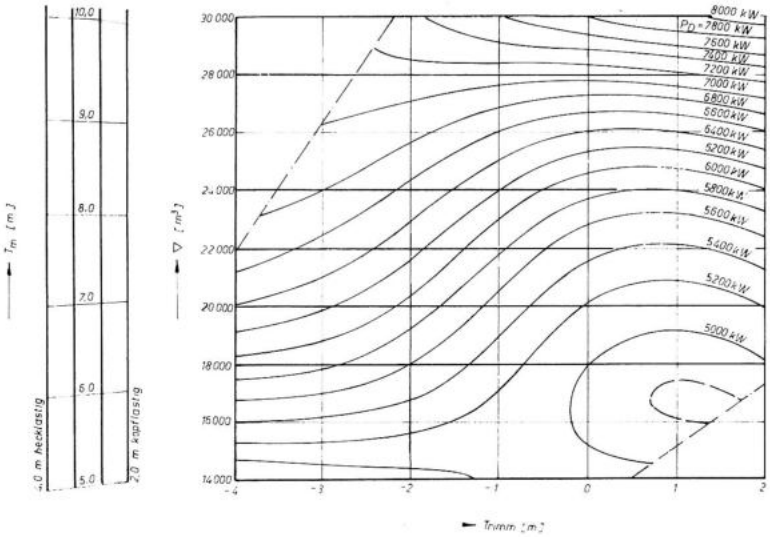

Bild 6. Schiffstyp OBC V = 16 kn

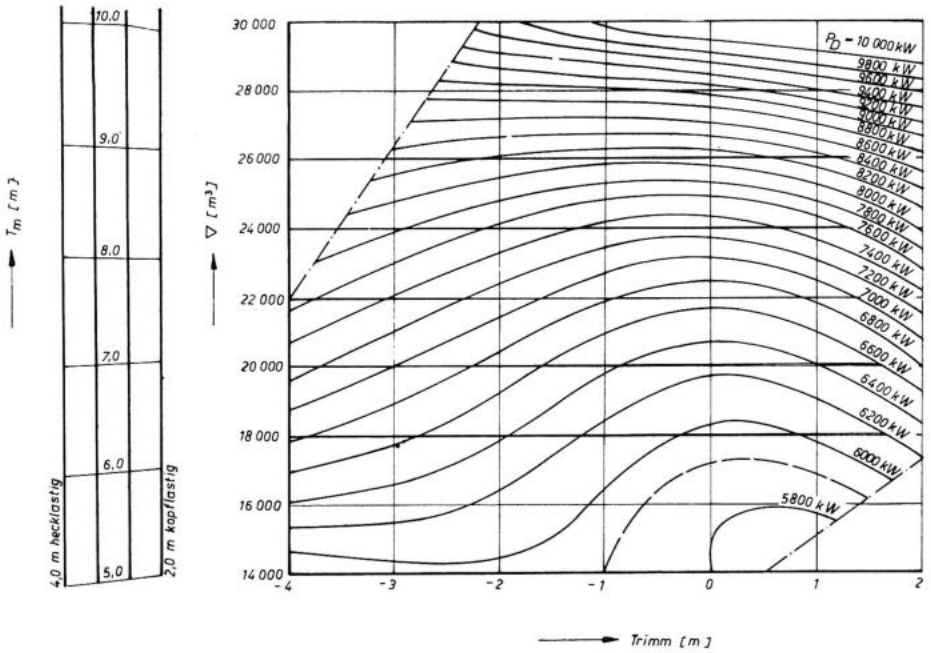

Bild 7. Schiffstyp OBC V = 17 kn

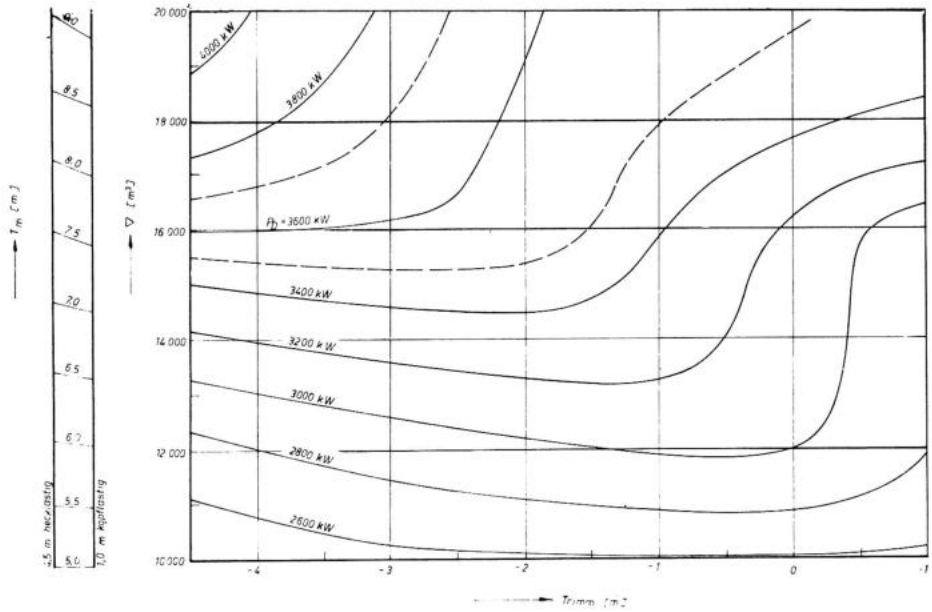

Bild 8. Schiffstyp Meridian V = 15 kn

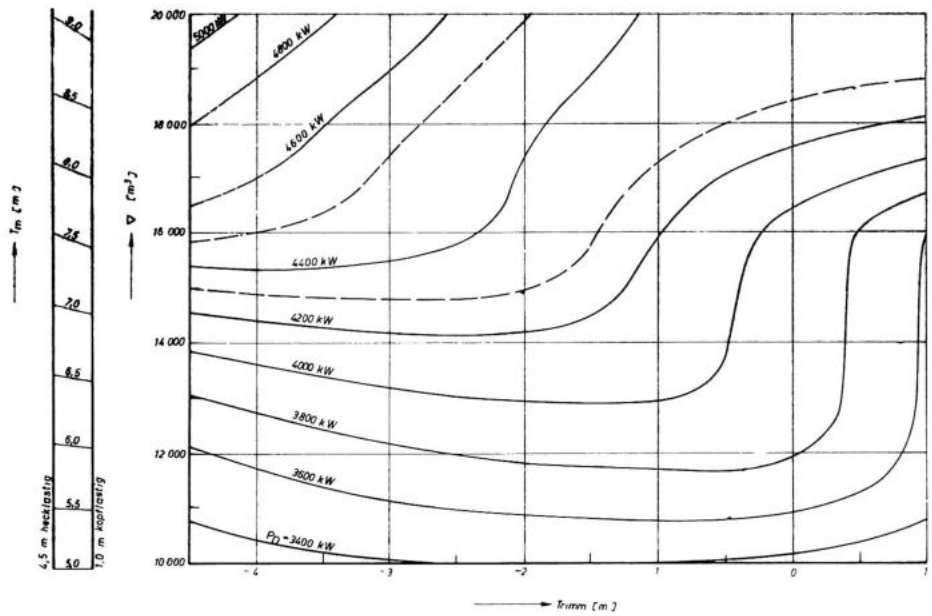

Bild 9. Schiffstyp Meridian V = 16 kn

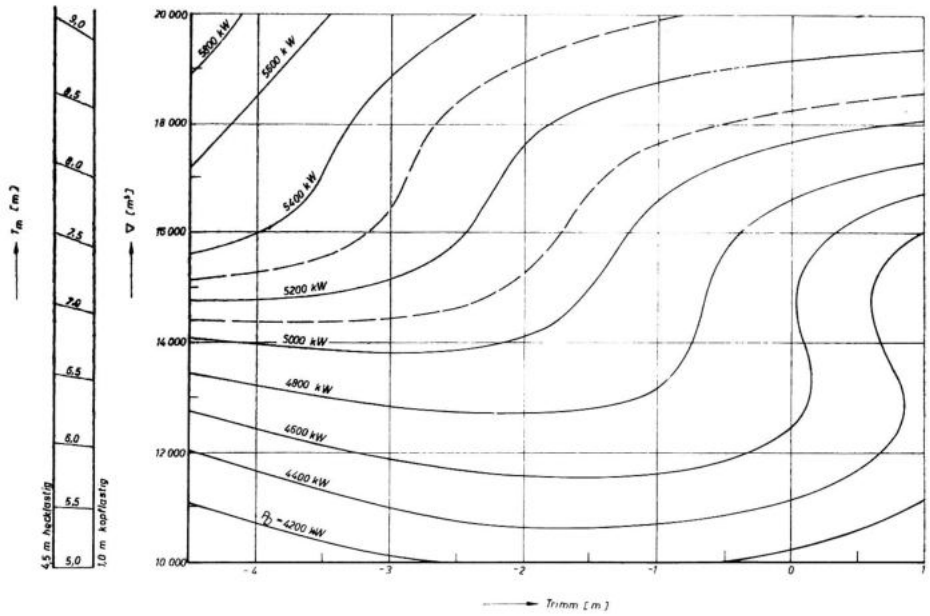

Bild 10. Schiffstyp Meridian V = 17 kn

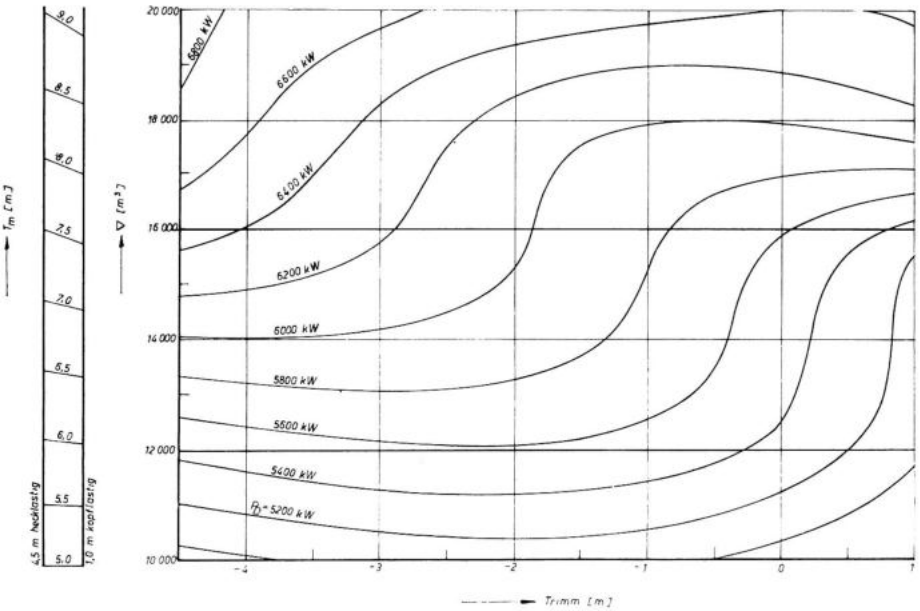

Bild 11. Schiffstyp Meridian V = 18 kn

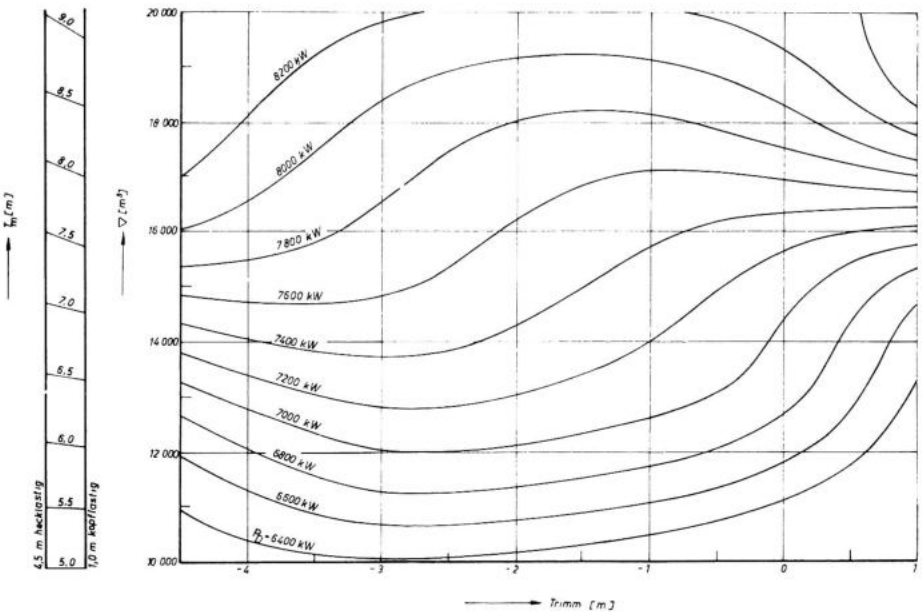

Bild 12. Schiffstyp Meridian V = 19 kn

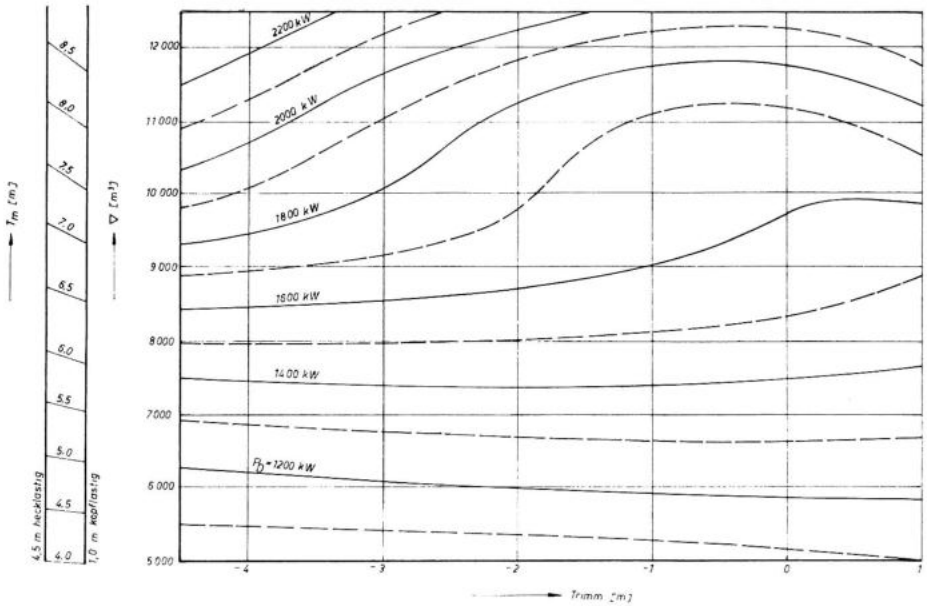

Bild 13. Schiffstyp 271 V = 12 kn

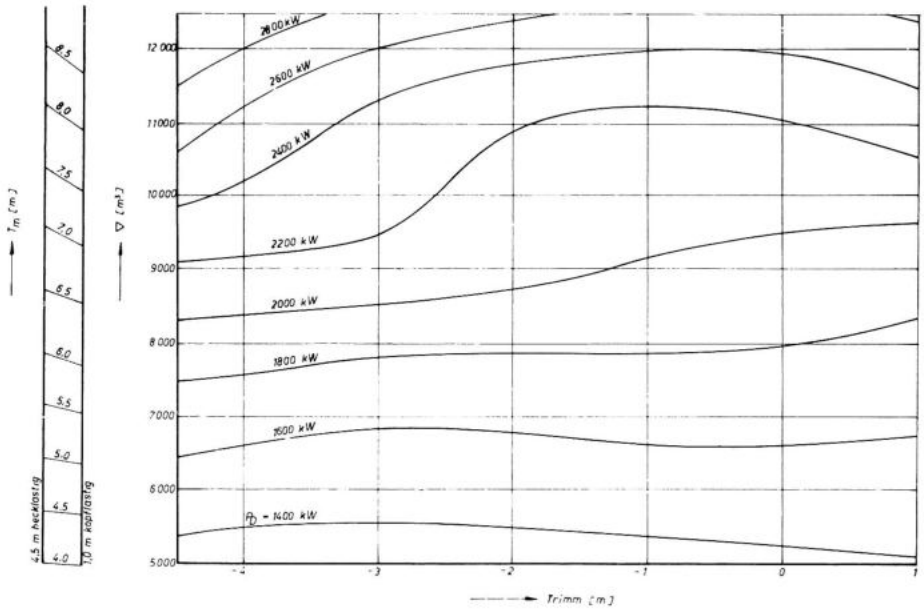

Bild 14. Schiffstyp 271 V = 13 kn

