

# SCHIFFBAUFORSCHUNG

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE MITTEILUNGEN

Herausgegeben vom Institut für Schiffbau, Rostock

und von der Technischen Fakultät der Universität Rostock

## Systematische Widerstandsuntersuchungen für schnelle Frachtschiffe mit und ohne Bugwulst

Aus dem Institut für Schiffbau, Rostock, Direktor: Dipl.-Ing. S. Kruppa

50. Mitteilung der Schiffbau-Versuchsanstalt, Leiter: Dr.-Ing. e. h. W. Henschke

Von Dipl.-Ing. G. Hähnel, KDT, und Dipl.-Ing. K.-H. Labes, KDT, Berlin

### 1. Einleitung

In den vergangenen 10 Jahren zeichnete sich im Stückgutverkehr eine Entwicklung zum schnelleren Schiff hin ab, während sich die Massengutfrachtschiffe vor allem im Hinblick auf ihre Größenordnung weiterentwickelt haben [1] bis [7]. In der Linienschiffahrt, z. B. im Ostasiendienst, laufen heute bereits zahlreiche Frachtmotorschiffe im Stückgutverkehr mit Geschwindigkeiten von 20 kn und mehr [15] bis [36]. So wurden z. B. im Jahre 1965 auf der Route England-Südafrika zwei Schiffe mit 22,5 kn Dienstgeschwindigkeit eingesetzt [23] und [24] und für die USA-Asienfahrt vier Schiffe mit 23 kn Dienstgeschwindigkeit in Auftrag gegeben [26]. Hervorzuheben sind auch die „American Challenger“ und die „American Carger“, zwei Turbinen-Frachtschiffe mit 13 600 t Tragfähigkeit, die mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 24 kn bzw. 25,17 kn die Strecke Le Havre-New York zurückgelegt haben [1]. Das ist für ein Frachtschiff bereits eine beachtenswert hohe Geschwindigkeit, auch wenn man annimmt, daß sie wahrscheinlich nicht im vollbeladenen Zustand des Schiffes erzielt wurde. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch das Gasturbinen-roll-on/roll-off-Schiff „Adm. Wm. M. Callaghan“ ( $L_{PP} \approx 191$  m,  $B \approx 28$  m,  $T \approx 8,2$  m,  $P_{D,max} = 2 \times 25\,000$  PS), das mit  $2 \times 20\,000$  PS Antriebsleistung eine Geschwindigkeit von 25 kn erreichen soll [10].

Das zuletzt aufgeführte Beispiel gehört z. Z. noch zu den Ausnahmefällen, da die Bau- und Betriebskosten dieser Schiffe noch sehr hoch sind, und die Finanzierung vor allem erst durch staatliche Unterstützungen der Werften und Reedereien möglich wurde [3] u. [8]. Wurden auch immer wieder Bedenken gegen die Wirtschaftlichkeit so hoher Geschwindigkeiten geäußert, so hat doch bereits ein ernsthafter Wettbewerb auf diesem Gebiet zwischen den einzelnen Nationen begonnen. Früher oder später wird der Einsatz schnellerer Stückgutfrachtschiffe im Liniendienst zunehmen, da die Vorteile, die diese Schiffe unter bestimmten Bedingungen bieten, von Jahr zu Jahr immer deutlicher hervortreten [1] bis [7] u. [22]. Es ist z. B. die Bevorzugung schneller Schiffe durch den Befrachter zu nennen, der wahrscheinlich zugunsten eines beschleunigten Transportes eine etwas höhere Frachtrate in Kauf nehmen wird. Eine Steigerung der Geschwindigkeit um nur 1 kn kann bei

langen Fahrstrecken bereits zu einer Reiseverkürzung von mehreren Tagen führen, während sich auf kurzen Linien eine Erhöhung der Geschwindigkeit nur wenig bemerkbar machen wird und sich deswegen kaum lohnt [10]; ebenso wie sich erst auf langen, wenig unterbrochenen Fahrstrecken die Maschinenleistungen dieser Schiffe richtig ausnutzen lassen, also z. B. im Ostasiendienst. Natürlich muß auch die Modernisierung der Be- und Entladeeinrichtungen der Häfen und der Schiffe selbst mit dieser Entwicklung Schritt halten [7], weil andernfalls der Vorteil der Reisezeitverkürzung durch eine längere Hafenliegezeit wieder aufgehoben werden kann [10]. Eine rationelle Umschlagtechnik, wie sie beispielsweise durch den Einsatz moderner Hafenanlagen und Krananlagen, durch Verwendung einheitlicher Transportbehälter (Container), durch die Anwendung des roll-on/roll-off- und des float-on/float-off-System überall angestrebt wird, verbessert die Wirtschaftlichkeit der schnellen Stückgutfrachtschiffe [18] [20] u. [10] bis [13]. Weitere Faktoren, die die Entwicklung schneller Stückgutfrachtschiffe begünstigen können, sind die Verbesserung der Fahreigenschaften der Schiffe durch neue Schiffsformen (Wulstbugs), die Verringerung der Schiffsmasse z. B. durch den Einsatz neuer Werkstoffe, die fortschreitende Vervollkommnung der Schiffsantriebsanlagen, insbesondere der Dampfturbinen und damit verbunden eine Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, ferner eine evtl. Verbilligung der Kraftstoffe, der voraussichtliche Einsatz von Atomtriebsanlagen im Schiffbau und nicht zuletzt vielleicht auch die ständig zunehmende Konkurrenz durch die Luftfahrt-Transportgesellschaften [3] [7] [8] u. [14]. Man kann also sagen, daß der überall sichtbar werdende Trend zu immer schnelleren Verkehrsmitteln auch in der Seefahrt nicht Halt macht, und daß es hierbei nicht allein um die Einführung des allgemein technischen Fortschritts in diesem Industriezweig geht, sondern daß auch rein wirtschaftliche Überlegungen diese Entwicklung begünstigen. Auch in der UdSSR sind, davon ausgehend, daß die Entwicklung schneller Frachtschiffe bei den technischen Voraussetzungen einen ökonomischen Nutzen bringt, Projektierungsarbeiten für schnelle 25-kn-Frachtschiffe vorgesehen, die eine Antriebsleistung von 25 000 PS bis 30 000 PS haben sollen [8]. Um in der internationalen Entwicklung Schritt zu halten, hat sich der VEB Deutsche Seereederei ebenfalls

für den Einsatz von schnellen Stückgutfrachtschiffen im Ostasiendienst entschieden und den VEB Warnowwerft, Warnemünde, mit dem Entwurf und Bau eines 21-kn-Ostasienfrachtschiffes beauftragt.

Ein solcher Entwurf setzt jedoch, soll er den neuesten wissenschaftlich-technischen Forderungen entsprechen und ein Optimum an Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit darstellen, umfangreiche Vorarbeiten, auch auf dem hydrodynamischen Gebiet voraus. Beispielsweise wurden für die Wahl einer günstigen Schiffsförm für die „Yamashiro Maru“ [16], ein in Japan gebautes schnelles Frachtschiff, zahlreiche Modellversuche mit mehr als 10 Modellen durchgeführt.

## 2. Aufbau der Versuchssystematik

Das von der SVA vorgesehene Versuchsprogramm bezüglich der Untersuchung mehrerer Formvarianten für schnelle Frachtschiffe untergliedert sich in vier Teile.

1. Untersuchung des Einflusses verschiedenartiger Wulstbugformen auf den Schiffswiderstand.
2. Untersuchung des Einflusses der Heckform auf die Schlepp- und Wellenleistungen.
3. Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Schiffslängen auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften.
4. Vergleich der Widerstands- und Propulsionseigenschaften der SVA-Entwürfe mit den Werten anderer Fahrzeuge.

### 2.1. Ausgangsschiff (M 426)

Davon ausgehend, daß die z. Z. eingesetzten schnellen Linienfrachtschiffe im allgemeinen eine Zuladung von etwa 10000 t bis 12500 t haben [3], wurde für das Ausgangsschiff eine Verdrängung von 20000 m<sup>3</sup> gewählt. Der Völligkeitsgrad der Verdrängung wurde in Abhängigkeit von der Froudezahl nach bekannten Überschlagsformeln für eine Probefahrtgeschwindigkeit von 25 kn zu  $C_{B_{PP}} = 0,550$  ermittelt. Er stimmt recht gut mit den Werten anderer, moderner Schiffe dieser Größenordnung überein [16] [28] [31] u. [51]. Für die Wahl der Schiffslänge wurde eine größere Anzahl Vergleichsschiffe herangezogen. Dabei ergaben sich jedoch sehr unterschiedliche Werte, und es ließ sich kaum eine Tendenz erkennen. Dieses mag daran liegen, daß die Schiffe für verschiedene Routen entworfen sind und daher die Aufgabenstellungen sehr verschieden waren. Für den Aus-

gangsentwurf wurde eine Länge zwischen den Loten von 165 m gewählt. Die Breite des Schiffes wurde anhand von Näherungsformeln und entsprechend der heutigen Tendenz, die Schiffe etwas breiter zu bauen, mit  $B = 23,60$  m festgelegt; damit ergab sich ein Tiefgang von 9,34 m.

Der Spantverlauf im Unterwasserschiffsbereich wurde in Anlehnung an die Schiffsförm der Serie 60 entworfen, die im allgemeinen recht gute Widerstandseigenschaften aufweisen. Der größte Spant liegt auf  $0,5 \cdot L_{PP}$  und sein Völligkeitsgrad wurde mit  $C_M = 0,972$  angenommen; damit ergab sich ein Schärfegrad  $C_{PPP} = 0,566$ . Eine Aufkimmung wurde entsprechend der heutigen Tendenz nicht ausgeführt, statt dessen ein etwas größerer Kimmradius.

Die Schwerpunktlage wurde aus den Ergebnissen systematischer Modellversuche (Göteborg, Serie 60) ausgewählt. Diese besagen, daß für die Froudezahl  $F_n \approx 0,30$  bei einer Schwerpunktlage von etwa  $-1\%$  bis  $-2\%$  von  $L_{PP}$  die kleinsten Widerstände zu erwarten sind. Deshalb wurde  $LCB = -1,5\%$  für die Ausgangsförm gewählt. Das Hinterschiff war als Kreuzerheck ausgebildet, der Überhang in der Wasserlinie betrug etwa  $2,5\%$  von  $L_{PP}$ , und in den Schraubenbrunnen konnte ein Propeller von 6,60 m Durchmesser untergebracht werden.

Die Spanten des sehr scharfen Vorschiffes (Wasserlinieneintrittswinkel  $1/2 \alpha_E \approx 7,5^\circ$ ) wurden im Überwasserbereich etwas ausfallend gestaltet, um die See-

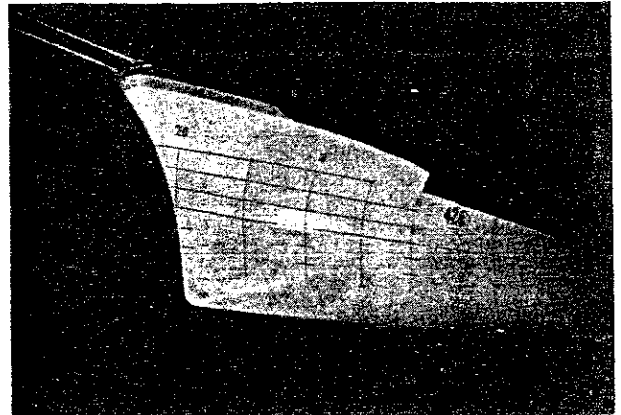


Bild 2. Vorschiff des Grundmodells (M 426 — ohne Wulst)

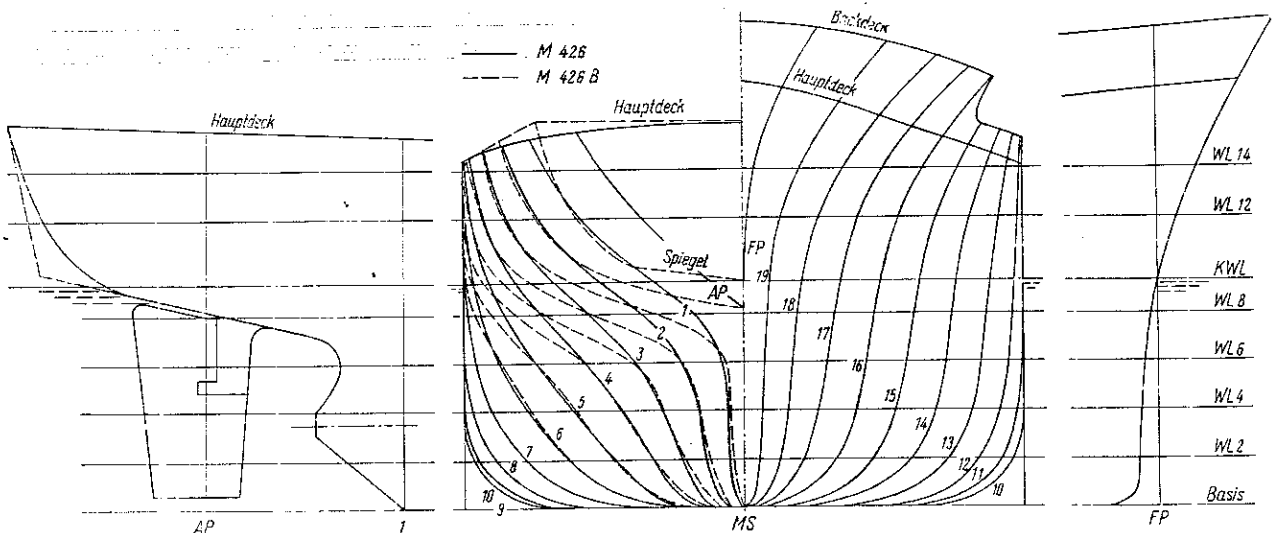


Bild 1. Spantenriß und Stevenkonturen der Modelle M 426 und M 426 B (Ausgangsförm der Schnellfrachtschiffserie mit Kreuzerheck)

fähigkeit des Schiffes zu verbessern und eine etwas größere Decksbreite für die Unterbringung der Decksmaschinen zu erhalten (Bild 1 und 2).

Das Schiff wurde entsprechend dem Trend zum schnellen Schiff für eine Probefahrtgeschwindigkeit von etwa 25 kn ausgelegt, um eine Dienstgeschwindigkeit zwischen 23,5 kn bis 24 kn zu erreichen. Modellmäßig wurde ein korrespondierender Geschwindigkeitsbereich von 13 kn bis 26 kn, bzw. ab 18 kn beim Schiff mit Wulst, untersucht.

Nachstehend sind die Konstruktionsdaten von M 426 zusammengestellt:

Länge zwischen den			
Loten	$L_{PP}$	=	165,00 m
Breite in der Wasserlinie	$B_{WL}$	=	23,60 m
Tiefgang	$T$	=	9,34 m
Verdrängung	$\nabla$	=	20000 m <sup>3</sup>
Völligkeitsgrad der Verdrängung	$C_{BPP}$	=	0,550
Völligkeitsgrad des Hauptspants	$C_M$	=	0,972
Schärfegrad	$C_{PPP}$	=	0,566
Lage des Verdrängungsschwerpunktes, bezogen auf 0,5 $L_{PP}$	$LCB$	=	-1,5% von $L_{PP}$

Um den Einfluß der Heckform auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften des Schiffes festzustellen, wurden außer den Versuchen mit dem Kreuzerheck auch Versuche mit einem Spiegelheck durchgeführt. Die größte Breite dieses Hecks betrug in Höhe des Decks 75% der Schiffsbreite. Aus Bild 1 ist zu erkennen, daß die Hinterschiffspanten beim Schiff mit Spiegelheck im Bereich des Propellers und davor, oberhalb WL 6, flacher verlaufen als beim Schiff mit Kreuzerheck. Bei den Propulsionsversuchen zeigte sich, daß dieser Spantverlauf die Propulsionseigenschaften des Schiffes ungünstig beeinflusst.

Bei sämtlichen Vergleichen mit anderen Schiffen und Gegenüberstellungen von Schiff mit und ohne Bugwulst sind in den folgenden Abschnitten immer die Werte für das Schiff mit Kreuzerheck (M 426) und nicht für das Schiff mit Spiegelheck (M 426B) benutzt worden.

## 2.2. Betrachtungen zum Wulsteffekt

Jeder an der Wasseroberfläche sich bewegende Körper erzeugt infolge von Druckänderungen Wellen, für deren Entstehung Energie erforderlich ist, die als Wellenwiderstand in den Gesamtwiderstand des Körpers mit eingeht. Beim Schiff entstehen die Wellen vor allem an den Stellen großer Druckänderungen, also am Bug und Heck. Der Wellenwiderstand ist um so größer, je ausgeprägter die einzelnen Wellensysteme am Schiff auftreten, und um so kleiner, je mehr sie sich gegenseitig durch Überlagerung aufheben (Interferenz). Aus diesem Grunde ist der Wellenwiderstand sowohl von der Schiffsförmigkeit als auch von der Geschwindigkeit abhängig.

Nach allgemeiner Ansicht hat das Bugwellensystem den größeren Anteil am Wellenwiderstand. Wenn es also gelingt, die Bildung einer Bugwelle zu verhindern bzw. dieselbe abzuschwächen, so werden sich dadurch bei den Schiffen, die einen hohen Wellenwiderstand haben (z. B. bei schnellen Frachtschiffen), die Widerstandseigenschaften verbessern lassen. Aus diesem Grunde werden heute häufig schnelle Frachtschiffe mit einem Wulstbug ausgerüstet [21] bis [25] und [28] bis [30]. Versuche haben gezeigt, daß z. B. ein kugel- oder ellipsenförmiger Körper, der sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit etwas unterhalb der Wasseroberfläche bewegt, ein Wellental verursacht [39], das, wenn man diesen Körper in geeigneter Lage am Bug eines Schiffes an-

bringt, das Bugwellensystem desselben z. T. aufheben und damit den Gesamtwiderstand des Schiffes verbessern kann [34] [37] [45] u. [46]. Die Anbringung eines Bugwulstes kann auch die Linienführung des Schiffskörpers im Vorschiffsbereich infolge Vergrößerung der Schiffslänge, Verkleinerung der Wasserlinieneintrittswinkel im Bereich der KWL und Abschwächung der vorderen Schultern [33] u. [34] günstig beeinflussen, speziell bei völligen Schiffen. Eine interessante Ansicht bezüglich des Wulsteffektes bei völligen Fahrzeugen ist [35] zu entnehmen. Danach kann ein Wulst das Ablösen von Wirbeln an den Spantübergängen zum Boden im Vorschiff behindern bzw. verzögern sowie sogar einen Einfluß auf die Ausbildung der Grenzschichtströmung ausüben [31].

Welcher Bugwulst nun an welchem Schiffskörper angebracht werden muß, um möglichst hohe Widerstandsverbesserungen zu erzielen, darüber gibt es in der Literatur die verschiedensten Ansichten. *Bergemann* [33] empfiehlt, den Wulst nicht in den Schiffskörper einzustraken, sondern einen scharfkantigen Übergang zwischen Schiff und Wulst zu schaffen. *Dillon* und *Lewis* [36] dagegen sprechen sich für einen eingestakten Wulst bei Schiffen mit hohen Geschwindigkeiten aus (vgl. auch [41]). Nach [34] und [37] soll der Wulst bei schnellen Schiffen möglichst breit und kurz sein, sich so weit wie möglich nach vorn hin erstrecken, und die Oberkante soll mindestens einen Wulstdurchmesser unter der Wasseroberfläche liegen. Die entgegengesetzten Merkmale, bedingt durch spezielle Forderungen an den Wulsteffekt bei unterschiedlichen Beladungszuständen, weist der sogenannte Maierform-SV-Bug auf [40], der ausgesprochen schmal ist und bis nahe an die Konstruktionswasserlinie reicht (Bild 2, Wulst 8). Überhaupt gehen auch in bezug auf die Lage des Wulstes die Ansichten weit auseinander. Einerseits verspricht man sich von möglichst hoch gelegenen Wulsten den größten Effekt [33] u. [44], weil dann eine wirksamere Beeinflussung des Wellenbildes und demzufolge eine weitere Verbesserung des Wellenwiderstandes auftreten soll, und andererseits baut oder empfiehlt man möglichst tiefliegende Wulste [32] [42] u. [45] bis [48]. Sehr viel für sich hat wahrscheinlich die von *Bergemann* [33] und *van Lammeren* [48] vertretene Ansicht, daß der Wulst so nahe wie möglich an die Wasseroberfläche heranreichen soll, aber niemals bei den unterschiedlichen Fahrzuständen austauschen darf. *Van Lammeren* empfiehlt aus diesem Grunde, den Wulstdurchmesser gleich dem Ballasttieftgang am vorderen Lot zu wählen. Das hat aber wiederum den Nachteil, daß die Größe des Wulstes begrenzt ist, und, wie Untersuchungen gezeigt haben [31] [33] [36] [37] [42] [43] [45] u. [46], gerade besonders große Bugwulste beim beladenen Schiff und bei hohen Geschwindigkeiten eine erhebliche Leistungseinsparung bringen. Deshalb soll der Bugwulst auch um so größer sein, je höher die Froudezahl ist (*Inui* empfiehlt sogar einen Wulstdurchmesser von 80% des Tiefganges [33] u. [42]).