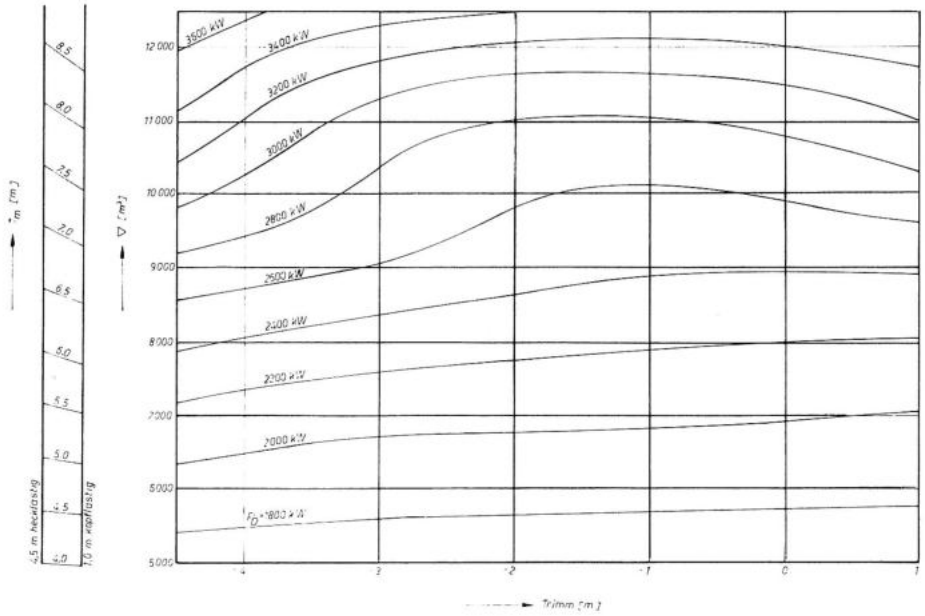

Bild 15. Schiffstyp 271 V = 14 kn

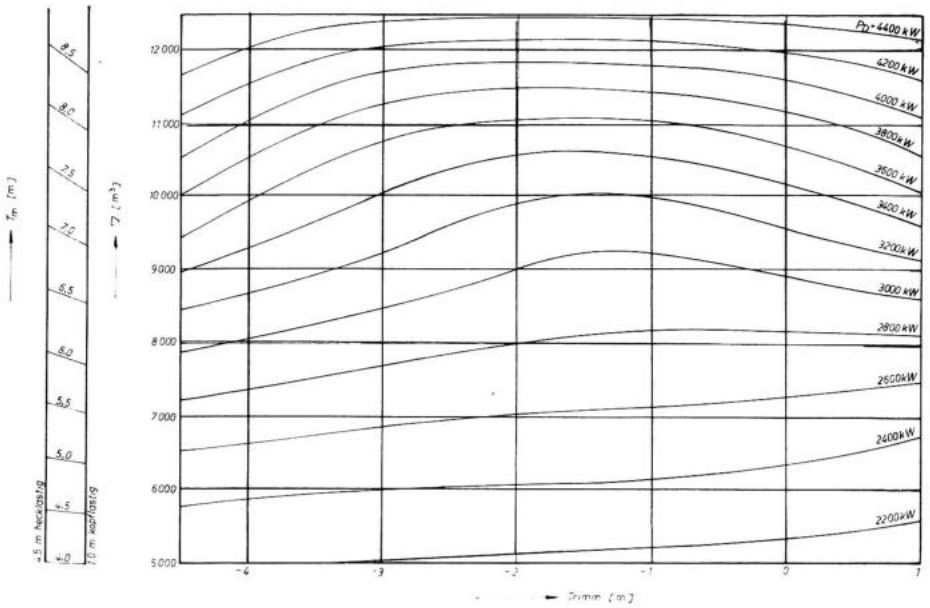

Bild 16. Schiffstyp 271 V = 15 kn

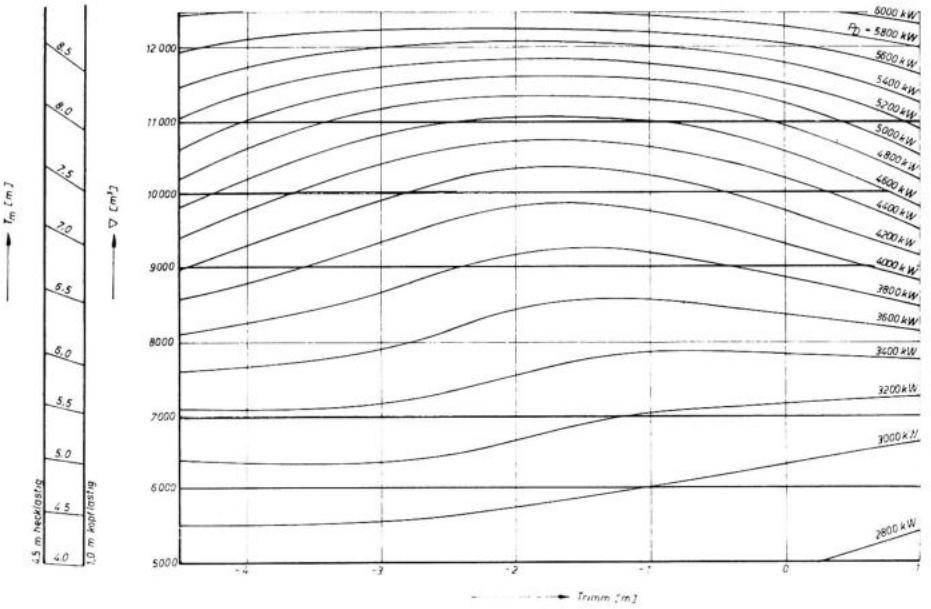

Bild 17. Schiffstyp 271 V = 16 kn

(bzw. vom mittleren Tiefgang) und der Trimmlage. Negative Trimmlage bedeutet Hecklastigkeit.

Wie die Bilder 3 bis 7 zeigen [2], ist beim Schiffstyp OBC die Leistung P_D in außerordentlich starkem Maß von der Trimmlage abhängig. Besonders bei den kleineren Geschwindigkeiten und teilbeladenen Zuständen ergeben sich bei kopflastiger Vertrimmung durch das Überspülen des offensichtlich für diese Tiefgänge zu großen Bugwulstes wesentliche Möglichkeiten der Leistungseinsparung. In einigen Bereichen (Bild 3 und 4) läßt sich sogar durch eine Verdrängungsvergrößerung die erforderliche Leistung reduzieren.