In einigen Literaturangaben [33] [34] u. [42] sind Leistungsverbesserungen bis zu 15% angegeben, wobei es sich hierbei wahrscheinlich um sehr große Wulste mit einer Fläche am vorderen Lot von  $A_{FP} \approx 15\%$  von  $A_M$  handelt [31]. Eine Anbringung derartiger Wulste am Schiff dürfte jedoch aus technischen und ökonomischen Gründen (Schiff in Ballastfahrt, Schiff bei Seegang usw.) kaum zu vertreten sein. In Japan wurde beispielsweise an dem Küsten-Passagierschiff „Kurenai Maru“, das einen kleinen Wulst mit  $A_{FP} = 5\%$  von  $A_M$  besaß, probenhalber ein großer Wulst mit  $A_{FP} = 17\%$  von  $A_M$  angebracht. Bei der Erprobung erreichte das Schiff mit dem vergrößerten Wulst die gleiche Geschwindigkeit mit einer um 13% geringeren Leistung [31] u. [42]. Der

Wulst wurde jedoch nach der Erprobung aus technischen Gründen wieder abgenommen. Daraus ist zu ersehen, daß nicht allein die Größe des Widerstandsgewinnes die Wahl der Wulstgröße beeinflusst [33] u. [34].

Interessant sind auch die Ergebnisse, die *Dillon* und *Lewis* durch Widerstandsversuche mit verschiedenen Wulstgrößen ( $A_{FP} = 0\%$ , 4,5%, 9% und 13,5% von  $A_M$ ) erhalten haben [36] u. [37]. Diese zeigen deutlich, daß die Schleppleistungen des Schiffes mit größer werdendem Wulst im Geschwindigkeitsbereich  $V/\sqrt{L} > 0,8$  ( $F_n \approx 0,24$ ) abnehmen und im kleineren Geschwindigkeitsbereich zunehmen. Der Bugwulst bringt also bei schlanken Schiffen erst von einer bestimmten Geschwindigkeit an Vorteile, die um so größer sind, je größer der Bugwulst ist. Es werden noch umfangreiche Forschungsarbeiten und viele praktische Versuche notwendig sein, bis das Problem des Wulstbuges und die Übertragbarkeit von Modellversuchsergebnissen auf die Großausführung gelöst sein wird. Allgemein kann gesagt werden, daß es üblich ist, einen Wulst mit  $A_{FP} = 4\%$  bis  $8\%$  von  $A_M$  zu verwenden, weil ein solcher Wulst sowohl theoretisch als auch praktisch recht gute Ergebnisse für Schiffe mit  $V/\sqrt{L} > 0,8$  bringt [34]. Ist der Wulst kleiner als 4% der Hauptspantfläche, so hat er meist nur eine geringe Wirkung (zusätzliche Kosten für Konstruktion und Bau), und ist er größer als 8% der Hauptspantfläche, so ergeben sich, abgesehen von den Schwierigkeiten beim Anker, Docken usw. [33] [34] u. [38], auch noch andere Nachteile.

Wie bereits erwähnt, wirkt sich ein Bugwulst bei kleinen Froudezahlen ungünstig auf die Widerstandseigenschaften eines Schiffes aus. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die benetzte Oberfläche und damit auch der Reibungswiderstand des Schiffes mit Wulst größer ist als beim Schiff ohne Wulst, und daß der Anteil des Reibungswiderstandes am Gesamtwiderstand für kleine Geschwindigkeiten sehr groß und der Wellenwiderstandsanteil sehr klein ist. Dadurch überwiegt bei diesen Geschwindigkeiten der nachteilige Einfluß des Wulstes auf den Reibungswiderstand gegenüber dem Vorteil, der sich durch die Verringerung des Wellenwiderstandes ergibt [31] [33] [34] [43] u. [45], und zwar um so mehr, je größer der Wulst ist und je langsamer das Schiff fährt. Nachteilig kann sich ein großer Bugwulst auch dann auswirken, wenn er teilweise austaucht, wie es bei Ballastfahrt vorkommt [7] u. [33]. Hierbei können ungünstige Überlagerungen der Wellensysteme von Schiff und Wulstkörper im Bereich der oberen Wasserschichten zustande kommen, die wiederum die Wellenbildung (starke Ablenkung der Strömung) und Spritzwasserbildung verschlechtern und den Widerstand des Schiffes erheblich erhöhen. Unter Umständen ist es in solchen Fällen zweckmäßig, die Ballastwassermenge zu vergrößern oder mit zusätzlichen

Trimm tanks zu arbeiten, um den Wulst voll eintauchen zu lassen [7] u. [33]. In den Fällen, wo sich die Widerstandseigenschaften schnellerer Schiffe auch im Ballastzustand durch das Anbringen eines Bugwulstes verbessert haben, ist anzunehmen, daß der Wulst verhältnismäßig klein war und nicht austauchte, und daß sich infolge des kleineren Tiefganges eine relative Vergrößerung des Wulstes ergab, die diese Verbesserung ergab.

Auch in bezug auf die Seegangseigenschaften eines Schiffes mit Wulstbug gehen die Meinungen auseinander, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, daß die Untersuchungen, auf die sich die verschiedenen Aussagen stützen, jeweils mit anderen Schiffen, anderen Wulstbugformen oder auch unterschiedlichen Seegangsbedingungen ermittelt wurden. So kann ein Bugwulst, der beispielsweise bei langen, von vorn kommenden Wellen (Wellenlänge größer oder gleich der Schiffslänge) oder auch bei kurzen Wellen und kleinen Geschwindigkeiten die Widerstandseigenschaften eines Schiffes ungünstig beeinflusst, bei kurzen Wellen und höheren Geschwindigkeiten einen Leistungsgewinn bringen [36]. Andere Autoren haben festgestellt, daß ein Bugwulst, sofern er nicht extrem groß ist, keine Nachteile im Seegang zu bringen braucht [45], sondern sich sogar günstig auf den Schiffswiderstand auswirken kann [7] u. [43]. Demgegenüber sind auch Fälle bekannt, bei denen ein Bugwulst, besonders wenn er sehr groß war, das Gegenteil bewirkte [7] [34] [38] u. [49]; das gilt besonders bei Ballastfahrt, wenn der Wulst infolge der Schiffsbewegungen ständig ein- und austaucht. Die Schiffsbewegungen unterscheiden sich nur unwesentlich und sind eher günstiger gegenüber den Stampf- und Tauchbewegungen eines Schiffes ohne Wulst [33] [38] u. [43]. Außerdem verlängert der Wulst in der Regel die ebene Bodenpartie und vergrößert dadurch die Gefahr des Aufschlagens (slamming) [33] u. [34]. Die Manövriereigenschaften des Schiffes sollen durch einen Bugwulst nicht ungünstig beeinflusst werden.

Die in vorliegender Arbeit dargestellten Versuchsergebnisse sollen keine allgemeine Lösung für die aufgeworfenen Fragen geben. Sie stellen einen Beitrag zu dem Problem, welcher Wulst bei einem vorgegebenen Schiffstyp bei Glattwasser die günstigsten Widerstandswerte liefert, dar, welche Leistungseinsparungen sich erreichen lassen und wie groß der Tiefgangseinfluß auf den Wulsteffekt ist. Dabei ergibt sich allerdings das Problem der Übertragbarkeit von Modellversuchsergebnissen mit Bugwulst auf die Großausführung, das auch schon in [31] u. [35] behandelt worden ist.

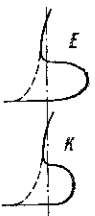
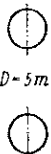




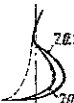





### 2.3. Untersuchung des Einflusses von Wulstbugformen auf den Schiffswiderstand

Wie aus der Fachliteratur hervorgeht, werden in immer stärkerem Maße auch Handelsschiffe, vor allem sehr

Modell Nr.	426	478	479	476	477	494	485/486
Modellmaßstab	33	32	32	31	31	30	25
$L_{PP}$ [m]	165,00	160,00	160,00	155,00	155,00	148,00	124,00
$B$ [m]	23,60	23,60	23,60	23,60	23,60	23,40	17,80
$H$ [m]	14,00	13,50	13,50	13,00	13,00	12,50	11,40
$T$ [m]	9,34	9,34	9,34	9,34	9,34	9,25	6,25
$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	20000	19400	20000	20000	20000	18320	7685
$C_{BPP}$	0,550	0,550	0,567	0,586	0,586	0,572	0,557
$C_M$	0,972	0,972	0,972	0,972	0,972	0,975	0,962
$C_{PPP}$	0,566	0,566	0,583	0,602	0,602	0,588	0,579
$L_{PP}/B$	6,99	6,78	6,78	6,57	6,57	6,32	6,97
$B/T$	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,85
$LCB$	-1,5%	-1,5%	-1,5%	-1,5%	-1,5%	-1,55%	-1,3%

Tafel 1

Zusammenstellung der Konstruktionsdaten der untersuchten Frachtschiffe  
 M 426 Ausgangsschiff  
 M 478  $C_{BPP} = \text{const.}$ ; Spantabstand von M 426 geändert  
 M 479  $\nabla = \text{const.}$ ; Spantflächenkurve von M 426 geändert  
 M 476  $\nabla = \text{const.}$ ; Spantflächenkurve von M 426 verzerrt, mit parallelem Mittelschiff  
 M 477  $\nabla = \text{const.}$ ; Spantflächenkurve nach *Lap.*, ohne paralleles Mittelschiff  
 M 494 „Oriental Queen“, mit Wulstbug  
 M 485 Kühlschiff, mit Wulstbug  
 M 486 Kühlschiff, ohne Wulstbug (Spantflächenkurve von M 485 geändert;  $LCB = \text{const.}$ )

Wulst Nr.	Seitenansicht des Wulstes	Wulstquerschnitt bei FP	A <sub>FP</sub> [m <sup>2</sup> ]	100·A <sub>FP</sub> /A <sub>W</sub> [%]	Bemerkungen
1, 2, 3		 D = 5 m	19,6	9,2	Wulst 1 läuft zylinderisch in den Schiffskörper ein. Wulst 2 läuft, sich nach hinten verjüngend (ϑ = 2,5°), in den Schiffskörper ein. Wulst 3 wie Wulst 2, jedoch (ϑ = 5°)
4			19,8	9,2	Wulstlinien gleichmäßig in den Spantcharakter eingestrukt. („Birnenwulst“)
5			20,0	9,3	Wulstlinien gleichmäßig in den Spantcharakter eingestrukt. („Tropfenwulst“)
6	wie Wulst 1	wie Wulst 1 nur D = 6 m	28,9	13,2	wie Wulst 1.
7			19,3 6,6	9,0 3,1	Wulst 7.0.1 ähnlich Wulst 5, nach hinten eingeschnürt. Wulst 7.0.2 durch Formverzerrung aus Wulst 7.0.1 entwickelt.
8			13,1	6,1	Wulst in Anlehnung an die Maierform entworfen.
9		 D <sub>max</sub> = 5 m	(19,6)	(9,2)	Torpedoförmiger Wulstkörper nach Nutku, in verschiedenen Stellungen am Vorschiff angebracht.
Zeichenerklärung: E: der Wulstkopf besteht aus einem Halbellipsoid, dessen Halbachse gleich dem Wulstdurchmesser ist. (für Wulst 1, 2, 3) K: der Wulstkopf besteht aus einer Halbkugel. ϑ: Winkel der größten Wulstwasserlinie zu MS.					

Tafel 2. Am Modell M 426 untersuchte Wulstformen

große und völlige Massengutfrachtschiffe, Tanker und schnelle, bis etwa 25 kn laufende Frachtschiffe, mit Bugwulsten ausgerüstet, weil die Anbringung eines Bugwulstes bei solchen Schiffen unter bestimmten Voraussetzungen den Widerstand erheblich verbessern kann und einen Geschwindigkeitsgewinn von 0,5 kn und mehr ergibt.

Um diese Widerstandsverminderung etwas näher zu untersuchen, d. h. um festzustellen, wie weit sich die Schleppleistung eines Schiffes durch Anbringen eines Bugwulstes verringern läßt, und vor allem, um für die ausgewählten Schiffen (siehe Tafel 1) eine möglichst günstige Wulstform zu ermitteln, wurde das Ausgangsmodell (M 426) nacheinander mit einer Reihe verschiedenartiger Bugwulste versehen und bei der Konstruktionsverdrängung  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$ , Schiff gleichlastig, und bei der Ballastverdrängung  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$ , Schiff 3,30 m hecklastig, geschleppt.

In Tafel 2 sind die am Ausgangsmodell (M 426) untersuchten Grundwulstformen dargestellt und Tafel 3 enthält eine Zusammenstellung sämtlicher Wulste, die an diesem Modell untersucht wurden, und die sich durch Veränderungen aus den Grundformen ergeben haben. Die Liniengestaltung der einzelnen Bugwulste ist durch die Darstellung der Spantenrisse und Vorschiffkonturen aus Bild 3 deutlich erkennbar. Ferner sind in Bild 4 die von der SVA entworfenen Wulstformen 1 bis 6 noch einmal gegenübergestellt. Von den untereinander ähnlichen Wulsten 1 bis 3, die alle einen kreisförmigen

Querschnitt von 5 m Durchmesser haben, ist Wulst 3.0.E dargestellt, ferner Wulst 4 mit birnenförmigem und Wulst 5 mit tropfenförmigem Querschnitt und Wulst 6, der ebenfalls einen kreisförmigen Querschnitt, jedoch von 6 m Durchmesser hat. Wulst 7.0.1 hat von der Seite her Ähnlichkeit mit dem Wulst 5, besitzt jedoch im Gegensatz zu diesem nach hinten stark eingeschnürte Wasserlinien. Aus diesem Wulst entstand durch Formverzerrung der schmalere Wulst 7.0.2, Wulst 8 wurde in Anlehnung an die Maierform (Patent angemeldet) und Wulst 9 nach einer Veröffentlichung von Nutku [39] entworfen. Die Linien der Wulste 4 und 5 sowie 7 und 8 wurden, wie aus den entsprechenden Spantenrisse auf Bild 3 hervorgeht, gleichmäßig in die Schiffslinien eingestrukt, während die Wulste 1 bis 3 und 6 nur mit einem kleinen Übergangsradius versehen in den Schiffskörper einlaufen. Wulst 9 wurde ohne Übergangsradius in verschiedenen Stellungen am Schiffskörper befestigt. Bei den SVA-Entwürfen wurden die Wulstquerschnittsgrößen und die Wulstlängen vor dem vorderen Lot (s. Tafel 2 und 3) anhand von Literaturangaben [32] bis [37] festgelegt.

Um festzustellen, ob die Wulste bei einem, beispielsweise 10 m kürzeren Schiff (M 477) bei der großen Verdrängung die gleichen Widerstandsverbesserungen ergeben wie bei dem Ausgangsschiff (M 426), wurden die aus den Versuchen mit M 426 ermittelten, widerstandsmäßig günstigsten Bugwulstformen 1.1.E und 5.0.3 auch am Modell M 477 untersucht. Im Gegensatz zu M 426 läuft der Wulst 1.1.E bei diesem Modell jedoch ohne Übergangsradien in den Schiffskörper ein. Bei diesem Modell wurden die Widerstandswerte für mehrere Verdrängungen ermittelt, um den Einfluß des Tiefgangs auf den Wulsteffekt zu erfassen.

#### 2.4. Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Schiffslängen auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften

Um den Einfluß der Schiffslänge bzw., was in diesem Falle dasselbe ist, den Einfluß des Völligkeitsgrades der Verdrängung auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften zu ermitteln, wurden außer dem 165 m langen Ausgangsschiff (M 426) zwei 160 m lange Schiffe (M 478 und M 479) und zwei 155 m lange Schiffe (M 476 und M 477) untersucht. Die Spantenrisse sowie die in Anlehnung an M 426 entworfenen Vor- und Hinterstevenkonturen dieser Entwürfe sind in Bild 5 und 6 dargestellt. Eine Gegenüberstellung der Spantflächenkurven aller 5 Entwürfe zeigt Bild 7; in Tafel 4 sind die zugehörigen Zahlenwerte angegeben.

Wie aus Tafel 1 hervorgeht, wurden für alle 5 SVA-Entwürfe die Breite mit 23,60 m, der Tiefgang mit 9,34 m, der Völligkeitsgrad des Hauptspantes mit 0,972 und die Lage des Verdrängungsschwerpunktes mit  $-1,5\%$  von  $L_{PP}$  beibehalten. Da der Völligkeitsgrad der Verdrängung des ersten 160-m-Entwurfes (M 478) der gleiche wie bei dem Ausgangsschiff war ( $C_{BPP} = 0,550$ ), ergab sich für diesen Entwurf eine um etwa  $600 \text{ m}^3$  kleinere Verdrängung. Demgegenüber wurde beim zweiten 160-m-Entwurf (M 479) die Verdrängung mit  $20000 \text{ m}^3$  beibehalten, so daß sich der Völligkeitsgrad der Verdrängung auf 0,567 vergrößerte. Die beiden 150 m langen Schiffe wurden für  $20000 \text{ m}^3$  Verdrängung entworfen. Der erste Entwurf (M 476) entstand durch Verzerrung der Spantflächenkurve des Ausgangsschiffes (M 426) und erhielt durch das benutzte Verzerrungsverfahren ein etwa 13 m langes paralleles Mittelschiff. Der zweite Entwurf (M 477), mit dem auch Bugwulstuntersuchungen gemacht wurden, war nach der Spantflächenverteilung von Lap entworfen worden und hatte kein paralleles Mittelschiff. Der Völligkeitsgrad der Verdrängung der beiden 155-m-Schiffe vergrößerte sich

Wulstbezeichnung	Wulstlänge $L_W$ vor FP		$\nabla = 20000 \text{ m}^3$				$\nabla = 10850 \text{ m}^3, 3,30 \text{ m heckl}$			
	[m]	[% v. L <sub>PP</sub> ]	$T_m$ [m]	S [m <sup>2</sup> ]	$\Delta S^1$ [%]	LCB [% v. L <sub>PP</sub> ]	$L_{WL}^2$ [m]	$T_m$ [m]	S [m <sup>2</sup> ]	$\Delta S^1$ [%]
—	—	—	9,34	4740	0	-1,5	160,4	5,58	3409	0
1.0.E	5,00	3,0	9,23	4838	2,1	-0,7	166,1	5,48	3527	3,5
1.1.E	6,65	4,0	9,22	4860	2,5	-0,7	167,7	5,47	3548	4,1
1.2.E	8,30	5,0	9,21	4882	3,0	-0,6	169,4	5,46	3574	4,8
1.0.K	2,50	1,5	9,24	4811	1,5	-0,8	163,6	5,49	3501	2,7
1.1.K	4,15	2,5	9,23	4833	1,9	-0,7	156,2	5,48	3522	3,4
1.2.K	5,80	3,5	9,22	4855	2,4	-0,7	166,9	5,47	3543	3,9
2.0.E	5,00	3,0	9,25	4805	1,3	-0,9	166,1	5,50	3487	2,3
2.1.E	6,65	4,0	9,24	4826	1,8	-0,8	167,7	5,49	3508	2,9
2.2.E	8,30	5,0	9,23	4848	2,3	-0,7	169,4	5,48	3528	3,5
2.1.K	4,15	2,5	9,26	4799	1,2	-0,9	165,2	5,51	3483	2,2
3.0.E	5,00	3,0	9,26	4802	1,3	-1,0	166,1	5,51	3487	2,3
3.1.E	6,65	4,0	9,25	4823	1,7	-0,9	167,7	5,50	3508	2,9
3.2.E	8,30	5,0	9,24	4845	2,2	-0,8	169,4	5,49	3528	3,5
3.1.K	4,15	2,5	9,27	4796	1,2	-1,0	165,2	5,52	3482	2,2
4.0.1	2,35	1,4	9,24	4794	1,1	-0,8	163,4	5,49	3487	2,3
4.0.2	4,00	2,4	9,23	4811	1,5	-0,8	165,1	5,48	3501	2,7
4.0.3	5,65	3,4	9,22	4829	1,8	-0,7	166,7	5,47	3522	3,3
5.0.1	1,95	1,2	9,25	4811	1,5	-0,9	163,0	5,50	3514	3,2
5.0.2	3,60	2,2	9,24	4831	1,9	-0,8	—	—	—	—
5.0.3	5,25	3,2	9,23	4852	2,4	-0,8	166,3	5,48	3560	4,4
6.0.E	6,00	3,6	9,14	4858	2,5	-0,2	167,1	5,40	3584	5,2
6.1.E	7,65	4,6	9,13	4884	3,0	-0,1	168,7	5,39	3615	6,0
6.2.E	9,30	5,6	9,12	4911	3,6	0	170,4	5,38	3641	6,9
6.1.K	4,65	2,8	9,15	4845	2,2	-0,2	165,7	5,41	3571	4,8
7.0.1	4,95	3,0	9,28	4812	1,5	-1,1	166,0	5,53	3501	2,7
7.0.2	3,30	2,0	9,33	4780	0,8	-1,4	164,4	5,58	3459	1,5
8.0.1	4,13	2,5	9,29	4806	1,4	-1,2	165,2	5,54	3500	2,9
9.0.1	5,00	3,0	9,31	4900	3,4	-1,3	—	—	—	—
9.0.2	5,00	3,0	9,27	4865	2,7	-1,0	—	—	—	—
9.0.3	5,00	3,0	9,27	4865	2,7	-1,0	—	—	—	—
9.0.4	0	0	9,27	4848	2,3	-1,1	—	—	—	—
9.0.5	0	0	9,31	4893	3,2	-1,3	—	—	—	—
9.0.6	5,00	3,0	9,27	4865	2,7	-1,0	—	—	—	—

Tafel 5

Wulstkeingrößen und Einfluß der Wulste auf Länge, Tiefgang, Oberfläche und Schwerpunktlage des 165 m langen Ausgangsschiffes (M 426)

$$^1) \Delta S = \left( \frac{S_{\text{mit Wulst}}}{S_{\text{ohne Wulst}}} - 1 \right) \cdot 100 [\%]$$

Die relativ großen Oberflächenunterschiede zwischen Schiff mit und ohne Wulst bei der Ballastverdrängung kommen dadurch zustande, daß die benetzte Oberfläche des Schiffes mit Wulst für den Fahrzustand ermittelt wurde (vgl. Text). Das gilt auch für Wulst 9.0.1 und 9.0.4 bei  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$

<sup>2)</sup> Bei Ballastverdrängung wurde die gesamte Länge des Bugwulstes in die Wasserlinienlänge des Schiffes einbezogen.