Auch beim Schiffstyp Meridian (Bilder 8 bis 12) ist in Bereichen normaler Ladungsfälle der Trimmeinfluß groß [3]. Im allgemeinen gilt auch für dieses Schiff, daß es so kopflastig wie möglich fahren sollte, um Brennstoff einzusparen. Dagegen zeigen die Bilder 13 bis 17 für den Typ 271 einen im Vergleich geringen Einfluß der Vertrimmung auf die Antriebsleistung [4]. Bei größeren Verdrängungen und Geschwindigkeiten ist hier eine leichte Hecklastigkeit zu empfehlen, während im übrigen Bereich praktisch möglicher Ladefälle durch Trimmaßnahmen nur geringe Leistungsreduzierungen möglich sind. Da der überwiegende Teil der Widerstandsänderung bei Vertrimmung des Schiffes durch Veränderung der Umströmung des Bugwulstes bewirkt wird, liegt der Schluß nahe, daß die bei den drei Schiffen ermittelten Unterschiede hauptsächlich auf die stark voneinander abweichenden Bugwulstformen zurückzuführen sind.

Es sollte an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die aus den Diagrammen ablesbaren theoretisch möglichen Einsparungen der Antriebsleistung, die sich in Größenordnungen bis zu 40% bewegen, sich im Schiffsbetrieb nur teilweise realisieren lassen, da die Möglichkeiten der Vertrimmung im praktischen Schiffsbetrieb aus verschiedenen Gründen eingeschränkt sind. Es wird eingeschätzt, daß bei den Schiffstypen „OBC" und „Meridian" bei konsequenter Anwendung der Ergebnisse der Trimmoptimierungs-Untersuchungen eine mittlere Brennstoffeinsparung von 2 bis 5 Prozent realisierbar ist. Beim Schiffstyp 271 sind durch Trimmoptimierung nur bei kleinen Geschwindigkeiten wesentliche Einsparungen möglich.

6. Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorgestellten Berechnungsmethode zur Bestimmung der Wellenleistung bzw. des Brennstoffverbrauches aus systematischen Modellversuchen in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit, der Verdrängung und der Trimmlage werden Kapitänsunterlagen in Form von

„Trimmoptimierungsblättern" erstellt, die der Schiffsführung die Möglichkeit geben, eine bezüglich dem Leistungsbedarf günstige Trimmlage für beliebige Beladungsfälle zu ermitteln.