Bei Konstruktionsverdrängung wurde der Tiefgangseinfluß auf die Wasserlinienlänge des Schiffes nicht berücksichtigt.

proportional der Verkürzung ( $C_{BPP155} = C_{BPP165} \cdot 165/155 = 0,586$ ), da alle anderen Hauptabmessungen konstant gehalten wurden.

### 2.5. Vergleich der Widerstands- und Propulsionseigenschaften

Um Vergleichsmöglichkeiten über die Güte der untersuchten Schiffs- und Wulstformen zu bekommen, wurde außerdem nach den aus der Literatur [28] bekannten Unterlagen das Modell M 494 gebaut. Es entspricht der 148 m langen „Oriental Queen“, ein für 19,5 kn Dienstgeschwindigkeit ausgelegtes Schiff mit einer Antriebsleistung von 12800 PS bei 119 U/min. Im Hinblick auf Breite, Tiefgang, Völligkeitsgrade und Schwerpunktlage stimmt dieses Fahrzeug mit dem 160-m-SVA-Entwurf (M 479) recht gut überein. Ferner wurden von einem kleineren schnellen Kühlschiff für Vergleichszwecke die Modelle M 485 und M 486 hergestellt und untersucht. Um den Einfluß der Wulste dieser beiden Fahrzeuge auf den Schiffswiderstand zu ermitteln, wurden die Modelle zunächst im Originalzustand, d. h. mit Wulstbug, und anschließend mit abgearbeitetem Wulstbug geschleppt. Durch das Abarbeiten des Wulstbuchs ergaben sich für gleichbleibende Verdrängungen etwas andere Tiefgänge und, was den Widerstand u. U. noch mehr beeinflussen kann, auch andere Schwerpunktlagen. Um den Einfluß auch dieser Schwerpunktänderung zu erfassen, d. h. um sagen zu können, welche Widerstandsänderung auf den Bugwulst zurückzuführen ist, und wie groß der Anteil an der Widerstandsänderung ist, der sich auf Grund der Schwerpunktverlagerung ergibt, wurde von dem Kühlschiff unter Beibehaltung der Hauptabmessungen und Völligkeitsgrade ein zweites Modell (M 486) ohne Wulstbug entworfen. Dieses hatte bei Konstruk-

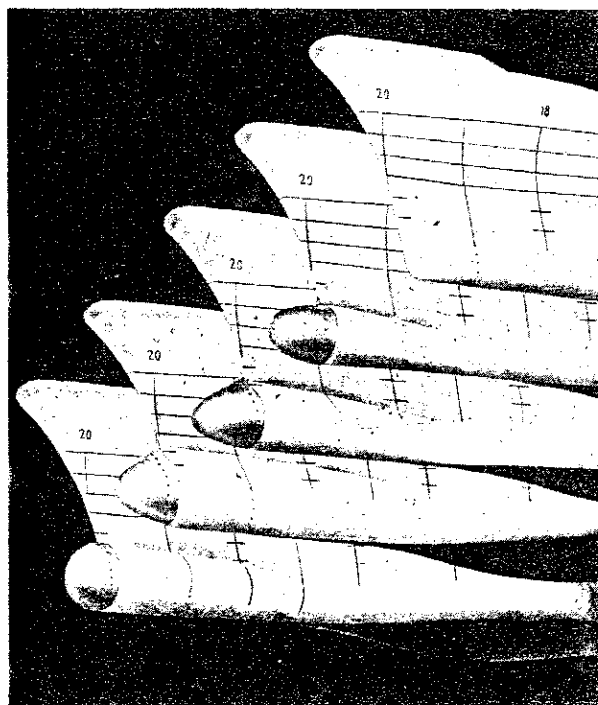
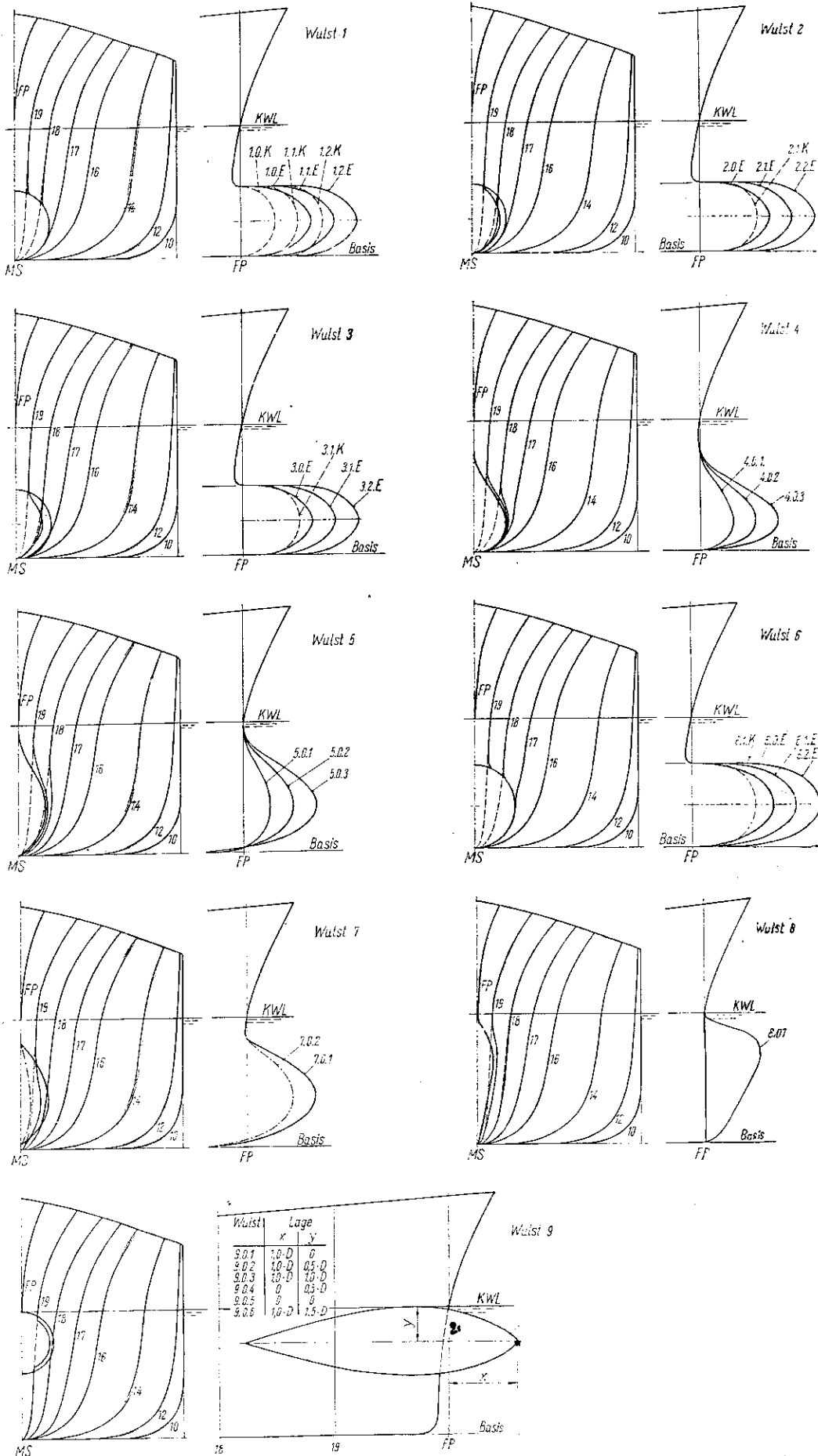


Bild 4. Am Modell des Ausgangsschiffes (M 426) untersuchte Wulstformen 1 bis 6



**Bild 3.**  
Übersicht über die am Ausgangsschiff unter-  
suchten Bugwulstformen

Cwp = 0,564 0,586 0,600 0,605

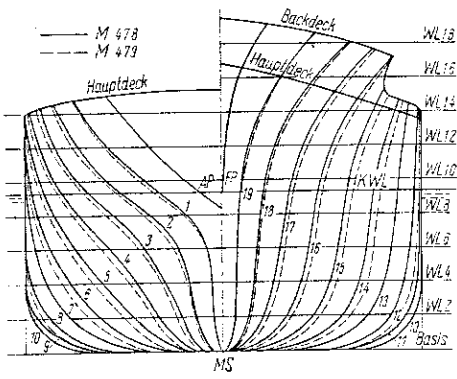


Bild 5. Spantenrisse der 160-m-Varianten, Modell M 478 und M 479

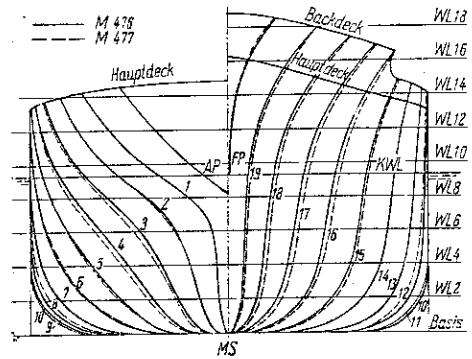


Bild 6. Spantenrisse der 155-m-Varianten, Modell M 476 und M 477

tionszustand die gleiche Schwerpunktlage wie das Modell mit Wulst (M 485); LCB = - 1,6% von L<sub>PP</sub>. (Durch das Abarbeiten des Wulstbuchs hatte sich der Verdrängungsschwerpunkt bei M 485 von -1,6% auf -2,2% verschoben).

Die Spantenrisse und Vor- und Hinterstevkonturen der Vergleichsschiffe sind in Bild 8 und 9 dargestellt, die Hauptdaten der Schiffe in Tafel 1.

Tafel 1. Werte für die in Bild 7 dargestellten Spantflächenverteilungen

Modell Nr.	426/478	479	476*)	477
L <sub>PP</sub> [m]	165/160	160	155	155
C <sub>BPP</sub>	0,55	0,567	0,586	0,586
∇ [m <sup>3</sup> ]	20000/19400	20000	20000	20000
AP	0,007	0,007	0,007	0,007
Spt. 0,5	0,028	0,031	0,027	0,028
1	0,093	0,098	0,105	0,106
1,5	0,139	0,167	0,174	0,177
2	0,225	0,237	0,248	0,259
3	0,361	0,381	0,394	0,430
4	0,506	0,534	0,567	0,596
5	0,653	0,685	0,722	0,739
6	0,784	0,816	0,854	0,847
7	0,891	0,916	0,942	0,927
8	0,959	0,974	0,983	0,975
9	0,993	0,998	0,999	0,998
10	1,000	1,000	1,000	1,000
11	0,978	0,990	0,995	0,982
12	0,915	0,940	0,960	0,934
13	0,812	0,843	0,879	0,854
14	0,681	0,715	0,752	0,747
15	0,540	0,567	0,605	0,616
16	0,399	0,420	0,448	0,469
17	0,270	0,236	0,301	0,322
18	0,160	0,179	0,178	0,190
19	0,071	0,075	0,077	0,085
FP	0	0	0	0

\*) mit parallelem Mittelschiff

### 3. Versuchsdurchführung und Auswertung

#### 3.1. Beschreibung der Modelle

Die von den 5 SVA-Entwürfen angefertigten Modelle waren aus Holz hergestellt und hatten alle eine Länge von 5,0 m zwischen den Loten; damit betrug der Modellmaßstab  $\lambda = 31, 32$  bzw. 33. Die Modelle der Vergleichsschiffe waren knapp 5 m lang. Das Modell M 494 („Oriental Queen“) war ebenfalls aus Holz im Maßstab  $\lambda = 30$  angefertigt, während die Modelle M 485 und M 486 (Kühlschiffe) aus Paraffin und im Maßstab  $\lambda = 25$  hergestellt waren. An allen Modellen waren auf Spant 19 (1/20 L<sub>PP</sub> hinter FP) die von Hughes [50] empfohlenen Stifte zur Erzeugung turbulenter Strömung angebracht. Bei den Modellen mit Wulst waren zusätzliche Stifte auf dem Wulst auf 2/3 der Wulstlänge angebracht.

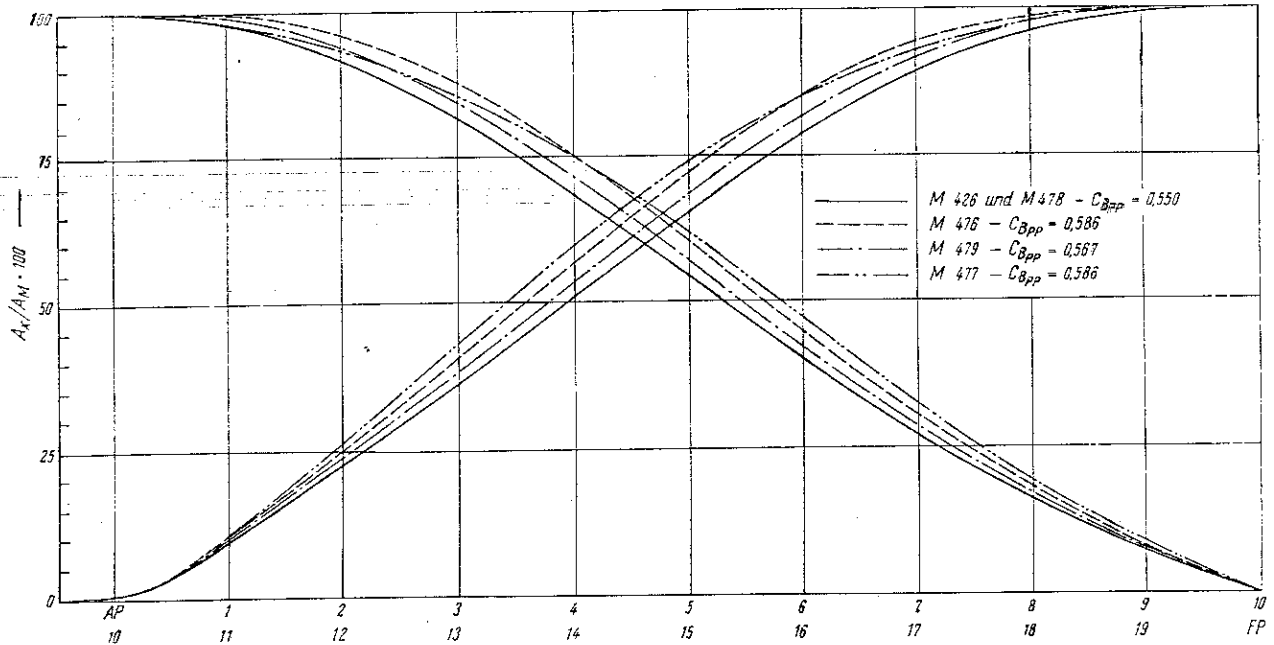


Bild 7. Prozentuale Spantflächenverteilung der 5 SVA-Entwürfe (A<sub>M</sub> = 214,3 m<sup>2</sup>)



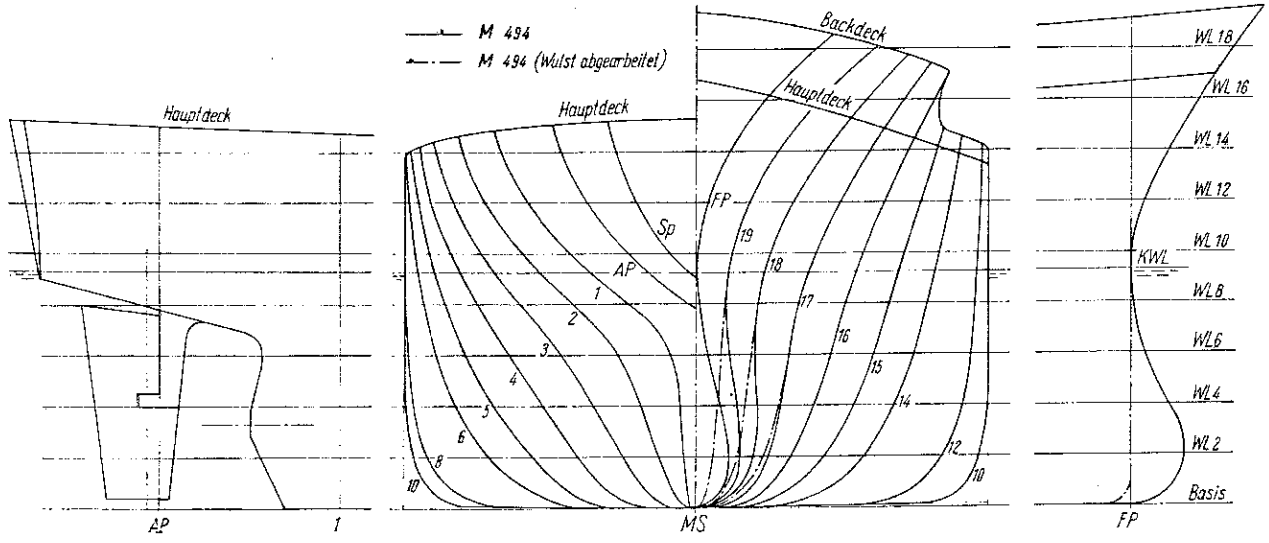


Bild 8. Spantenriff und Stevenkonturen des Modells M 494 („Oriental Queen“)

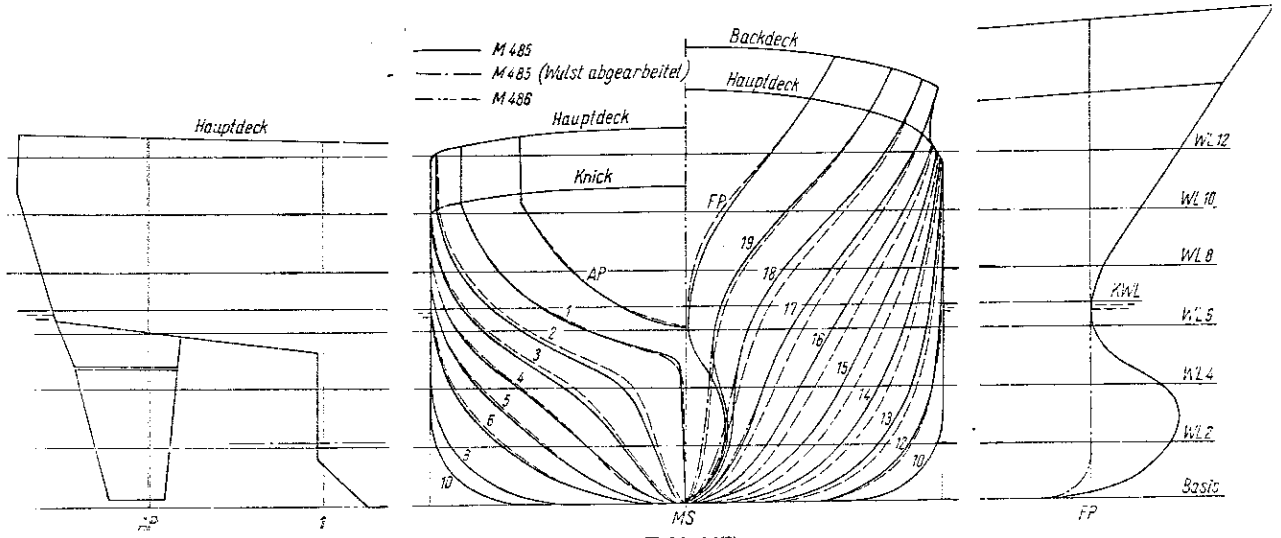


Bild 9. Spantenrisse und Stevenkonturen der Modelle M 485 und M 486 (Kühlschiff)

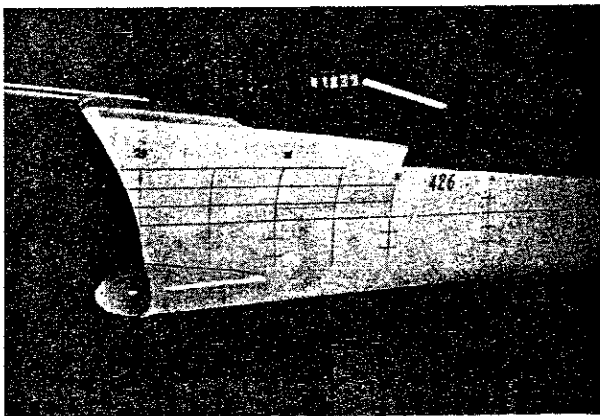


Bild 10. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 3.0.E

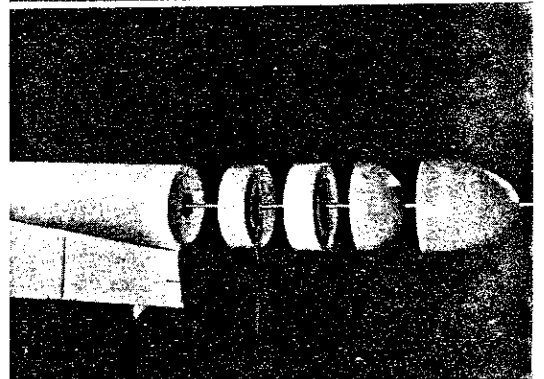
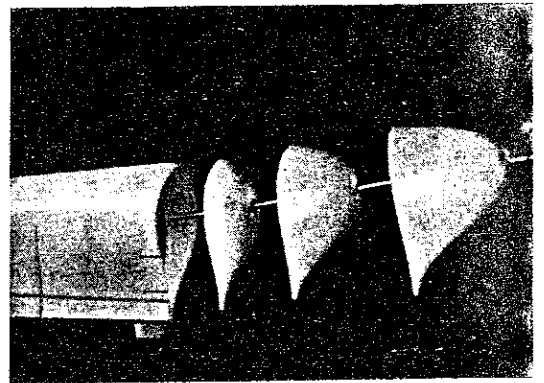