Wesentliches mathematisches Hilfsmittel sind zweidimensionale Interpolations-Splinefunktionen mit einem Abschätzverfahren zur Ermittlung der Randbedingungen. Die Eignung des Verfahrens wurde am Frachtschiff „Meridian" nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Trimmoptimierungs-Rechnungen für die drei untersuchten Schiffstypen zeigen sehr unterschiedliche Einflüsse der Vertrimmung auf die erforderliche Antriebsleistung.

Literatur

[1] *Detlefs, H.-R., Röpcke, H.-J.:* Ein mathematisches Verfahren zur Ermittlung der optimalen Trimmlage eines Schiffes. Unveröffentl. Bericht für das F/E-Thema „Energiewirtschaftlicher Schiffsbetrieb" des KSH, Rostock 1981

[2] *Röpcke, H.-J.:* Trimmoptimierung für das Massengutschiff Typ OBC. Unveröffentl. Bericht Nr. 1193.1 der SVA, Potsdam 1981

[3] *Röpcke, H.J.:* Trimmoptimierung für das Frachtschiff Meridian. Unveröffentl. Bericht Nr. 1356.1 der SVA, Potsdam 1981

[4] *Röpcke, H.-J.:* Trimmoptimierung für das Frachtschiff ‚Typ 271'. Unveröffent. Bericht Nr. 1365.1 der SVA, Potsdam 1982

Möglichkeiten zur Ermittlung der Kaltrißanfälligkeit geschweißter höherfester Baustähle

Dr.-Ing. *Peter Nolde* und Dipl.-Ing. *Barbara Meyer*, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Schiffstechnik

1. Einleitung

Mit der Entwicklung höherfester Stähle und ihres verstärkten Einsatzes in Schweißkonstruktionen gewann das Problem der Schweißbarkeit mikrolegierter Feinkornstähle an Bedeutung.

Auftretende Schäden an geschweißten Konstruktionen führten dazu, daß die Analysenvorschriften für die chemische Zusammensetzung dieser Stähle mehrfach geändert wurden.

Letztendlich ergab sich, daß Stähle mit geringem Kohlenstoff- und erhöhtem Silizium- und Mangangehalt eine relativ gute Schweißeignung besitzen.

Beide Elemente im Verein mit Feinkornbildnern beeinflussen jedoch das Umwandlungsverhalten der Stähle nach Austenitisierung in ähnlicher Weise wie der Kohlenstoff: Sie verringern die kritische Abkühlgeschwindigkeit und erhöhen den Martensitanteil und damit die Härte des Gefüges, was zu Kaltrissen in der Schweißverbindung führen kann.

Der Wissenschaftsbereich Fertigungstechnik und Schweißtechnik an der Sektion Schiffstechnik der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock beschäftigt sich seit rund 15 Jahren mit dem Problem der Schweißbarkeit niedriglegierter höherfester Stähle, insbesondere auch derjenigen, die im Schiffbau der DDR zum Einsatz gelangen. Die Ergebnisse liegen in zahlreichen Veröffentlichungen, u. a. in Form von Schweiß-ZTU-Schaubildern vor [1].

Gegenwärtig werden u. a. erste Untersuchungen zur Kaltrißanfälligkeit einiger höherfester Stähle durchgeführt. Ziel der Bemühungen ist es, die Spezifik ihrer Ver- und Bearbeitbarkeit in Schweißkonstruktionen kennenzulernen und diejenigen technologischen Bedingungen zu ermitteln, die mit Sicherheit rißfreies Schweißen garantieren.

2. Einflußgrößen auf die Kaltrißbildung

Es handelt sich hierbei um technologische Maßnahmen im Sinne des Schweißbarkeitsbegriffs der TGL 14913. Die Herstellung einer riß- und bruchfreien Schweißkonstruktion ist primär mit der Notwendigkeit zur Vermeidung von Kaltrissen insbesondere in der Wärmeeinflußzone aber auch im Schweißgut von Schweißnähten verknüpft. Kaltrisse entstehen, wenn auf Grund der chemischen Zusammensetzung, des Wärmeeinflusses beim Schweißen und sonstiger metallurgischer, technologischer und konstruktiver Faktoren im Werkstoff örtlich begrenzte oder durchgängige spröde Werkstofftrennungen auftreten. Sie entstehen in der Regel in der Wärmeeinflußzone beim Abkühlen unterhalb der Martensitbildungstemperatur, häufig sogar erst nach einiger Zeit. Die bestimmenden Faktoren für die Kaltrißbildung sind:

- der Gefügezustand des Stahles (Metalls)
- die Höhe und die Verteilung der Spannungen
- der Wasserstoffgehalt im Stahl (Metall).

Der Gefügezustand des Stahls wird wesentlich durch seine chemische Zusammensetzung, besonders seinen Kohlenstoffgehalt, bestimmt und durch den thermischen Zyklus beim Schweißen, insbesondere durch die Austenitisierungsbedingungen und die Abkühlungsgeschwindigkeit während der γ/α-Umwandlung.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf ist bei gegebener chemischer Zusammensetzung auch für den Schweißeigenspannungszustand, das Formänderungsvermögen und letztendlich auch für den Wasserstoffgehalt in der Wärmeeinflußzone der Schweißverbindung entscheidend.