Bild 11 (rechts). Vorschiffseinsätze für das Grundmodell (M 426)

oben: Wulst 3 mit Varianten  
 unten: Wulst 5 mit Varianten

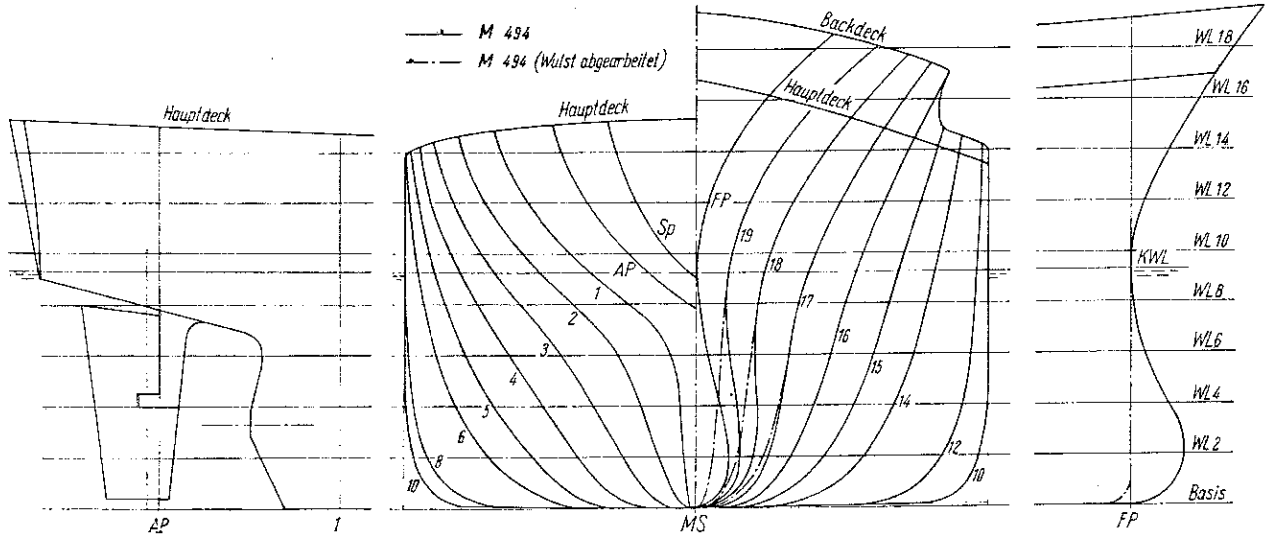


Bild 8. Spantenriff und Stevenkonturen des Modells M 494 („Oriental Queen“)

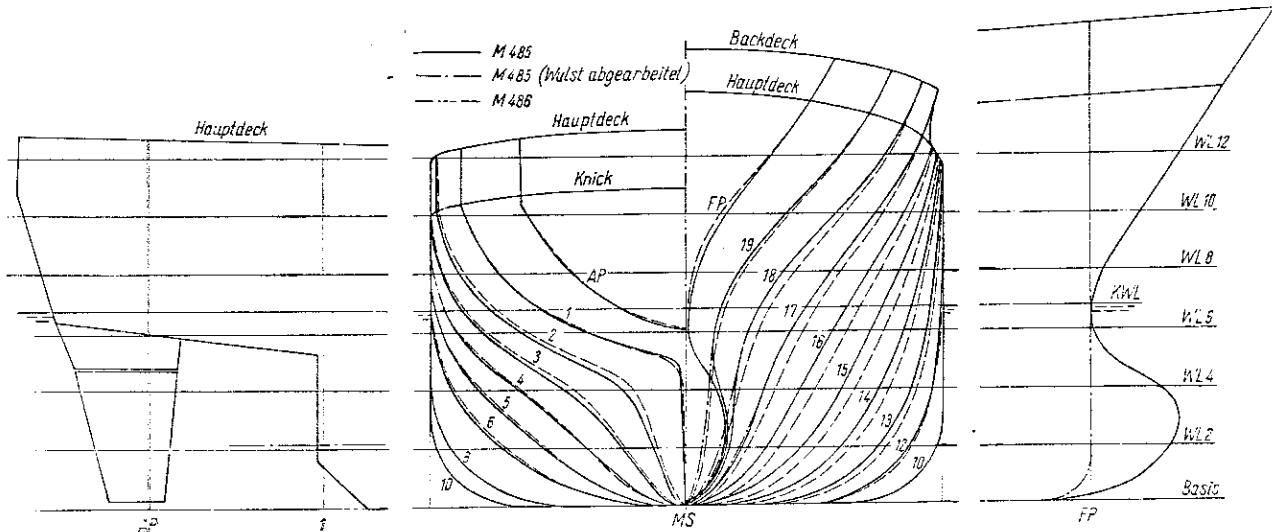


Bild 9. Spantenrisse und Stevenkonturen der Modelle M 485 und M 486 (Kühlschiff)

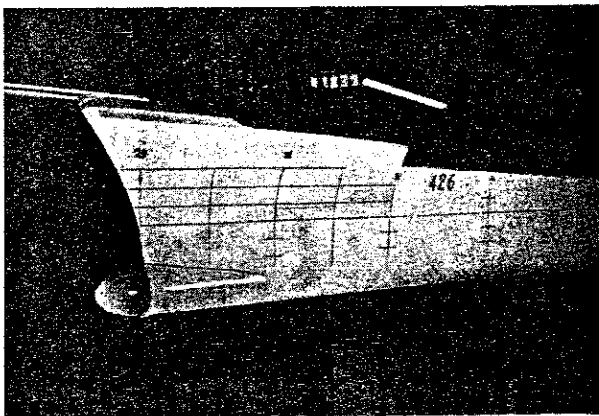


Bild 10. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 3.0.E

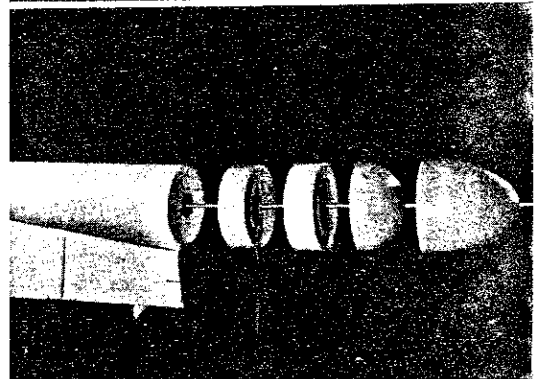
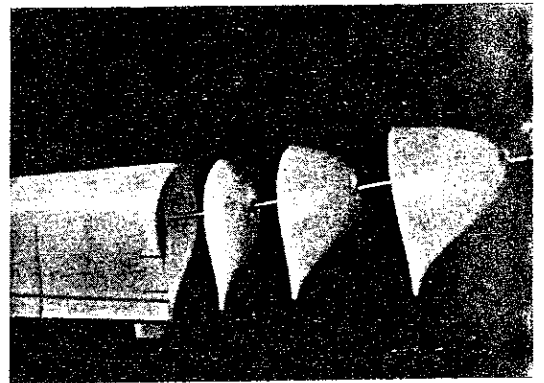


Bild 11 (rechts). Vorschiffseinsätze für das Grundmodell (M 426)

oben: Wulst 3 mit Varianten  
 unten: Wulst 5 mit Varianten

Um die Wulstbuguntersuchungen mit einem möglichst geringen Zeit- und Kostenaufwand durchführen zu können, waren die beiden Modelle M 426 und M 477 so vorbereitet, daß sich das Unterwasservorschiff bis Spant 16 auswechseln ließ. Aus dem Wulst 1 entstand durch Abarbeiten des Wulstlaufes ins Modell der Wulst 2 und aus dem Wulst 2 der Wulst 3 (Bild 10). Auch wurden die verschiedenen Wulsteinsätze nicht aus einem Stück, sondern mit abnehmbarem, z. T. sogar zerlegbarem Wulstkopf gebaut, wie es Bild 11 zeigt. Auf diese Weise war es möglich, in relativ kurzer Zeit die Bugwulste auszuwechseln und so ohne besondere Schwierigkeiten eine große Anzahl von Wulsten an ein und demselben Modell zu untersuchen. Ebenso ließ sich auch durch das in der Hauptspantebene teilbare Grundmodell (M 426) ein anderes Hinterschiff, nämlich das mit Spiegelheck, anfügen (M 426B).

### 3.2. Durchgeführte Modellversuche

Mit dem Grundmodell (M 426) wurden Widerstandsversuche für die gleichlastige Konstruktionsverdrängung  $\nabla = 20\,000\text{ m}^3$  und für eine angenommene Ballastverdrängung  $\nabla = 10\,850\text{ m}^3$ , Schiff 3,30 m (entsprechend 2% von  $L_{PP}$ ) hecklastig vertrimmt, durchgeführt. Auch die Bugwulstuntersuchungen und die Untersuchungen über den Einfluß der Heckform auf den Widerstand wurden bei diesen beiden Verdrängungen gemacht.

Die drei Modellvarianten M 476, M 477 und M 479 wurden bei folgenden, auf die Großausführung umgerechneten Verdrängungen untersucht:

- $\nabla = 20\,000\text{ m}^3$ , gleichlastig, ( $T = 1,0 \cdot T_{KWL} = 9,340\text{ m}$ )
- $\nabla = 15\,250\text{ m}^3$ , gleichlastig, ( $T = 0,8 \cdot T_{KWL} = 7,472\text{ m}$ )
- $\nabla = 15\,250\text{ m}^3$ , 1% von  $L_{PP}$  hecklastig
- $\nabla = 10\,850\text{ m}^3$ , gleichlastig, ( $T = 0,6 \cdot T_{KWL} = 5,604\text{ m}$ )
- $\nabla = 10\,850\text{ m}^3$ , 2% von  $L_{PP}$  hecklastig

Außerdem wurden mit dem Modell M 477 zur Ermittlung des Widerstandseinflusses des Bugwulstes in Abhängigkeit vom Tiefgang noch Widerstandsversuche für folgende Verdrängungen durchgeführt:

- $\Delta = 13\,192\text{ m}^3$ , 1,5% von  $L_{PP}$  hecklastig, ( $T = 0,7 \cdot T_{KWL} = 6,538\text{ m}$ )
- $\nabla = 8\,700\text{ m}^3$  gleichlastig, ( $T = 0,5 \cdot T_{KWL} = 4,670\text{ m}$ )
- $\nabla = 6\,675\text{ m}^3$  gleichlastig, ( $T = 0,4 \cdot T_{KWL} = 3,736\text{ m}$ )

Das Modell M 478, das für eine andere Verdrängung ausgelegt worden war, wurde außer bei den gleich- und hecklastigen Verdrängungen  $20\,000\text{ m}^3$ ,  $15\,250\text{ m}^3$  und  $10\,850\text{ m}^3$  auch noch für folgende Zustände untersucht:

- $\nabla = 19\,400\text{ m}^3$  gleichlastig, ( $T = 1,0 \cdot T_{KWL} = 9,340\text{ m}$ )
- $\nabla = 10\,250\text{ m}^3$  2% von  $L_{PP}$  hecklastig, ( $T = 0,6 \cdot T_{KWL} = 5,604\text{ m}$ )

Die Verdrängungen der Vergleichsschiffe wurden wie folgt festgelegt:

Für M 494 („Oriental Queen“)

- $\nabla = 18\,320\text{ m}^3$ , gleichlastig, ( $T = 1,0 \cdot T_{KWL} = 9,250\text{ m}$ )
- $\nabla = 13\,950\text{ m}^3$ , gleichlastig, ( $T = 0,8 \cdot T_{KWL} = 7,400\text{ m}$ )

$$\nabla = 12\,000\text{ m}^3, \text{ etwa } 1,5\% \text{ von } L_{PP} \text{ hecklastig, } (T = 0,7 \cdot T_{KWL} = 6,475\text{ m})$$

$$\nabla = 9\,900\text{ m}^3, \text{ gleichlastig und etwa } 2\% \text{ von } L_{PP} \text{ hecklastig, } (T = 0,6 \cdot T_{KWL} = 5,500\text{ m})$$

Für M 485 und M 486 (Kühlschiff)

$$\nabla = 8\,533\text{ m}^3, \text{ gleichlastig, } (T = 1,0 \cdot T_{\max} = 6,800\text{ m})$$

$$\nabla = 7\,685\text{ m}^3, \text{ gleichlastig, } (T_{KWL} = 0,92 \cdot T_{\max} = 6,250\text{ m})$$

$$\nabla = 6\,379\text{ m}^3, \text{ gleichlastig und etwa } 1\% \text{ von } L_{PP} \text{ hecklastig, } (T = 0,8 \cdot T_{\max} = 5,440\text{ m})$$

$$\nabla = 5\,345\text{ m}^3, 0,80\text{ m} \text{ hecklastig, } T = 0,7 \cdot T_{\max} = 4,750\text{ m})$$

$$\nabla = 4\,413\text{ m}^3, \text{ gleichlastig, } (T = 0,6 \cdot T_{\max} = 4,080\text{ m})$$

Um auch Anhaltswerte für die Sog- und Mitstromziffern sowie die benötigten Wellenleistungen zu erhalten, wurden mit einigen Modellen für verschiedene Beladungszustände Propulsionsversuche durchgeführt.

Insbesondere wurden die Zustände „Schiff voll beladen“ und „Schiff in Ballastfahrt“ jeweils unter den der Probefahrt entsprechenden Bedingungen untersucht. Bei der Berechnung des Reibungsabzuges mit Hilfe der Schoenherrschen Reibungsbeiwerte wurde für diese Schiffslängen etwa übliche Rauheitszuschlag  $\Delta C_F = 0,0002$  sowie ein Probefahrtzuschlag  $\Delta C_F = 0,00016$  gewählt.

Diese Versuche wurden im Gegensatz zu den Widerstandsversuchen mit einem Spantenruder (NACA-Profil 0015) durchgeführt.

Für den Antrieb der Modelle wurde ein SVA-Modellpropeller mit verstellbaren Flügeln von 200 mm Durchmesser benutzt ( $A_D/A_0 = 0,55$ ,  $Z = 4$ , Typ Wageningen). Das Steigungsverhältnis des Propellers wurde für das Ausgangsschiff (M 426) so festgelegt, daß sich im vollbeladenen Zustand bei der vorgesehenen Probefahrtgeschwindigkeit von 25 kn eine Propellerdrehzahl von etwa 140 U/min ergab. Bei den anderen Modellen wurde das Steigungsverhältnis in den Grenzen von 0,80 bis 1,04 variiert, um in begrenztem Maße den Einfluß desselben auf die Propulsionseigenschaften des Schiffes zu erkennen.

### Übersicht über die durchgeführten Modellversuche

Modell Nr.	Widerstandsversuche		Propulsionsversuche
	ohne Wulst	mit Wulst	
M 426	6	59	2
M 426B	2	—	2
M 476	5	—	—
M 477	8	16	4
M 478	7	—	4
M 479	6	—	1
M 485	2	8	—
M 486	6	—	—
M 494	5	7	3

### 3.3. Auswertung der Versuche

Um die Ergebnisse dieser Versuche in dimensionsloser Form zu erhalten und vor allem auch, um die Widerstandsunterschiede zwischen den verschiedenen Wulstformen bzw. zwischen Schiff mit und ohne Wulst recht deutlich zu erkennen, wurden die auf die Verdrängung bezogenen Restwiderstandsbeiwerte miteinander verglichen

$$C_{R\nabla} = \frac{R_R}{\rho \cdot g \cdot \nabla^2 \cdot \nabla^{2/3}}$$

In dieser Formel sind:

- $R_R$  [kp] = Restwiderstand
- $\varrho^*$  [kp s<sup>2</sup>m<sup>-4</sup>] =  $\varrho/9,81$  [kp s<sup>2</sup>m<sup>-4</sup>], mit  $\varrho$  [kg m<sup>-3</sup>]
- = Dichte des Wassers
- $v$  [ms<sup>-1</sup>] = Geschwindigkeit
- $\nabla$  [m<sup>3</sup>] = Verdrängung

Diese Darstellung hat den Vorteil, daß die Restwiderstände aller Wulstvarianten bei konstanter Verdrängung immer auf denselben, nur von der Geschwindigkeit abhängigen Wert bezogen werden und sich deshalb auch über den Beiwert  $C_{R\nabla}$  direkt miteinander vergleichen lassen.

Der zur Bestimmung von  $C_{R\nabla}$  erforderliche Restwiderstand  $R_R'$  ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamtwiderstand  $R_T'$  und dem Reibungswiderstand

$R_F'$  des Modells. Bei der Berechnung der Reibungswiderstände  $R_F'$  wurde die Länge zwischen den Loten  $L_{FP}'$  eingesetzt.

Die  $C_{R\nabla}$ -Werte sind in Abhängigkeit von der auf  $L_{FP}$  bezogenen Froudezahl  $F_{nFP}$  bzw. in Abhängigkeit von der Schiffgeschwindigkeit  $V$  für einander ähnliche Wulstformen in den Bildern 12 bis 21 dargestellt. Zum Vergleich wurden in jedes Diagramm die  $C_{R\nabla}$ -Werte von M 426 ohne Wulst und mit Wulst 1.1.E eingetragen. Der Wulst 1.1.E zeigte bei diesem Schiff und  $\nabla = 20000$  m<sup>3</sup> besonders günstige Versuchswerte.

Sollen aus den in den Diagrammen dargestellten  $C_{R\nabla}$ -Werten die üblicherweise auf die Wasserlinienlänge  $L_{WL}'$  bezogenen Restleistungen  $P_{ER}$  ermittelt werden, dann ist ein Korrekturfaktor  $\kappa_1$  erforderlich ( $\kappa_1$  hängt sowohl von der Wasserlinienlänge als auch von der Geschwindigkeit ab).

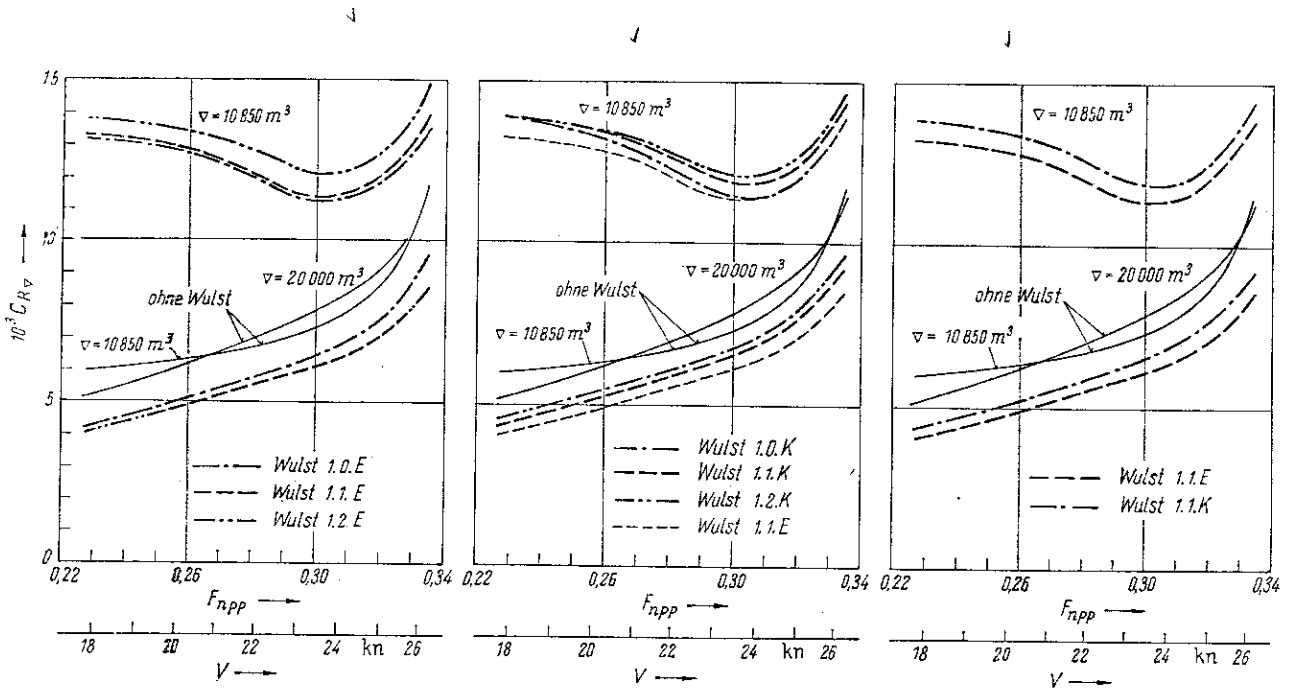


Bild 12

Einfluß der Wulstlänge und der Wulstkopfausführung auf die  $C_{R\nabla}$ -Werte bei M 426 für Wulst 1

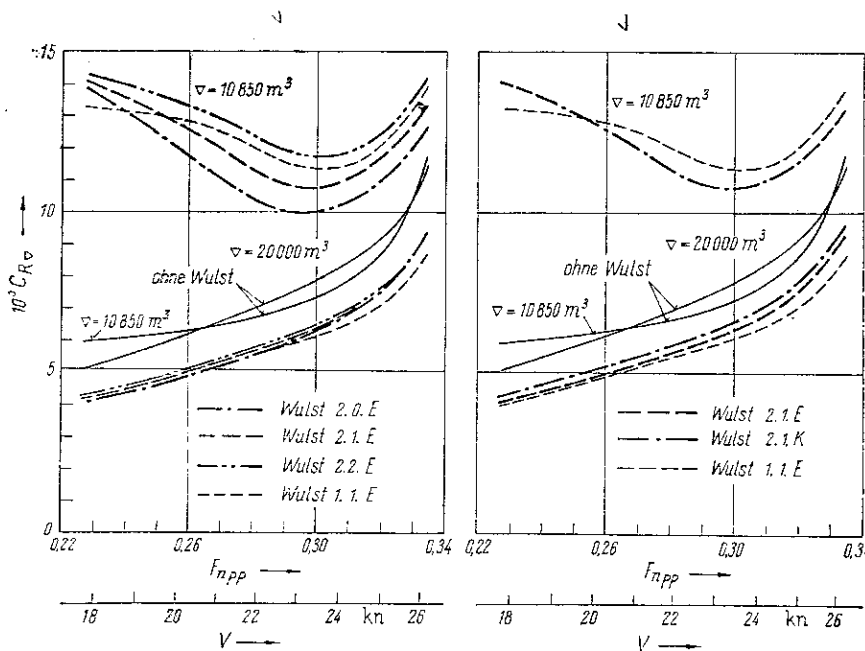


Bild 13

Einfluß der Wulstlänge und der Wulstkopfausführung auf die  $C_{R\nabla}$ -Werte bei M 426 für Wulst 2

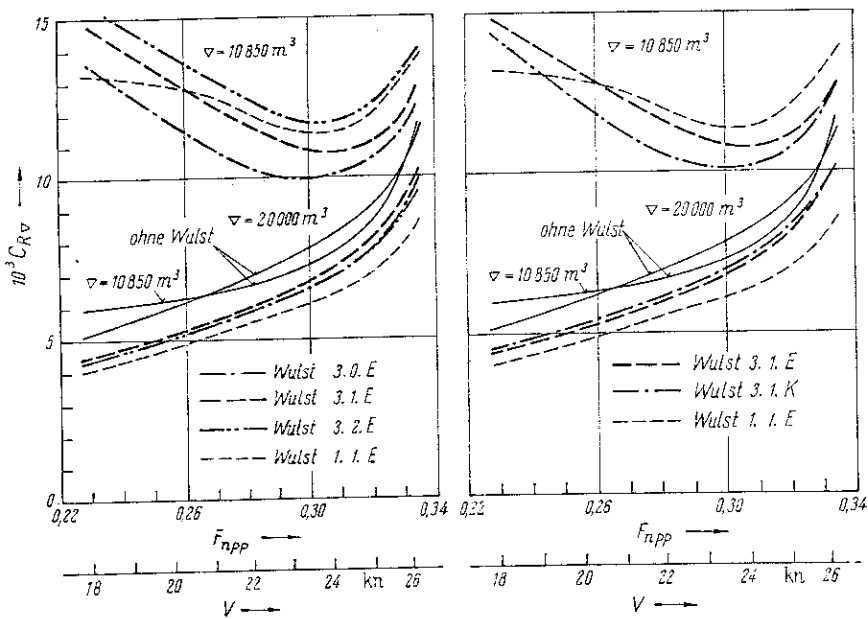


Bild 11.