Es besteht damit die Möglichkeit, durch technologische Maßnahmen das Schweißregime hinsichtlich der Vermeidung von Kaltrissen zu optimieren.

Notwendige Bedingungen für die Kaltrißbildung sind ein geringes Formänderungsvermögen des Werkstoffes besonders an den Korngrenzen, beträchtliche örtliche Deformationen bei der ungleichmäßigen Abkühlung beim Schweißen und Phasenumwandlungen. Daraus resultieren ein bestimmter Gefügezustand und bestimmte Werkstoffeigenschaften im Bereich der Schweißnaht.

Für die Rißausbildung ist wichtig, ob das Gefüge ein ausreichendes Formänderungsvermögen besitzt [2].

Schweißeigenspannungen entstehen in Schweißnähten gewöhnlich in der Größenordnung der Streckgrenze des Werkstoffes. Sie können zu einer deutlichen Behinderung der Formänderung führen. Im Zusammenwirken mit der Ausbildung eines wenig verformungsfähigen Gefüges und dem Vorhandensein von Wasserstoff können plastische Deformationen nicht mehr erfolgen, und es kommt zu spröden Werkstofftrennungen. Wasserstoff befindet sich beim Schweißen in der Elektrodenumhüllung und in Form von Feuchtigkeit und Verunreinigungen im Schweißnahtbereich. Er spielt besonders für die verzögerte Rißbildung eine Rolle. Er wird beim Schweißen vom flüssigen Schweißgut aufgenommen und diffundiert aus diesem in Gebiete größerer Löslichkeit und geringer Konzentration. Das ist in der Wärmeeinflußzone der Fall, solange sich diese im austenitischen Gefügezustand befindet. Während der Abkühlung aus der Schweißwärme vermindert sich das Lösungsvermögen des Stahls für Wasserstoff, und dieser hat das Bestreben, wieder aus dem Stahl herauszudiffundieren. Die

Effusion des Wasserstoffs ist abhängig von der Temperatur und der zur Verfügung stehenden Zeit. Ihre Geschwindigkeit ist der Temperatur direkt proportional. Deshalb ist für die Höhe des Wasserstoffgehaltes in der Schweißverbindung auch die Gestaltung des thermischen Zyklusses beim Schweißen entscheidend und damit das gesamte Schweißregime einschließlich des Vor- oder Nachwärmens.

Die Gefahr der Kaltrißbildung kann folglich wegen der genannten wichtigsten Einflußfaktoren verringert werden durch:

- Vermeiden der Bildung eines Gefüges mit geringem Formänderungsvermögen
- Vermeiden ungünstiger Spannungszustände
- Verringerung des Wasserstoffgehaltes und
- Wahl eines Schweißregimes mit einem optimalen Wärmezyklus in der Wärmeeinflußzone

3. Angewendete Prüfmethoden zur Bewertung der Kaltrißanfälligkeit

Die Kaltrißanfälligkeit eines metallischen Werkstoffs ist eine wichtige Größe zur Charakterisierung seiner Schweißbarkeit. Diese beinhaltet jedoch eine Vielzahl von Komponenten. Sie ist keine einfache meßbare, sondern eine komplexe Größe vieler unterschiedlicher Kriterien beim Schweißen. Hieraus resultieren auch eine große Anzahl von entwickelten Prüfverfahren. Keines von ihnen ist jedoch in der Lage, eine umfassende Beurteilung der Schweißbarkeit zu ermöglichen. Es ist deshalb in der Regel notwendig, mehrere Prüfverfahren gleichzeitig anzuwenden, deren Aussagen sich sinnvoll ergänzen. Im allgemeinen kann man zwischen fremd- und sich selbst beanspruchenden Proben unterscheiden (Bild 1).

In den letzten Jahren wird für die Feststellung der Kaltrißneigung der Implant-Versuch empfohlen. Er gehört zur Gruppe der Prüfverfahren mit definierter äußerer Beanspruchung.

Hierbei wird eine zylindrische Probe, die an einem Ende mit einer Wendelkerbe versehen wurde, in die Bohrung eines Stahlbleches eingesetzt (implantiert) und auf der Oberseite des Bleches mit einer Auftragsraupe verschweißt. Dabei muß die Wendelkerbe am Probenschaft so ausgeführt sein, daß die Wärmeeinflußzone der Auftragsschweißung von ihr geschnitten wird. Die Variation der Schweißparameter und -verfahren, der Blechdicke der Einschweißplatte und der Vorwärmtemperatur hat unterschiedliche Abkühlungsbedingungen und damit eine unterschiedliche Gefügeausbildung in der Wärmeeinflußzone der Auftragsschweißung zur Folge. Die Anwendung unterschiedlich getrockneter Elektroden ergibt entsprechende Unterschiede im Wasserstoffgehalt der Schweißverbindung. Damit kann der Einfluß der wesentlichen technologischen Bedingungen beim Schweißen auf die Kaltrißneigung untersucht werden.

Die eingeschweißte Probe wird nach Erreichen derjenigen Temperatur, bei der mit großer Wahrscheinlichkeit nur noch Kaltrißbildung zu erwarten ist, belastet. Es wird dabei die Zeit bis zum Zerreißen der Probe gemessen.