Einfluß der Wulstlänge und der Wulstkopfausführung auf die  $C_{R\bar{V}}$ -Werte bei M 426 für Wulst 3

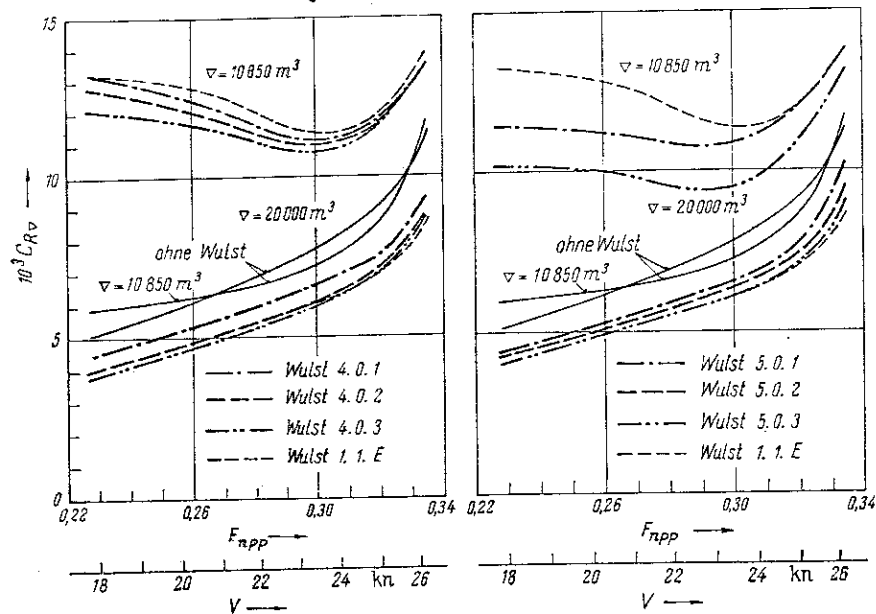


Bild 15.

Einfluß der Wulstkopfausführung auf die  $C_{R\bar{V}}$ -Werte bei M 426 für Wulst 4 und 5

Tafel 5. Schleppeleistungen für das Ausgangsschiff (Schoenherr mit  $\Delta C_F = 0,00036$ ).

V	$\bar{V} = 20000 \text{ m}^3$ gleichlastig			$\bar{V} = 10850 \text{ m}^3$ 3,30 m hecklastig		
	PET	PEF	PER	PET	PEF	PER
	PS	PS	PS	PS	PS	PS
kn						
13	2402	1883	519	1918	1302	556
14	3054	2335	719	2391	1688	703
15	3826	2852	974	2940	2061	879
16	4732	3439	1293	3572	2487	1085
17	5792	4101	1691	4292	2966	1326
18	6996	4841	2155	5100	3498	1602
19	8403	5664	2739	6014	4096	1918
20	9997	6572	3425	7045	4753	2292
21	11899	7570	4329	8204	5473	2731
22	13917	8662	5255	9517	6262	3255
23	16376	9862	6314	11053	7129	3924
24	19205	11152	7603	12895	8066	4829
24,5	20827	11844	8983	13964	8587	5397
25	22950	12559	10091	15263	9078	6185
25,5	24741	13310	11431	16785	9618	7167
26	27318	14078	13240	18941	10177	8764

Es ist dann:

$$\begin{aligned}
 P_{ER} &= \alpha_1 \frac{R_R \cdot v}{75} \\
 &= \alpha_1 \frac{\rho^* \cdot v^3 \cdot \bar{V}^{2/3}}{2 \cdot 75} \cdot C_{R\bar{V}} \\
 &= \alpha_1 \frac{v \cdot 0,5144^2 \cdot V^3 \cdot \bar{V}^{2/3}}{9,81 \cdot 2 \cdot 75} \cdot C_{R\bar{V}} \\
 &= 92,53 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha_1 \cdot \rho \cdot \bar{V}^{2/3} \cdot C_{R\bar{V}} \cdot V^3
 \end{aligned}$$

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, daß  $\alpha_1$  bei der großen Verdrängung und 18 km Geschwindigkeit bei etwa 1,02 liegt und mit zunehmender Geschwindigkeit fast linear auf etwa 1,01 bei  $V = 25$  kn absinkt, und zwar unabhängig davon, ob das Schiff einen Bugwulst hatte oder nicht. Bei der Ballastverdrängung ergab sich fast unabhängig von der Geschwindigkeit ein Wert für  $\alpha_1$  von 0,985 beim Schiff ohne Wulst und von 1,005 beim Schiff mit Wulst.

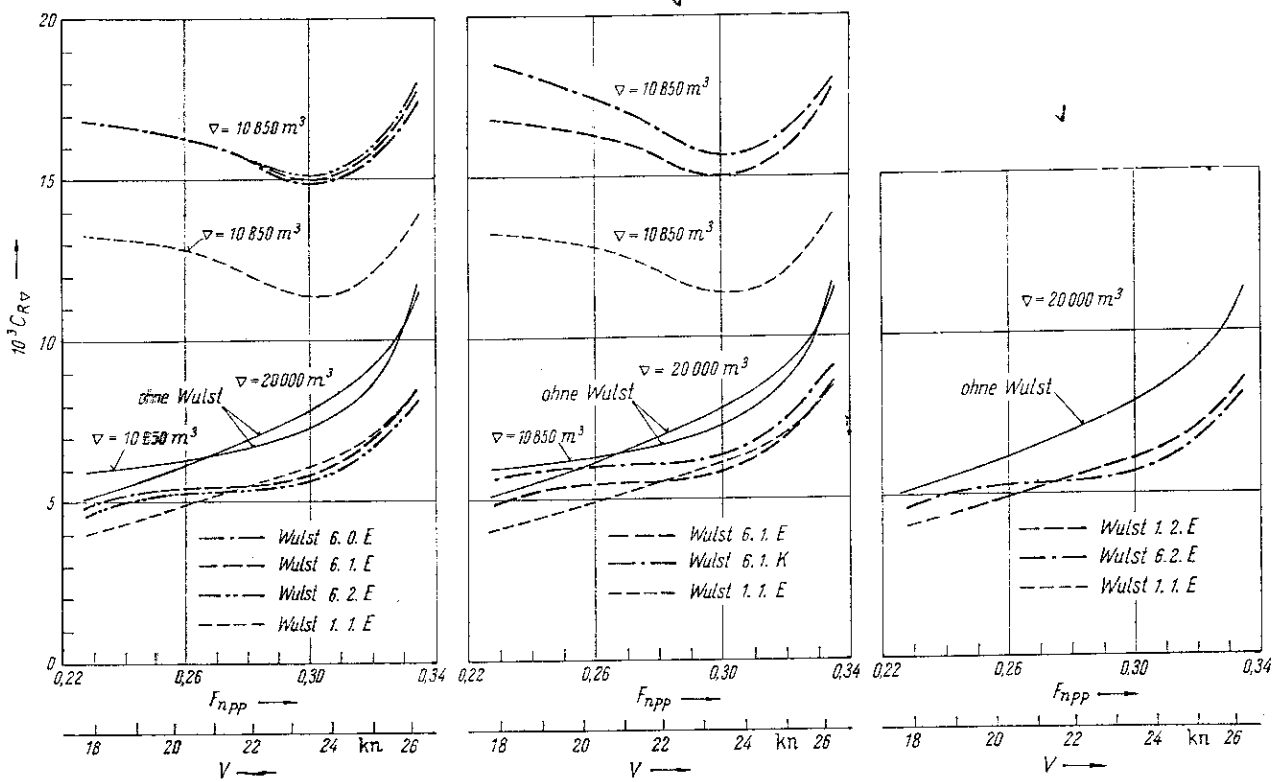


Bild 16. Einfluß der Wulstlänge und der Wulstkopfausführung auf die  $CRV$ -Werte bei M 426 für Wulst 6 und Vergleich der  $CRV$ -Werte für Wulst 1 und 6

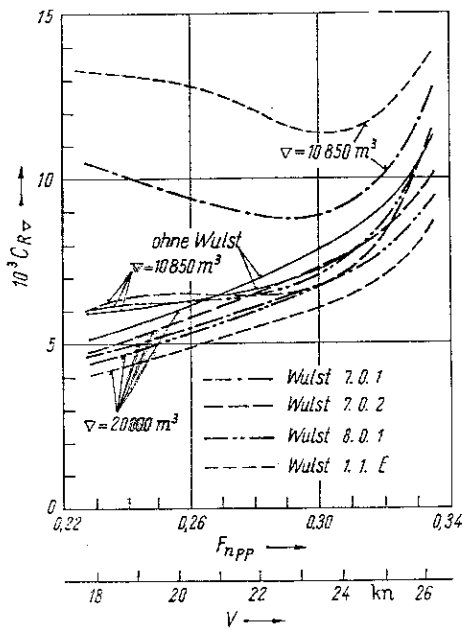


Bild 17. Einfluß der Wulste 7 und 8 auf die  $CRV$ -Werte bei M 426

Der aus dem Reibungswiderstand sich ergebende Leistungsanteil des Schiffes mit Bugwulst läßt sich aus den in Tafel 5 dargestellten  $P_{EF}$ -Werten von M 426 ohne Wulst dadurch bestimmen, daß diese Werte um den gleichen Prozentsatz erhöht werden wie die benutzte Oberfläche des Schiffes mit Wulst größer ist als die des Schiffes ohne Wulst (vgl. Tafel 3). Das gilt jedoch exakt nur für gleiche Schiffslängen, wie es bei der großen Verdrängung annähernd der Fall ist. Im Ballastzustand ist die Wasserlinienlänge beim Schiff mit Wulst größer als die beim Schiff ohne Wulst, wodurch sich auch die

Schoenherrsehen Reibungsbeiwerte ändern. Berücksichtigt wird dieses, wenn die nach dem oben beschriebenen Verfahren ermittelten Leistungsanteile  $P_{EF}$  für das Schiff mit Wulst mit  $\alpha_2 = 0,996$  multipliziert werden. Dieser Faktor wurde durch Vergleichsrechnungen für 10850  $m^3$  Verdrängung und für M 426 mit und ohne Wulst ermittelt.

Außer den Widerstandsbeiwerten  $CRV$  wurden für die Wulstvarianten, die unter den Versuchsbedingungen besonders günstige Widerstandsbeiwerte ergeben haben (Wulst 1.1.E und 6.2.E bei  $\nabla = 20000 m^3$  und Wulst 5.0.3 bei beiden Verdrängungen) oder die für Vergleichszwecke benutzt wurden, die SchlepplLeistungen berechnet. Die Umrechnung der Modellversuchsergebnisse auf die Großausführung erfolgte mit Hilfe der Schoenherrsehen Reibungsbeiwerte und einem Rauheitszuschlag  $\Delta C_F = 0,0002$  zuzüglich  $\Delta C_F = 0,00016$  für Probefahrtbedingungen (0,00004 für Steuern, 0,00004 für Schlingerkiele, 0,00008 für Eigenfahrtwind).

Als Berechnungslänge der Leistungen wurde für die große Verdrängung, unabhängig davon, ob das Schiff einen Wulstbug oder einen normalen Vorsteven hatte, die Konstruktionswasserlinienlänge  $L_{KWL}$  eingesetzt. Bei der Ballastverdrängung wurde die gesamte Länge des Bugwulstes, auch wenn dieser teilweise austauchte, in die Berechnungslänge einbezogen. Außerdem wurde bei dieser Verdrängung, bei der der Bugwulst bei  $V = 0$  teilweise austauchte, bei Fahrt jedoch überspült wurde, die benutzte Oberfläche des Schiffes für den Fahrzustand ermittelt, d. h. es wurde der oberhalb der Wasserlinie liegende Teil des Wulstes bei der Oberflächenberechnung mit berücksichtigt.

Die SchlepplLeistungen sind in Bild 22 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt; außerdem enthält dieses Bild auch die Wellenleistungen.

Die vergleichsweise in einigen Fällen für die Konstruktionsverdrängung mit Hilfe der Reibungsbeiwerte nach Froude errechneten SchlepplLeistungen lagen im unteren

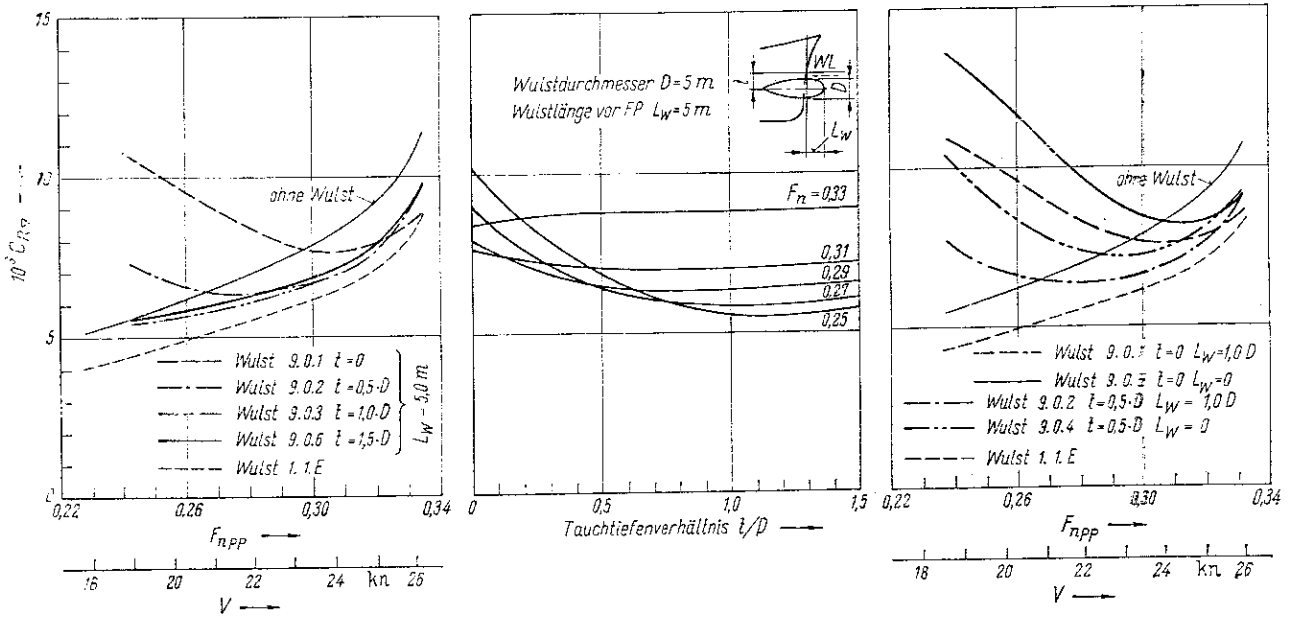


Bild 18. Einfluß der Wulstlage auf die  $C_{RV}$ -Werte bei M 426 für Wulst 9 und 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

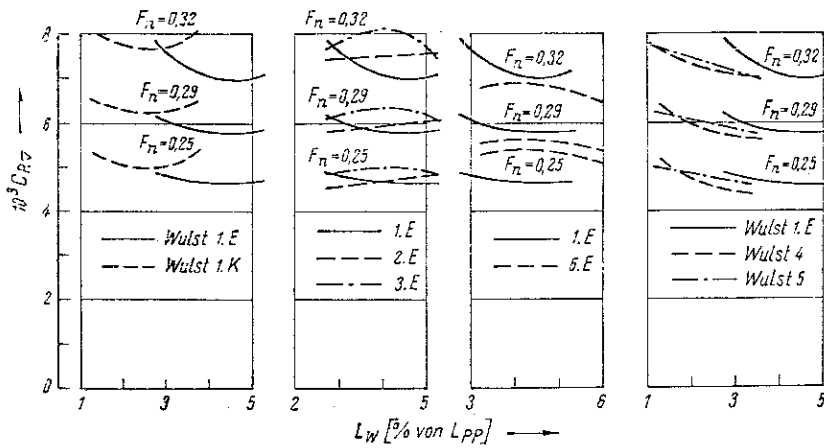


Bild 19. Einfluß der Wulstlänge auf die Widerstandsbeiwerte  $C_{RV}$  für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

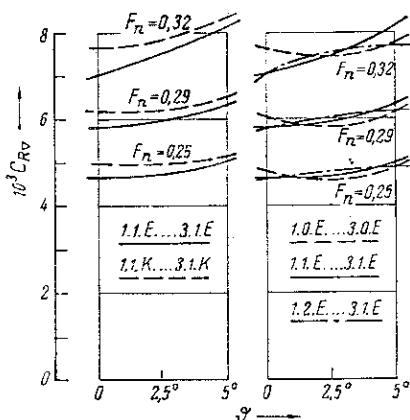


Bild 20. Einfluß der Wulsteinschnürung auf die Widerstandsbeiwerte  $C_{RV}$  für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

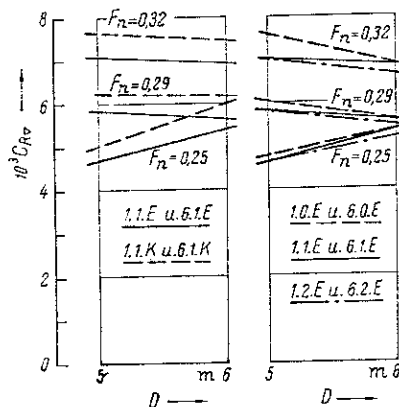


Bild 21. Einfluß des Wulstdurchmessers auf die Widerstandsbeiwerte  $C_{RV}$  für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

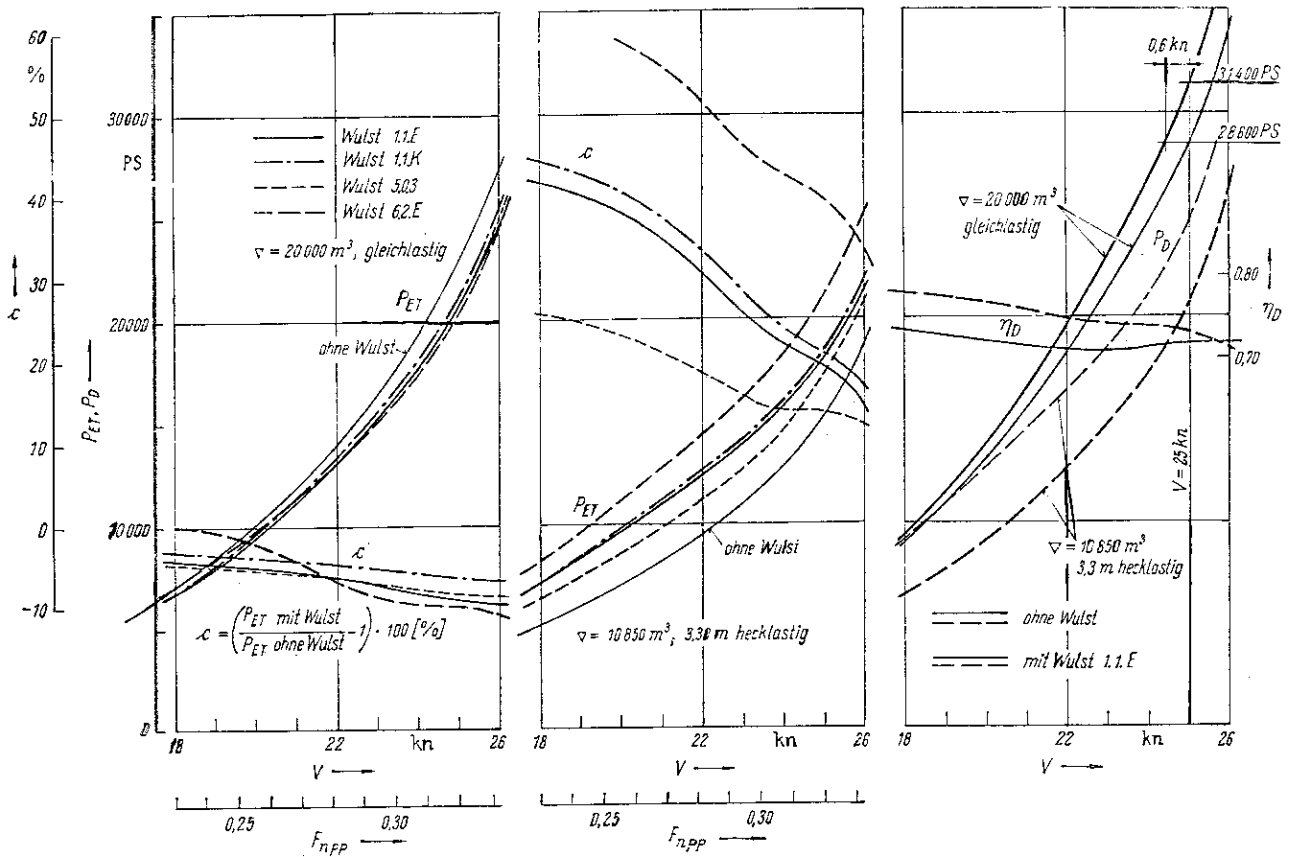


Bild 22. Vergleich der Schlepp- und Wellenleistungen von M 426 mit und ohne Wulst

Geschwindigkeitsbereich etwas mehr als 1% höher und im oberen Geschwindigkeitsbereich nicht ganz 1% niedriger. Nur bei dem kleineren Kùhlschiff (M 485) ergaben sich über den gesamten Geschwindigkeitsbereich etwas kleinere Schleppleistungen.

Außer den bereits genannten Modellmaßstäben wurden von den Vergleichsschiffen M 494, M 485 und M 486 die Modellversuchsergebnisse der größten Verdrängung auch noch mit einem anderen Maßstab auf die Großausführung umgerechnet. Dieser Maßstab wurde für Vergleichsbetrachtungen so gewählt, daß sich in der Großausführung eine Verdrängung von 20 000 m<sup>3</sup> ergab.

Hinsichtlich der benetzten Oberfläche und der Berechnungslänge gilt bei M 477 mit Wulst das gleiche wie bei M 426 mit Wulst.

#### 4. Erläuterung der Versuchsergebnisse

##### 4.1. Beeinflussung des Widerstandes durch Anbringung eines Bugwulstes

In Bild 12 bis 18 sind die Restwiderstandsbeiwerte  $C_{R\Delta}$  der Bugwulstuntersuchungen mit M 426 in Abhängigkeit von der Froudezahl bzw. von der Schiffsgeschwindigkeit dargestellt. Zur besseren Beurteilung, welche Wulstform für das untersuchte Schiff am besten geeignet ist, wurden in jedes Diagramm zusätzlich die  $C_{R\Delta}$ -Werte vom Schiff ohne Wulst und vom Schiff mit Wulst 1.1.E eingetragen. Der Wulst 1.1.E wurde zum Vergleich gewählt, da er im voll getauchten Zustand sehr gute Widerstandsverbesserungen brachte und auch baulich keine Schwierigkeiten bereiten dürfte. Der Wulst 6.2.E verbessert zwar bei  $\Delta = 20\,000\text{ m}^3$  und  $V > 22\text{ kn}$  die Widerstandseigenschaften des Schiffes noch mehr (Bild 16), ist jedoch auf Grund seiner Abmessungen für eine praktische Ausführung kaum noch empfehlenswert. Außerdem bringt der Wulst 6.2.E im Ballastzustand eine so große Wider-

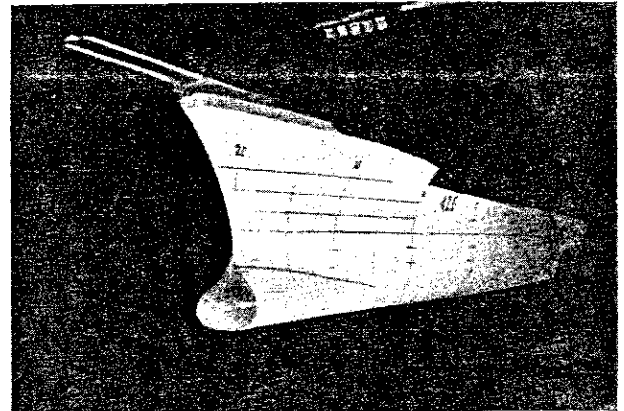


Bild 23. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 4.0.3

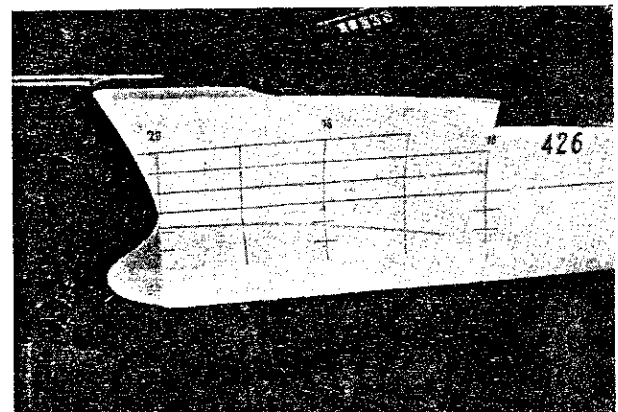


Bild 24. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 5.0.3



standserhöhung, daß für den Antrieb des leeren, hecklastig getrimmten Schiffes eine größere Leistung erforderlich ist als für das vollbeladene gleichlastige Schiff (Bild 22). Der Einfluß der verschiedenen Wulstparameter auf den Restwiderstand des Schiffes mit Bugwulst ist aus Bild 19, 20 und 21 zu erkennen. In diesen Diagrammen sind die  $C_{R\Delta}$ -Werte für  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  und drei verschiedenen Froudezahlen in Abhängigkeit von den Wulstparametern  $L_w$  (Länge des Wulstes vor FP),  $\theta$  (Einschnürung des Wulstes) und  $D$  (Durchmesser des Wulstes) dargestellt. Interessant sind auch die Ergebnisse der Widerstandsversuche mit Wulst 9 [39], der in sechs verschiedenen Stellungen am Modell untersucht wurde (Bild 18). Diese Untersuchungen lassen Rückschlüsse auf die günstigste Lage dieses Wulstes am Schiff zu.

### 1. Einfluß der Wulstform auf die $C_{R\Delta}$ -Werte, für Wulst 1, 4 und 5 ( $A_{FP}/A_M = 0,09 = \text{const.}$ )

Wie aus Bild 15 hervorgeht, haben die Wulste 1, 4 und 5 bei der Konstruktionsverdrängung von  $20000 \text{ m}^3$  und richtiger Wahl der Wulstlänge im Geschwindigkeitsbereich  $F_{nPP} > 0,31$  etwa gleich günstige Wirkung auf den Restwiderstand des Schiffes. Für Froudezahlen kleiner als  $0,30$  und vor allem im Ballastzustand ist der nach oben etwas schlanker auslaufende, birnenförmige Wulst 4 (Bild 23) dem Wulst 1 mit kreisförmigem Querschnitt widerstandsmäßig etwas überlegen. Noch günstigere Widerstandswerte im Ballastzustand ergab der noch mehr verjüngte, tropfenförmige Wulst 5 (Bild 24). Jedoch ist auch bei diesem Wulst, wie bei fast allen anderen, eine erhebliche Verschlechterung des Restwiderstandes gegenüber den Werten ohne Wulst vorhanden. Diese Verschlechterung ist darauf zurückzuführen, daß der Bugwulst bei dieser Trimmelage teilweise austaucht und im Vorschiffsbereich eine große Bugwelle erzeugt, die beim Modell ohne Wulst so gut wie gar nicht vorhanden ist. Das heißt, hier wurde durch den Wulst gerade das Gegenteil von dem erreicht, was man eigentlich mit einem Bugwulst erreichen will und auch bei der großen Verdrängung z. T. erreicht hat. Ob hierbei auch Ablösungserscheinungen am Wulst eine Rolle gespielt haben, kann nicht gesagt werden. Auf alle Fälle aber ist zu erkennen, daß im Gegensatz zur großen Verdrängung, bei der die Form des Wulstes bei gleichbleibendem Wulstquerschnitt nur eine untergeordnete Rolle spielt, beim Ballastzustand die Ausführung des Wulstes für die Größe des Schiffswiderstandes von Bedeutung ist, und zwar ist die Widerstandserhöhung durch den Wulst bei diesem Beladungszustand um so größer, je dicker die Wasserlinieneinläufe des Wulstes im Bereich der KWL sind, da das Wellensystem primär beeinflußt wird.

In Tafel 6 sind die prozentualen Unterschiede des Restwiderstandes

$$c = \left( \frac{R_R \text{ mit Wulst}}{R_R \text{ ohne Wulst}} - 1 \right) 100 [\%]$$

Tafel 6. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes der Wulstformen 1.1.E, 4.0.3 und 5.0.3 gegenüber dem wulstlosen Schiff

Wulst	$\nabla = 20000 \text{ m}^3$ gleichlastig			$\nabla = 10850 \text{ m}^3$ 3,30 m hecklastig		
	1.1.E	4.0.3	5.0.3	1.1.E	4.0.3	5.0.3
$F_{nPP} = 0,25$	-20,7	-23,9	-20,7	+111	+92	+63
0,29	-21,3	-23,3	-21,3	+67	+57	+36
0,32	-23,6	-23,6	-22,7	+39	+35	+27

zwischen Schiff mit und ohne Wulst für drei Froudezahlen dargestellt (für den Vergleich wurde die bei  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  Verdrängung widerstandsmäßig günstigste Variante des jeweiligen Wulstes verwendet.) Zu berücksichtigen ist, daß der Anteil des Restwiderstandes am Gesamtwiderstand bei den kleinen Geschwindigkeiten kleiner ist als der Reibungswiderstandsanteil; d. h. eine Verbesserung des Restwiderstandes von beispielsweise 20% bringt bei den höheren Geschwindigkeiten einen größeren Leistungsgewinn als bei den niedrigen Geschwindigkeiten.

### 2. Einfluß der Wulstform auf $C_{R\Delta}$ bei unterschiedlichen Wulstgrößen

Der Einfluß der Wulstform auf den Widerstand bei unterschiedlichen Wulstgrößen ( $A_{FP}/A_M = 0,03$  bis  $0,09$ ) wurde zwischen den Wulsten 1.1.E, 7.0.1, 7.0.2 und 8.0.1 ermittelt. Die Linien der Wulste, mit Ausnahme der von Wulst 1.1.E, wurden in die Schiffsförmung eingestrahlt. Während Wulst 7.0.1 (Bild 25), der von der Seite Ähnlichkeit mit Wulst 5.0.3 hat, nach hinten stark eingeschnürte Wasserlinien besitzt, laufen die Linien der Wulste 7.0.2 und 8.0.1 nach hinten allmählich auseinandergehend in den Schiffskörper ein. Wulst 7.0.2 ist dem Wulst 7.0.1 in der Form ähnlich, aber bedeutend kleiner, und Wulst 8.0.1 unterscheidet sich von den beiden dadurch, daß die größte Breite seiner Querschnittsfläche am vorderen Lot oberhalb des halben Konstruktionstiefgangs liegt (Bild 17).



Bild 25. Vorschiff des Grundmodells (M 420) mit Wulst 7.0.1

Tafel 7. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes der Wulstformen 1.1.E, 7.0.1, 7.0.2 und 8.0.1 gegenüber dem wulstlosen Schiff

Wulst	$\nabla = 20000 \text{ m}^3$ gleichlastig				$\nabla = 10850 \text{ m}^3$ 3,30 m hecklastig			
	1.1.E	7.0.1	8.0.1	7.0.2	1.1.E	7.0.1	8.0.1	7.0.2
$A_{FP}/A_M$	0,09	0,09	0,06	0,03	0,15	0,15	0,10	0,05
$F_{nPP} = 0,25$	-20,7	-10,4	-13,7	-6,5	+111	+58	+1,3	+5,5
0,29	-21,3	-12,8	-14,0	-6,4	+67	+27	-3,0	-5,4
0,32	-23,6	-15,1	-15,1	-8,3	+39	+17	-0,8	-3,9

In Tafel 7 sind die Restwiderstände des Schiffes mit und ohne Wulst für die Froudezahlen  $F_{nPP} = 0,25, 0,29$  und  $0,32$  miteinander verglichen. Die Werte lassen deutlich den Einfluß der Wulstgröße auf die Widerstandsänderungen infolge des Wulsteffektes erkennen. Wulst 1.1.E ( $A_{FP}/A_M = 0,09$ ) bringt die größten Widerstandsverbesserungen beim vollbeladenen Schiff und auch die größten Widerstandsverschlechterungen beim leeren Schiff. Wulst 7.0.2 ( $A_{FP}/A_M = 0,03$ ) dagegen die kleinsten Widerstandsverbesserungen beim vollbeladenen Schiff, aber auch die kleinsten Widerstandsverschlechterungen beim leeren Schiff. Im Geschwindigkeitsbereich  $V = 21$  kn bis  $26$  kn wirkte sich der kleine Wulst bei der Ballastverdrängung infolge seiner relativen Vergrößerung sogar vorteilhaft auf den Widerstand des Schiffes aus, d. h. hier trat bereits beim kleinen Schiffstiefgang der erwünschte Wulsteffekt auf.

Daß aber auch die Form des Wulstes einen Einfluß auf die durch ihn hervorgerufenen Widerstandsänderungen hat, zeigt der Vergleich der Wulste 7.0.1 und 8.0.1. Wie die Zahlenwerte in Tafel 7 erkennen lassen, hat der Wulst 8.0.1 trotz seines kleineren Querschnitts bessere Widerstandseigenschaften als der Wulst 7.0.1, und zwar sowohl beim vollbeladenen Schiff als auch beim Schiff in Ballastfahrt. Für den Geschwindigkeitsbereich  $V = 20,5$  kn bis  $24,5$  kn ergaben sich sogar noch kleinere Restwiderstände als beim Schiff ohne Wulst. Die aus der Literatur bekannt gewordenen, mit dem Maierform SV-Bug erzielten Leistungsverbesserungen von 20% und mehr wurden bei diesem Schiffstyp jedoch nicht erreicht [40].

### 3. Einfluß des Wulstquerschnitts auf $C_{R\Delta}$ bei gleicher Wulstform (zylindrischer Wulst)

Wulst 1 und Wulst 6 (Bild 3) haben beide einen kreisförmigen Querschnitt, und die Wasserlinien laufen parallel zu Mitte Schiff in den Schiffskörper ein. Der Wulst 1 hat einen Durchmesser von  $5,0$  m ( $A_{FP}/A_M = 0,09$ ) und der Wulst 6 einen Durchmesser von  $6,0$  m ( $A_{FP}/A_M = 0,13$ ).

Wie aus der Darstellung der Versuchsergebnisse hervorgeht (Bild 16 und 21), übt der Wulst 6 bei  $\nabla = 20\,000$  m<sup>3</sup> im unteren Geschwindigkeitsbereich einen ungünstigeren und im oberen Geschwindigkeitsbereich einen günstigeren, zumindest aber gleichwertigen Einfluß auf den Restwiderstand des Schiffes aus als der Wulst 1. Etwa zu dem gleichen Ergebnis kamen auch Dillon und Lewis [36] bei ihren Untersuchungen, nur daß sich die  $P_{ET}$ -Kurven dort bei  $F_n \approx 0,24$  und im vorliegenden Fall erst bei  $F_n \approx 0,29$  schneiden (vgl. Bild 16 und 22). Das Ergebnis ist auch eine Bestätigung der vielfach geäußerten Ansicht [33], daß der Wulst um so größer

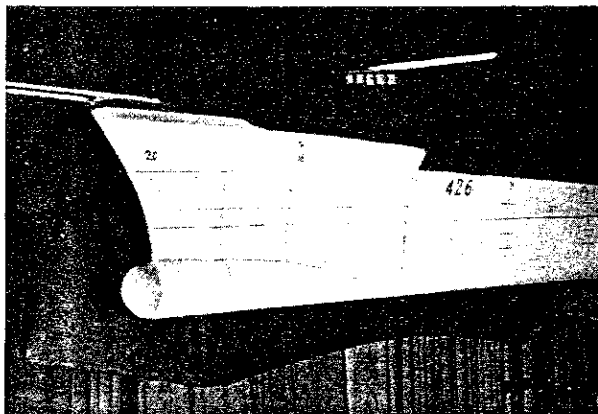


Bild 26. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 6.0.K

sein soll, je höher die Froudezahl ist. Trotzdem ist es unzumutbar, ein Schiff mit einem zu großen Bugwulst zu versehen, weil der Restwiderstand dann, wenn das Schiff nicht voll beladen ist und der Wulst austaucht, so beträchtlich ansteigt, daß das Schiff bei Ballastfahrt für die gleiche Geschwindigkeit unter Umständen eine höhere Leistung benötigt, als wenn es voll beladen ist (Bild 26).

Interessant in diesem Zusammenhang sind auch die während der Fahrt gemachten Wellenbilder, aus denen deutlich die Beeinflussung der Bugwelle durch den Bugwulst zu erkennen ist. Bei  $20\,000$  m<sup>3</sup> Verdrängung und  $18$  kn Geschwindigkeit wurde die Bugwelle durch den Anbau des Wulstes 1.1.E abgebaut, und es ergab sich eine Leistungsverbesserung von etwa 8% (Bild 22). Bei dem mit Wulst 6.2.E ausgerüsteten Modell verringerte sich die Höhe der Bugwelle noch mehr, dafür entstand aber durch ungünstige Überlagerung der Wellensysteme von Wulst und Modell etwa bei Spant 16 ein neuer Wellenberg, durch den der bereits von dem kleineren Wulst erzeugte Leistungsgewinn wieder vollständig rückgängig gemacht wurde (Bild 22). Bei  $\nabla = 20\,000$  m<sup>3</sup> und  $V = 25$  kn war das Bugwellensystem am Modell ohne Wulst stark ausgeprägt, wurde aber durch die Anbringung eines Bugwulstes weitgehend abgebaut und zwar bei dem großen Wulst noch mehr als bei dem kleineren. Dementsprechend war auch die Leistungsverringerung; sie betrug 8% bei Wulst 1.1.E und 10% bei Wulst 6.2.E.

Bei der kleinen Verdrängung  $\nabla = 10\,850$  m<sup>3</sup> liegen die Verhältnisse anders. Hier entstand beim Modell ohne Wulst nur ein relativ kleines Bugwellensystem, das jedoch durch die Anordnung eines Bugwulstes vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich erheblich vergrößert wurde, und zwar um so mehr, je größer der Wulst war. Damit ist auch die Widerstandserhöhung beim Schiff mit Wulst gegenüber dem Schiff ohne Wulst zu erklären. Sie betrug beispielsweise bei  $25$  kn Geschwindigkeit und dem kleinen Wulst 20% und beim großen Wulst sogar 40%; bei den kleinen Geschwindigkeiten war sie noch höher. Diese Unterschiede treten noch deutlicher hervor, wenn nur die Restwiderstände beider Wulste miteinander verglichen werden (Tafel 8).

Tafel 8. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes der Wulstform 1.1.E und 6.1.E gegenüber dem wulstlosen Schiff

	$\nabla = 20\,000$ m <sup>3</sup> gleichlastig		$\nabla = 10\,850$ m <sup>3</sup> 3,30 m beeklastig	
	1.1.E	6.1.E	1.1.E	6.1.E
$A_{FP}/A_M$	0,09	0,13	0,15	0,22
$F_{nPP} = 0,25$	-20,7	-8,6	+111	+167
0,29	-21,3	-24,0	+67	-120
0,32	-23,6	-24,9	+39	+83

### 4. Einfluß der Wulsteinschnürung auf $C_{R\Delta}$

Um festzustellen, wie sich ein nach hinten zum Schiff hin verjüngter Wulst auf den Widerstand auswirkt, wurde der Wulst 1, unter Einhaltung des Wulstquerschnitts am vorderen Lot, zweimal abgearbeitet und untersucht. Es entstanden so der Wulst 2 mit einem Einschnürungswinkel  $\theta = 2,5^\circ$  und der Wulst 3 mit  $\theta = 5^\circ$ . Ein nach hinten dicker werdender Wulst wurde nicht untersucht, da ein solcher Wulst sehr lang werden würde, was sich nach [34] und [37] ungünstig auf den Schiffswiderstand auswirken soll.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Bild 12 bis 14 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und in Bild 29 für verschiedene Froudezahlen in Abhängigkeit vom

Einschnürungswinkel  $\theta$  dargestellt. Auch die Wulstlänge und die Ausführung des Wulstkopfes spielen eine Rolle, aber im großen und ganzen kann gesagt werden, daß sich die Einschnürung des Wulstes zum Schiff hin bei der großen Verdrängung ungünstig und bei der kleinen Verdrängung günstig auf den Widerstand ausgewirkt hat, und zwar im Ballastzustand um so mehr, je größer der Wulst war. Es ist anzunehmen, daß hierbei nicht nur die Wellenbeeinflussung durch den Wulst, sondern auch Grenzschichtablösungen eine Rolle spielen, da bei einem sich nach hinten verjüngenden Körper viel eher die Gefahr einer Grenzschichtablösung besteht als bei einem Körper, dessen Wasserlinien parallel laufen oder sich nach hinten erweitern. Es ist aber auch möglich, daß ein nach hinten sich verjüngender Wulst beim Ballasttiefgang besser mit dem Strömungsverlauf des Bugwellensystems übereinstimmt und deshalb bei dieser Verdrängung günstigere Widerstandswerte liefert.