Der Zusammenhang wird in einem Bruchzeit-Spannungs-Diagramm dargestellt.

Die Belastung erfolgt in Laststufen zu 30 MPa und bleibt unterhalb der Streckgrenze des untersuchten Werkstoffes.

Der Belastungszeitraum wird sehr unterschiedlich festgelegt. Er soll mindestens 16 Stunden währen, kann aber bis zu 72 Stunden ausgedehnt werden. Ist die Probe während dieser Zeit nicht gebrochen, wird der Versuch beendet. Die anschließende Versuchsauswertung erfolgt nach dem An- oder Durchrißkriterium. Zusätzlich können zur besseren Differenzierung des Gefüges Härtemessungen und metallographische Untersuchungen vorgenommen werden.

Als Resultat ergibt sich ein kritisches Spannungsniveau $\sigma_{k\,impl}$, unterhalb dessen keine Kaltrisse mehr auftreten.

Als Ergänzungsversuche wurden zwei weitere Prüfverfahren ausgewählt (Bild 1).

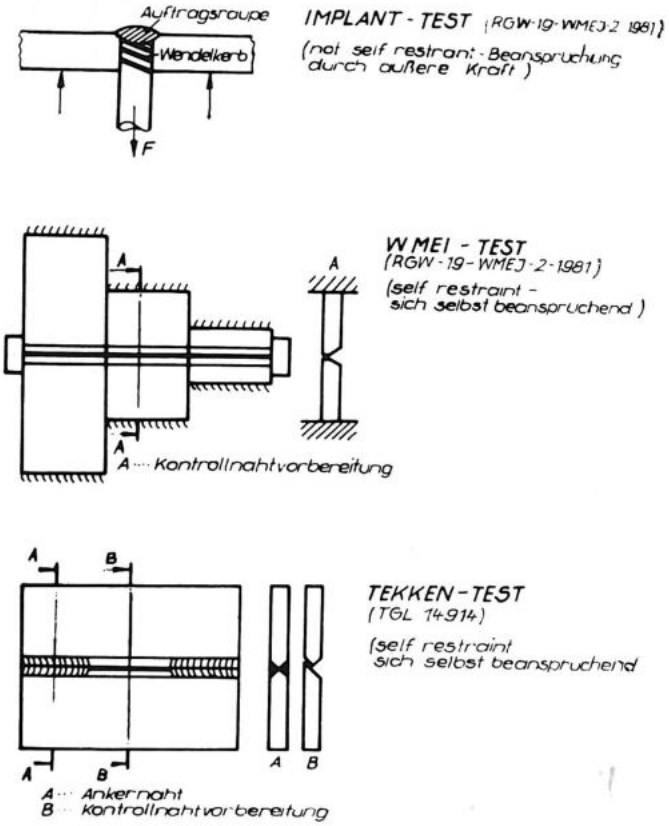

Bild 1. Angewandte Prüfverfahren

Die Tekken- und die WMEI-Probe beanspruchen sich durch die beim Schweißen erzeugten Schrumpfungen und Spannungen in Verbindung mit ihrer geometrischen Form und der Art der Einspannung selbst. Auch bei diesen Proben können die Schweißbedingungen in gleicher Weise wie beim Implant-Versuch variiert und die Kontrollnähte auf Risse untersucht werden.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Versuchsauswertung bei diesen Proben alternativ vorzunehmen, d. h. festzustellen, ob Risse vorhanden sind oder nicht oder nach TGL 14914/05 über die Rißlängenauswertung eine prozentuale Rißanfälligkeit zu berechnen.

Bei der Tekken-Probe handelt es sich um eine vom Forschungsinstitut der japanischen Eisenbahnen entwickelte und seit 1976 auch in der DDR standardisierte Pro[illegible]3]. Sie besteht aus zwei Blechen, die über eine Länge von zweimal 60 mm mittels einer X-Naht miteinander verbunden wurden. Zwischen diesen beiden „Ankernähten" befindet sich die Prüfnaht, die eine Y-Naht-ähnliche Vorbereitung aufweist. Diese Nahtvorbereitung bildet in ihrem Wurzelbereich eine scharfe Kerbe, die eine Rißauslösung im Bereich der Wärmeeinflußzone der Kontrollnaht bewirkt. Die geometrische Form und die Abmessungen der Tekken-Probe führen zu einer Verspannung der Probe nach dem Schweißen, deren Intensität mit

$$K_T = \frac{2\,E \cdot \delta}{\Pi \cdot L_p} \qquad (1)$$

angegeben wird (Bild 1), mit

E Elastizitätsmodul
δ Blechdicke
L_p Länge der Kontrollnaht (hier $L_p = 80$ mm)

Die Verspannungsintensität beträgt z. B. bei $\delta = 30$ mm $\quad K_T = 16\,711{,}3$ N mm^{-2}.

Die WMEI-Probe ist verhältnismäßig neu (Bild 1). Sie wurde in der Technischen Hochschule Sofia unter Mitarbeit der Baumann-Hochschule Moskau entwickelt.

Es handelt sich um drei an den Enden fest eingespannte Proben mit einer Y-Naht-Vorbereitung. Die Kontrollnaht