Wahrscheinlich ist darauf auch der  $C_{R\Delta}$ -Unterschied zwischen den sonst sehr ähnlichen Wulsten 5.0.3 (Wulst nicht eingeschnürt) und 7.0.1 (Wulst eingeschnürt) zurückzuführen, da hier die gleichen Erscheinungen auftraten.

In Tafel 9 sind einige  $C_{R\Delta}$ -Werte des Schiffes mit Wulst 1.1.E, 2.1.E und 3.1.E mit den Werten vom Schiff ohne Wulst verglichen. Bei den anderen Varianten dieser drei Wulste ergaben sich ähnliche Tendenzen.

Tafel 9. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes der Wulstformen 1.1.E, 2.1.E und 3.1.E gegenüber dem wulstlosen Schiff

Wulst	$\nabla = 20000 \text{ m}^3$ gleichlastig			$\nabla = 10850 \text{ m}^3$ 3,3 m hecklastig		
	1.1.E	2.1.E	3.1.E	1.1.E	2.1.E	3.1.E
$\theta$	0°	2,5°	5°	0°	2,5°	5°
$F_{nPP} = 0,25$	-20,7	-18,8	-14,3	+111	+111	+117
0,29	-21,3	-19,4	-14,1	+ 67	+ 57	+ 62
0,32	-23,6	-17,7	-10,8	+ 39	+ 34	+ 29

### 5. Einfluß der Wulstkopfausführung auf $C_{R\Delta}$ bei unverändertem Wulstkörper

Bei den Wulsten mit kreisförmigem Querschnitt wurden sowohl eine Halbkugel (K) als auch ein Halbellipsoid (E) als Wulstkopf untersucht, um den Einfluß dieser beiden Ausführungen auf den Widerstand zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind für Wulst 1 auf Bild 12, für Wulst 2 auf Bild 13, für Wulst 3 auf Bild 14 und für Wulst 6 auf Bild 16 dargestellt.

Bei der großen Verdrängung ergaben alle 4 Wulste mit dem Halbellipsoidkopf kleinere Schiffswiderstände als mit dem Halbkugelkopf, obwohl sich die entsprechenden Wellenbilder augenscheinlich nicht voneinander unterscheiden. Bemerkenswert ist auch, daß der Einfluß der Einschnürung beim Halbkugelkopf weniger groß ist als beim Halbellipsoidkopf (Bild 20 und Tafel 10).

Tafel 10. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes des ellipsoidförmigen Wulstkopfes gegenüber dem kugelförmigen ( $R_R \text{ Ellips.} / R_R \text{ Kugel} - 1) \cdot 100$

Wulst	$\nabla = 20000 \text{ m}^3$ gleichlastig				$\nabla = 10850 \text{ m}^3$ 3,30 m hecklastig			
	6.1	1.1	2.1	3.1	6.1	1.1	2.1	3.1
$\theta$	0°	0°	2,5°	5°	0°	0°	2,5°	5°
$F_{nPP} = 0,25$	-10,0	-6,1	-5,0	-2,7	-7,3	-4,2	0	+6,3
0,29	- 9,0	-6,5	-4,4	-3,1	-3,8	-5,3	0	+9,1
0,32	- 7,4	-7,8	-3,3	-1,9	-3,7	-3,8	0	+3,4

Der Einfluß der Wulstkopfausführung bei der kleinen Verdrängung zeigt, daß bei den beiden zylindrischen Wulsten 1 und 6 der Halbellipsoidkopf eindeutig besser ist als der Halbkugelkopf. Diese Tendenz kehrt sich jedoch mit zunehmender Wulsteinschnürung um, und bei dem 5° eingeschnürten Wulst 3 ist der Halbkugelkopf bereits erheblich besser als der Halbellipsoidkopf.

### 6. Einfluß der Wulstlänge auf $C_{R\Delta}$ bei den Wulsten 1 bis 6

Die Wulste mit kreisförmigem Querschnitt waren so ausgeführt, daß durch Einfügen von Scheiben zwischen Wulstkörper und Wulstkopf der Wulst nach vorn verlängert werden konnte. Für die Wulste 4 und 5 waren jeweils drei verschieden lange Wulstköpfe entworfen worden. Auf diese Weise konnte anhand einer Vielzahl von Versuchen mit ganz verschiedenen Wulstausführungen der Einfluß der Wulstlänge ermittelt werden.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind auf Bild 12 bis 16 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und auf Bild 19 für  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  in Abhängigkeit von der Wulstlänge dargestellt. Diese Darstellung zeigt, daß die Wulstlänge zwar nicht ohne Einfluß auf den Wulsteffekt ist, daß aber eine eindeutige Tendenz nicht festzustellen war, weil der Längeneinfluß auch noch von der Wulstgröße und der Wulstform abhängt.

Bei den nach hinten sich nicht verjüngenden, mit einem länglichen Kopf versehenen gleich großen Wulsten 1.E, 4 und 5 scheint sich bei der großen Verdrängung ein um 3% bis 5% von  $L_{PP}$  über das vordere Lot hinausragender Wulst am günstigsten auf den Schiffswiderstand auszuwirken. Bei dem großen Wulst 6 und bei dem am meisten nach hinten sich verjüngenden Wulst 3 ergab diese Länge jedoch die ungünstigsten Werte, und bei dem Wulst 1 mit Halbkugelkopf lieferte eine Wulstlänge von 2,5% von  $L_{PP}$  vor FP die besten Ergebnisse.

Bei der Ballastverdrängung nahm der Schiffswiderstand bei den Wulsten mit kreisförmigem Querschnitt mit größer werdender Wulstlänge zu, besonders bei den Wulsten 2 und 3 und am wenigsten bei Wulst 6, und bei den in den Schiffskörper eingestakten Wulsten 4 und 5 nahm er ab. Letzteres ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß mit der Verlängerung dieser Wulste zugleich auch eine Veränderung der Wulstkopfform verbunden war.

### 7. Einfluß der Lage des Wulstes auf $C_{R\Delta}$

Zur Ermittlung des Einflusses der Wulstlage auf den Widerstand des Schiffes eignete sich besonders ein nach den Angaben von Nutku [39] hergestellter Rotationskörper, der ohne große Schwierigkeit in verschiedenen Stellungen am Modell befestigt werden konnte (Bild 27). Die aus den Versuchen für das vollbeladene Schiff ermittelten Restwiderstandsbeiwerte sind in Bild 18 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, daß sich der weit unter der Wasseroberfläche angebrachte Wulst (Lage der Wulste siehe Bild 3) vor allem bei den Geschwindigkeiten unter 20 kn und der sehr hoch liegende, halb eingetauchte Wulst vor allem bei den Geschwindigkeiten ab 25 kn bis 26 kn günstig auf den Schiffswiderstand auswirkte. Ob diese Feststellung verallgemeinert werden darf und auf alle Schiffs- und Wulstformen anwendbar ist, ist fraglich, zumal dieser Wulst für den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich in keinem Fall solche Widerstandsverbesserungen brachte wie beispielsweise der Wulst 1.1.E. Der nur halb eingetauchte Wulst brachte bei den kleineren Geschwindigkeiten sogar einen so erheblichen Leistungsverlust gegenüber dem Schiff ohne Wulst, daß eine Verwendung praktisch kaum in Frage kommen wird (Tafel 11).

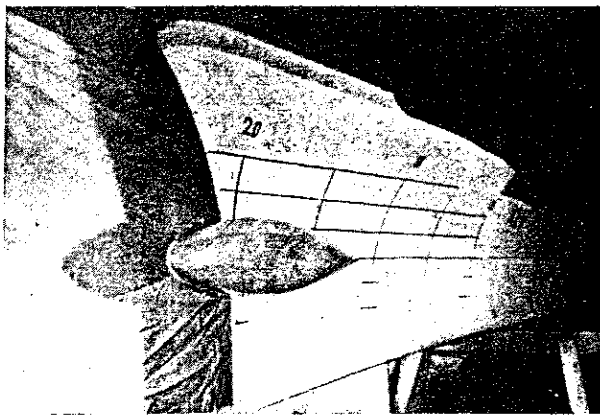


Bild 27. Vorschiff des Grundmodells (M 426) mit Wulst 9.0.1

Tafel 11. Prozentuale Änderung des Restwiderstandes der Wulstformen 1.1.E, 9.0.1, 9.0.2, 9.0.3 und 9.0.6 gegenüber dem wulstlosen Schiff für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

		∇ = 20000 m <sup>3</sup> , gleichlastig				
Wulst		1.1.E	9.0.1	9.0.2	9.0.3	9.0.6
Tauchtiefen Verhältnis t/D		1,37	0	0,5	1,0	1,5
F <sub>nPP</sub> = 0,25		-20,7	+72,8	+17,9	-5,5	-3,0
0,29		-21,3	+ 8,3	-12,0	-14,1	-11,5
0,32		-23,6	-14,1	-16,8	-16,8	-14,5
0,33		-23,2	-18,5	-14,2	-14,2	-13,9

Wie der Tauchtiefeneinfluß des Wulstes auf den Schiffswiderstand zustande kommt, ist aus den Wellenbildern sehr deutlich zu erkennen.

Wie der Einfluß einer Längsverschiebung des Wulstkörpers auf den Restwiderstand erkennen läßt (Bild 18), weist der weiter vorstehende Wulst bessere Widerstandseigenschaften auf als der nur bis zum vorderen Lot reichende Wulst.

#### 8. Einfluß des Bugwulstes auf die Schlepp- und Wellenleistung

Da die bisherigen Betrachtungen nur den Einfluß des Bugwulstes auf den Restwiderstand des Schiffes behandelten, sind in Bild 22 die Schleppleistungen für einige Wulstvarianten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt.

Aus dieser Darstellung geht hervor, daß durch das Anbringen eines Bugwulstes der Leistungsgewinn je nach Geschwindigkeit und Wulstform etwa 5% bis 10% beträgt. Das entspricht bei V = 20 kn einer Geschwindigkeitserhöhung von etwa 0,4 kn und bei V = 25 kn etwa 0,5 kn bis 0,7 kn. Dieses Ergebnis ist im Vergleich zu anderen Literaturangaben durchaus zufriedenstellend.

Wie die Untersuchungen für die ausgewählten Schiffsförmungen gezeigt haben, tritt im Ballastzustand fast immer eine Verschlechterung des Schiffswiderstandes durch den Wulst ein. Benötigt das Schiff ohne Wulst für die Geschwindigkeit von 20 kn eine Schleppleistung von 7000 PS, so braucht das gleiche Schiff mit dem für die Ballastfahrt noch relativ gut geeigneten Wulst 5.0.3 bereits 8600 PS, das entspricht einer Leistungserhöhung von 23%. Das mit dem Wulst 6.2.E versehene Schiff benötigt sogar 11200 PS, das sind 60% mehr Leistung. Damit liegt die Leistung sogar höher, als für dasselbe Schiff im vollbeladenen Zustand zur Erreichung dieser Geschwindigkeit benötigt wird. Geschwindigkeitsmäßig bedeutet das einen Verlust von 1,5 kn bis 3 kn, d. h. mit einer Schleppleistung von 7000 PS erreicht das Schiff nur noch eine Geschwindigkeit von 18,5 kn bzw.

17 kn anstatt 20 kn. Nicht ganz so extrem sind die Verhältnisse bei den noch höheren Geschwindigkeiten. Bei 25 kn beträgt die Leistungserhöhung durch die genannten Bugwulste nur noch 14% bzw. 40% und die Geschwindigkeitsverluste bei gleicher Schleppleistung 0,8 kn bzw. 2,5 kn. Diese Ergebnisse zeigen, daß im unteren Geschwindigkeitsbereich der Wulst 5.0.3 dem Wulst 6.2.E bei Ballastfahrt weit überlegen ist. Die Werte der anderen Wulste liegen etwa dazwischen und nähern sich im oberen Geschwindigkeitsbereich den Werten des Wulstes 5.0.3 an.

Die Wellenleistungen für Probefahrtbedingung in Bild 22 zeigen, daß durch die Anbringung des Wulstes 1.1.E bei der großen Verdrängung und für konstante Wellenleistung bei V = 20 kn ein Geschwindigkeitsgewinn von etwa 0,3 kn und bei V = 25 kn ein Gewinn von etwa 0,6 kn zu erreichen ist. Das sind ungefähr dieselben Werte, wie sie sich bei der Betrachtung der Schleppleistungen ergaben. Demgegenüber muß man bei der Fahrt im Ballastzustand mit einem Geschwindigkeitsverlust von mehr als 2 kn bei V = 20 kn Geschwindigkeit und mit mehr als 1 kn bei V = 25 kn rechnen.

#### 9. Der Einfluß des Bugwulstes auf die Schleppleistung bei verschiedenen Schiffslängen

Um festzustellen, ob die Bugwulste an einem etwas volligeren und kürzeren Schiff etwa dieselbe Wirkung haben wie am Ausgangsschiff (M 426), wurden die Wulste 1.1.E und 5.0.3 in nur wenig geänderter Form auch an dem Modell des 155-m-Schiffes (M 477) widerstandsmäßig untersucht. Der Wulst 1.1.E wurde allerdings bei diesem Schiff im Gegensatz zu M 426 ohne Übergangsradien an das Modell angesetzt (Bild 22 bis 25). In Bild 28 und 29 sind die Schleppleistungen beider Schiffe mit und ohne Wulst gegenübergestellt.

Die Untersuchungen zeigen, daß die Wirkung der beiden Wulste an den zwei verschiedenen Schiffen etwas unterschiedlich ist. Während der Einfluß beider Wulste auf den Widerstand des vollbeladenen Ausgangsschiffes (M 426) annähernd gleich war, ergaben sich mit dem zylindrischen Wulst 1.1.E bei dem 10 m kürzeren Schiff und derselben Verdrängung etwas größere Widerstandsverbesserungen als mit dem Wulst 5.0.3, der im unteren Geschwindigkeitsbereich gar keinen Leistungsgewinn

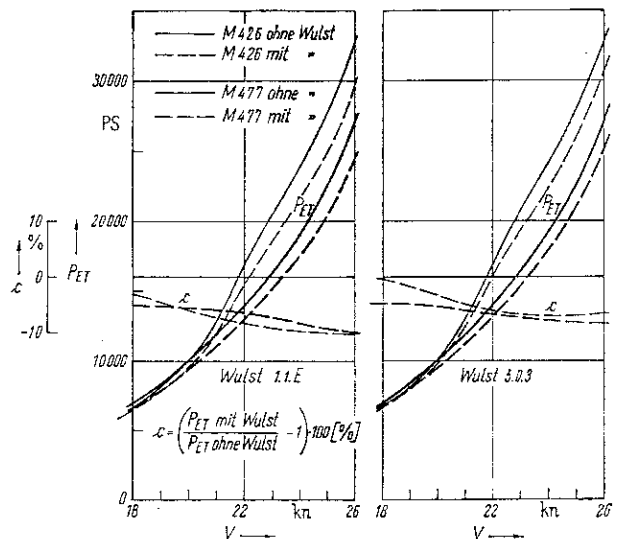


Bild 28. Einfluß des Bugwulstes 1.1.E und 5.0.3 auf die Schleppleistungen des 165-m-Schiffes (M 426) und des 155-m-Schiffes (M 477) für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung

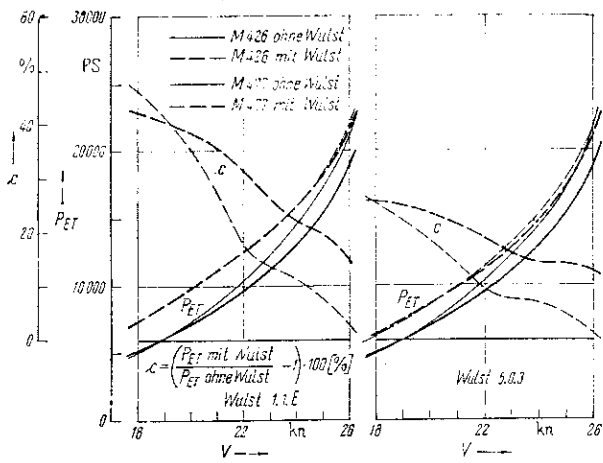


Bild 29. Einfluß des Bugwulstes 1.1.E und 5.0.3 auf die Schleppleistungen des 165-m-Schiffes (M 426) und des 155-m-Schiffes (M 477) für 10850 m<sup>3</sup> Verdrängung und 2% von Lpp hecklastiger Schwimmlage

brachte. Bei diesem Schiff war der Wulst 1.1.E dem anderen Wulst bei  $\nabla = 20000$  m<sup>3</sup> eindeutig überlegen. Das ergab sich dadurch, daß bei M 477 der Wulst 1.1.E im oberen Geschwindigkeitsbereich einen etwa 1% bis 2% höheren und der Wulst 5.0.3 einen etwa 1% bis 2% geringeren Leistungsgewinn brachte als bei M 426. Hinzu kommt aber, daß die Leistungskurven beider Schiffe einen unterschiedlichen Verlauf aufweisen. Deshalb genügt ein Leistungsvergleich allein nicht, um den unterschiedlichen Einfluß der Wulste auf die beiden Schiffe festzustellen.

Bei 20 kn Geschwindigkeit brachte der Wulst 1.1.E bei beiden Schiffen einen Leistungsgewinn von etwa 5%, der bei M 426 einen Geschwindigkeitsgewinn von 0,4 kn brachte und bei M 477, dessen Leistungskurve stärker ansteigt, nur einen von knapp 0,3 kn. Wulst 5.0.3 brachte bei M 426 einen Leistungsgewinn von 5,5%, das entspricht einem Geschwindigkeitsgewinn von ebenfalls etwa 0,4 kn. Da der Wulst 5.0.3 bei M 477 einen Leistungsgewinn von nur 3,5% brachte, war nur eine Geschwindigkeitserhöhung von etwas über 0,1 kn vorhanden. Bei  $V = 25$  kn ergab der Wulst 1.1.E bei M 426 eine um 9% und bei M 477 eine um knapp 10% kleinere Leistung, was bei beiden Schiffen einer Geschwindigkeitserhöhung von 0,6 kn entspricht. Wulst 5.0.3 hatte bei M 426 einen Leistungsgewinn von 8,5% und bei M 477 einen von 7%; bei beiden Schiffen entspricht das einem Geschwindigkeitsgewinn von ungefähr 0,5 kn.

Zusammenfassend kann man also im Hinblick auf die durch die Anbringung eines Wulstes sich ergebenden Geschwindigkeitserhöhungen bei  $V = 20$  kn und  $V = 25$  kn sagen, daß der Wulst 1.1.E bei beiden Schiffen fast immer höhere, in keinem Fall aber kleinere Geschwindigkeitsgewinne brachte als Wulst 5.0.3, und zum anderen, daß bei M 426 und  $V = 20$  kn beide Wulste einen größeren Gewinn brachten als bei M 477, während bei  $V = 25$  kn der Wulsteffekt bei beiden Schiffen ungefähr derselbe war.

In Bild 29 sind die Schleppleistungen beider Schiffe mit und ohne Wulst für den Ballastzustand aufgetragen. Aus dieser Darstellung geht die Überlegenheit des Wulstes 5.0.3 gegenüber dem Wulst 1.1.E deutlich hervor. Interessant ist aber, daß die durch den Anbau der Wulste sich ergebenden Leistungs- bzw. Geschwindigkeitsverluste bei M 477 und  $\nabla = 10850$  m<sup>3</sup> im oberen Geschwindigkeitsbereich bedeutend kleiner sind als bei dem 10 m längeren Ausgangsschiff M 426. So ergab sich beispielsweise für  $V = 25$  kn bei M 426 mit Wulst 1.1.E eine Leistungserhöhung von fast 20%, das entspricht einem Geschwindigkeitsverlust von 1,3 kn, und bei M 477 mit Wulst 1.1.E nur eine Leistungserhöhung von 7,5% bzw. ein Geschwindigkeitsverlust von 0,4 kn gegenüber dem Schiff ohne Wulst. Ähnlich verhielt es sich bei den mit dem Wulst 5.0.3 ausgerüsteten Schiffen. Hier betrug die durch den Anbau des Wulstes sich ergebende Leistungserhöhung für M 426 und  $V = 25$  kn 14% und der Geschwindigkeitsverlust 0,8 kn und bei M 477 nur 4,5% bzw. 0,25 kn. Das ist wahrscheinlich in der Hauptsache auf den unterschiedlichen Einfluß zurückzuführen, den der Wulst auf das Bugwellensystem der beiden Schiffe ausübt, was auch aus den Wellenaufnahmen hervorgeht. Werden die beiden unter gleichen Bedingungen (d. h. gleiche Verdrängung, gleiche Wulstbugausführungen und gleiche Geschwindigkeit) geschleppten Modell anhand der Wellenbilder miteinander verglichen, so zeigt sich, daß der hinter dem Wulst etwa zwischen Spant 14 und 16 entstehende Wellenberg bei dem längeren Modell etwas länger war als bei dem kürzeren. Daraus ersieht man, daß der Wulsteffekt auch noch von der den Wellenwiderstand eines Schiffes maßgeblich beeinflussenden Schiffslänge abhängt; in diesem Falle besonders bei der Ballastfahrt.

#### 10. Einfluß des Bugwulstes auf die Schleppleistung bei verschiedenen Oberflächenrauigkeiten

Da ein Bugwulst nicht nur den Wellenwiderstand eines Schiffes beeinflusst, sondern infolge der sich vergrößernden benetzten Schiffsoberfläche auch den Reibungswiderstand erhöht, bedeutet das, daß sich ein Bugwulst

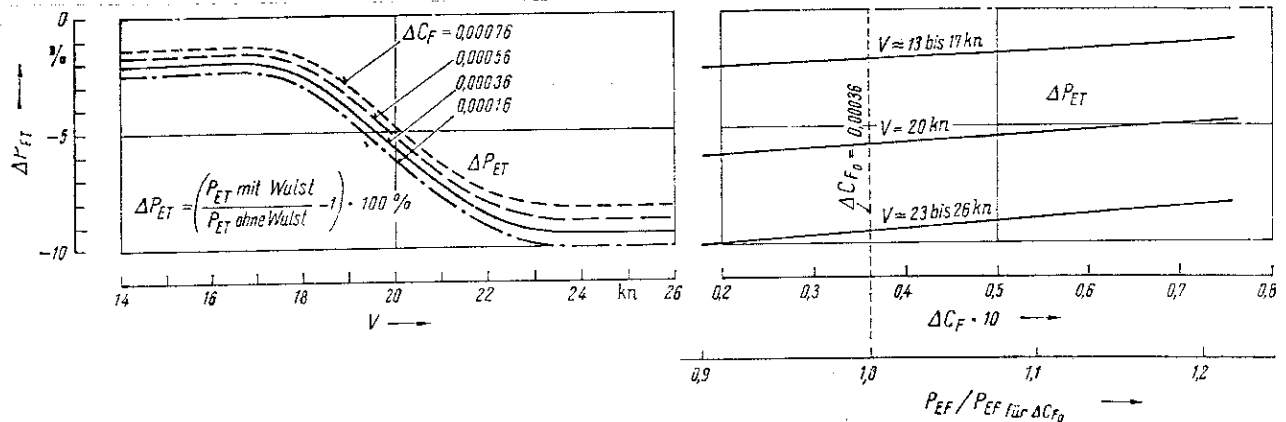


Bild 30. Einfluß des Rauigkeitszuschlages  $\Delta C_F$  auf die Leistungsunterschiede zwischen Schiff (M 477) mit und ohne Wulst für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung am Beispiel des Wulstes 1.1.E

bei einem Schiff, das lange nicht gedockt worden ist und dessen Außenhaut sich im Laufe der Zeit durch Bewuchs erheblich verschlechtert hat, weniger günstig auf die Schleppleistung auswirken wird als bei einem neuen oder gerade erst gedockten Schiff.

Um festzustellen, wie groß der Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf den Wulsteffekt ist, wurden die Modellwiderstände von M 477 ohne Wulst und mit Wulst 1.1.E bei 20 000 m<sup>3</sup> Verdrängung für mehrere Rauigkeitszuschläge auf die Großausführung umgerechnet (Bild 30).

Die Kurven zeigen den Leistungsunterschied zwischen Schiff mit und ohne Wulst sowohl in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit als auch in Abhängigkeit von der Schiffsoberflächenrauigkeit für  $\nabla = 20\,000\text{ m}^3$ . Es ist zu ersehen, daß die Leistungsverbesserung durch den Anbau des Wulstes je nach Geschwindigkeit um 0,3% bis 0,6% verringert wird, wenn sich der Reibungswiderstand des Schiffes infolge Bewuchs um 10% erhöht. Beträgt also die Leistungsverbesserung durch den Wulst bei der Umrechnung der Modellwiderstände auf die Großausführung mit Hilfe der Reibungsbeiwerte nach Schoenherr und einem Rauigkeitszuschlag  $\Delta C_F = 0,00036$  für  $V = 25\text{ kn}$  9,6%, so verringert sich dieser Wert auf 8,4%, wenn man anstelle von  $\Delta C_F = 0,00036$  einen Zuschlag  $\Delta C_F = 0,00073$  benutzt. In diesem Fall hätte sich der Reibungswiderstand des Schiffes um 20% erhöht.

### 11. Einfluß des Bugwulstes auf die Schleppleistung bei verschiedenen Tiefgängen

Um zu klären, bei welchen Beladungszuständen sich ein Bugwulst günstig und bei welchen er sich ungünstig

auf den Widerstand auswirkt, wurde das Modell M 477 ohne Wulst und mit Wulst 1.1.E bzw. 5.0.E bei einer größeren Anzahl von Tiefgängen und Trimmlagen geschleppt (Bild 31).

Zunächst kann festgestellt werden, daß der Anteil des Restwiderstandes am Gesamtwiderstand beim wulstlosen Schiff und gleichlastiger Schwimmlage bis  $F_{RPP} \approx 0,25$  ( $V \approx 19\text{ kn}$ ) von der Verdrängung fast unabhängig ist, während bei den höheren Geschwindigkeiten der Restwiderstand mit größer werdendem Tiefgang relativ stärker anwächst als der Reibungswiderstand. Das gilt besonders für kurze Schiffe, die bei relativ hohen Froudezahlen fahren. Das bedeutet aber, daß ein Bugwulst, der über den Wellenwiderstand als Teil des Restwiderstandes den Gesamtwiderstand des Schiffes beeinflusst, bei den größeren Verdrängungen und Geschwindigkeiten die Schleppleistungen mehr verbessern kann als bei den kleinen Verdrängungen.

Im Bild 32 sind die dem Bild 31 entnommenen Schleppleistungen des Schiffes ohne Wulst und mit Wulst 1.1.E in Abhängigkeit vom Schiffstiefgang bzw. von der Verdrängung dargestellt. Während beim Schiff ohne Wulst die für bestimmte Geschwindigkeiten erforderliche Leistung mit zunehmender Verdrängung gleichmäßig und stetig ansteigt, ist das beim Schiff mit Wulst, besonders mit Wulst 1.1.E, nicht der Fall. Diese Kurven haben im unteren Geschwindigkeitsbereich bis etwa  $V = 20\text{ kn}$  einen ausgesprochenen Buckel, dessen Maximum etwa bei dem Tiefgang liegt, bei dem der Wulst für  $V = 0$  noch nicht ganz eingetaucht ist. Bei den höheren Geschwindigkeiten verschiebt sich dieses Leistungsmaximum zu kleineren Tiefgängen und tritt auch infolge der nun steiler ansteigenden  $P_{ET}$ -Kurven nicht mehr so deutlich in Erscheinung.

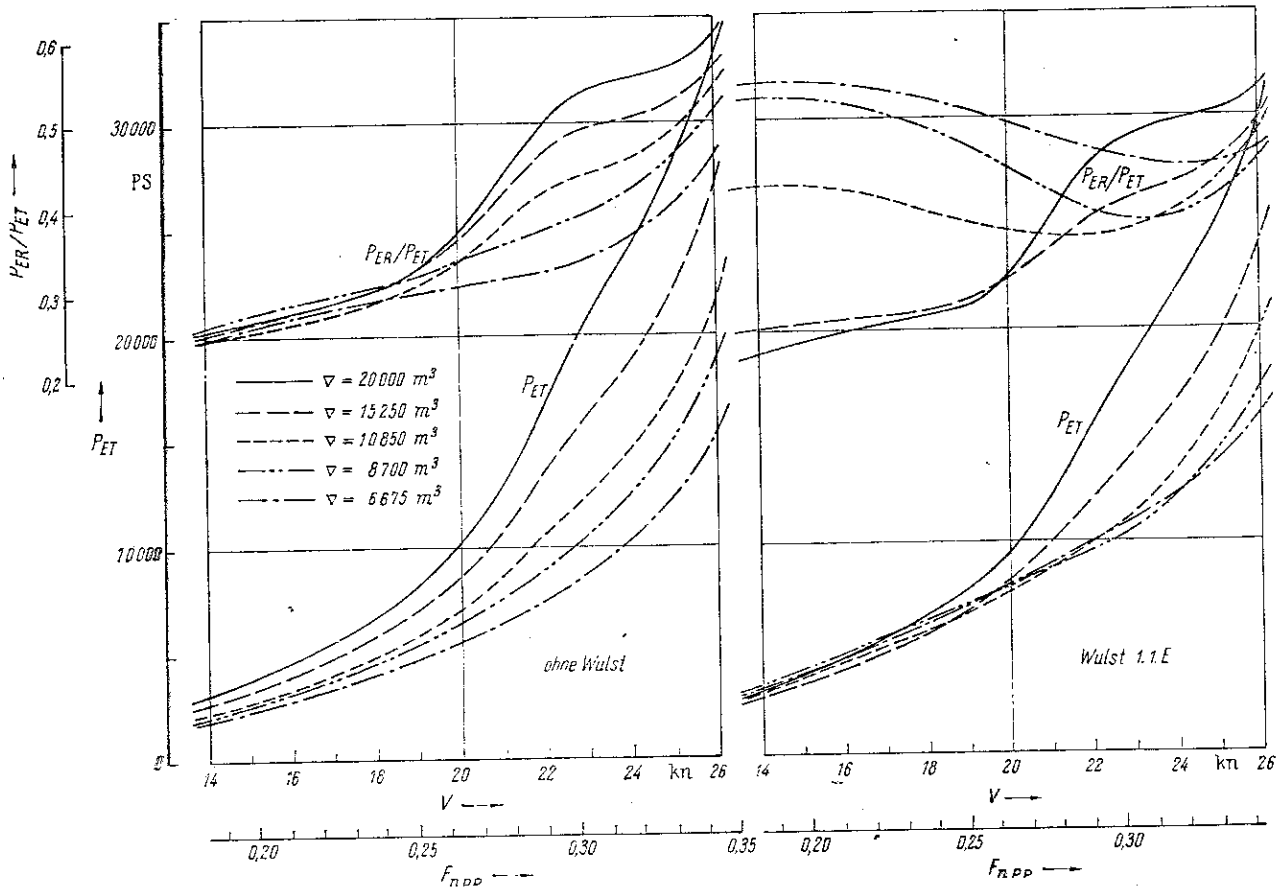


Bild 31. Schleppleistungen und Leistungsanteile des 155-m-Schiffes (M 477 — ohne paralleles Mittelschiff) für verschiedene gleichlastige Schwimmlagen

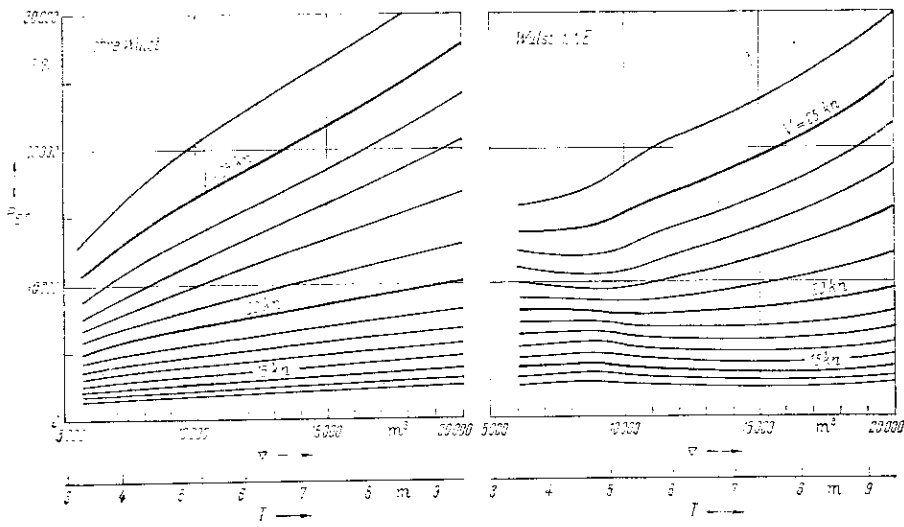


Bild 32.  
Einfluß der Verdrängung auf die Schleppleistung beim 155-m-Schiff (M 477)

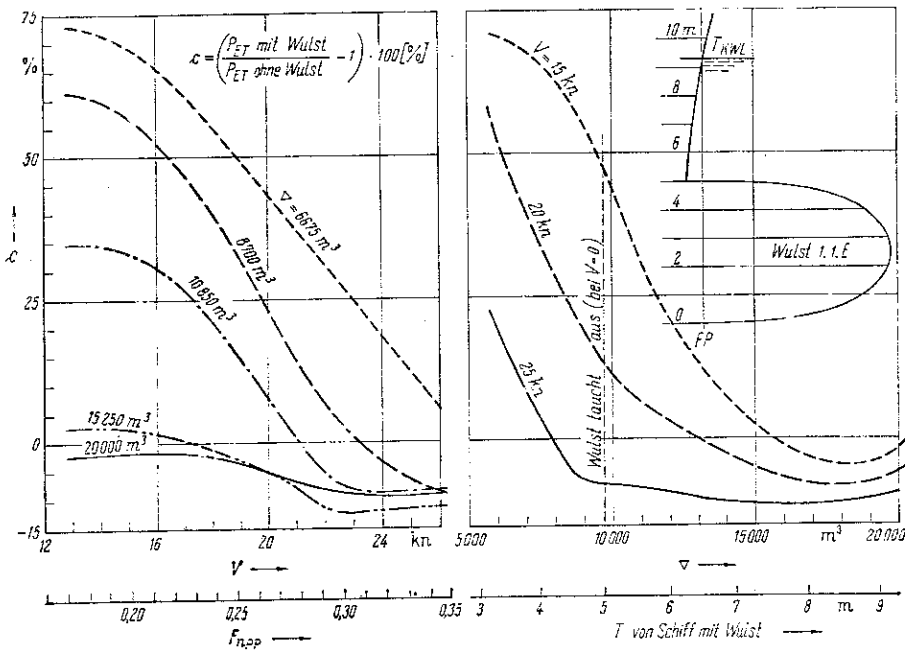


Bild 33.  
Prozentualer Leistungsunterschied zwischen Schiff ohne und mit Wulst 1.1.E beim 155-m-Schiff (M #77)

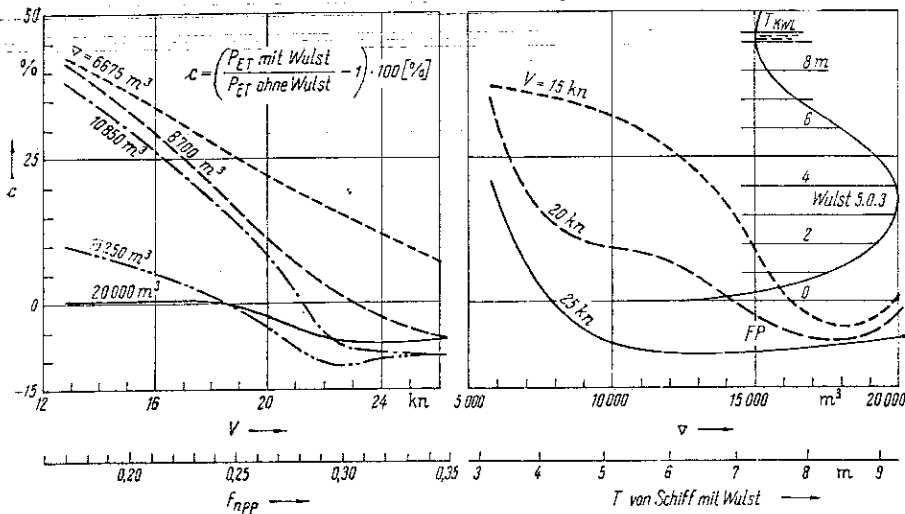


Bild 34.  
Prozentualer Leistungsunterschied zwischen Schiff ohne und mit Wulst 5.0.3 beim 155-m-Schiff (M 477)

Interessant ist auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Wulsteffektes, die in Bild 32 sehr deutlich zum Ausdruck kommt. Während der Wulst 1.1.E im teilweise ausgetauchten Zustand beispielsweise bei 4,5 m Tiefgang ein Leistungsmaximum bei 15 kn Geschwindigkeit hat, ergibt sich bei  $V = 24$  kn Geschwindigkeit ein Leistungsminimum, was darauf zurückzuführen ist, daß der Wulst während der Fahrt völlig überspült wurde und damit als voll eingetaucht angesehen werden kann. Die Leistungsunterschiede vom Schiff mit und ohne Wulst sind für das gleichlastige Schiff in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, und für drei verschiedene Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Verdrängung bzw. vom Tiefgang in Bild 33 und 34 dargestellt. Die Diagramme lassen deutlich erkennen, daß von der Geschwindigkeit des Schiffes sowohl die Größe der erzielbaren Leistungsverbesserungen als auch der Tiefgangsbereich, für den diese Verbesserungen gelten, abhängt. Bei dem untersuchten Schiff brachten beide Wulste bei 15 kn Geschwindigkeit nur bei den Tiefgängen zwischen etwa 7,50 m und 9,30 m einen Leistungsgewinn, der maximal 5% betrug, während sich bei den kleinen Verdrängungen, vor allem bei dem Wulst 1.1.E, eine starke Leistungserhöhung ergab. Bei 25 kn Geschwindigkeit dagegen brachten beide Wulste bereits bei 4,0 m Tiefgang einen Gewinn, der je nach Verdrängung und Wulstform zwischen 7% und 12% lag. Das heißt also, daß bei kleinen Geschwindigkeiten ein weit unter der Wasseroberfläche liegender Wulst bereits eine Widerstandserhöhung bringen kann, während sich bei hohen Geschwindigkeiten ein bei  $V = 0$  sogar austauchender Bugwulst günstig auf den Schiffswiderstand auswirkt, sofern er nicht zu weit austaucht, was bei Ballastfahrt meistens der Fall ist.

**12. Einfluß des Bugwulstes auf die Schlepplleistung der Vergleichsschiffe und Einfluß der Schwerpunktlage auf den Wulsteffekt**

Um festzustellen, welche Wirkung ein Wulst an anderen, bereits in Dienst gestellten Schiffen hat, wurden zusätzlich die Modelle 494 („Oriental Queen“) und M 485 (Kühlschiff) in der Originalform mit Wulst und mit abgearbeitetem Wulst untersucht. Außerdem wurde von

dem Kühlschiff noch ein zweites Modell (M 486) gebaut, das etwa die gleichen Formparameter hatte wie das Ausgangsschiff, aber keinen Bugwulst besaß.

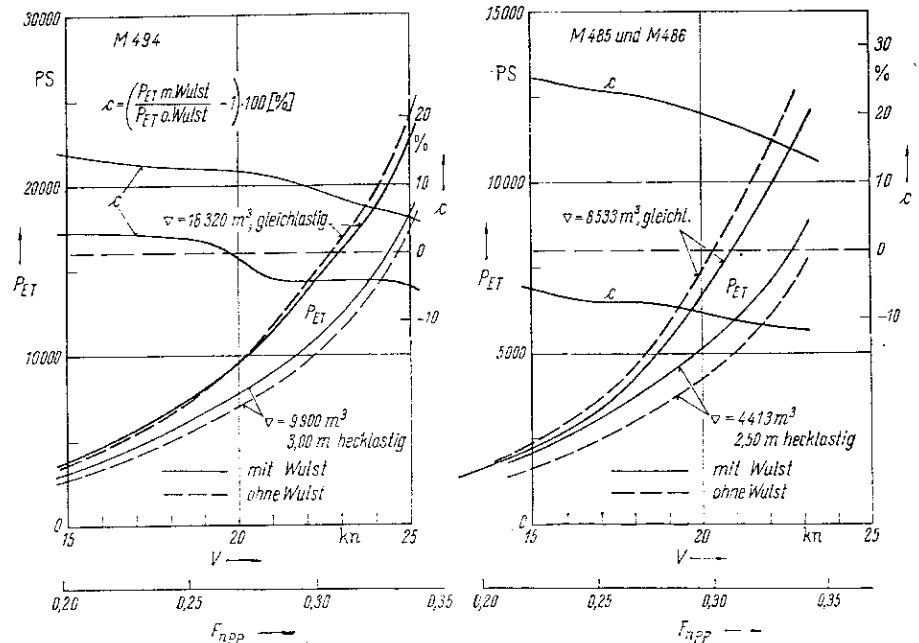
In Bild 35 sind die Schlepplleistungen von M 494 („Oriental Queen“) mit und ohne Wulst für das vollbeladene Schiff und für einen angenehmen Ballastzustand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt. Auch hier bringt der Bugwulst bei der großen Verdrängung eine Leistungsverbesserung, jedoch erst ab 20 kn Geschwindigkeit, und bei Fahrt in Ballast eine Leistungsver schlechterung. Für 21 kn Geschwindigkeit ergab sich beispielsweise für  $\nabla = 18320 \text{ m}^3$  eine Leistungsverbesserung von nur knapp 4% bzw. eine Geschwindigkeitserhöhung von 0,2 kn und bei  $\nabla = 9900 \text{ m}^3$  (Schiff 3,00 m hecklastig) eine Leistungsver schlechterung von 12% bzw. ein Geschwindigkeitsverlust von 0,7 kn. Der Einfluß des Bugwulstes auf die Schlepplleistungen beim Kühlschiff ist ebenfalls Bild 35 zu entnehmen. Auch hier zeigt sich wieder, daß der Wulst die Widerstandseigenschaften des Schiffes im vollbeladenen Zustand verbessert und bei Ballastfahrt verschlechtert. Für die Dienstgeschwindigkeit von 21 kn wurde bei der großen Verdrängung  $\nabla = 8533 \text{ m}^3$  durch den Wulst eine Leistungsverringerung von 10%, was einer Geschwindigkeitserhöhung von 0,6 kn entsprach, gemessen und beim Ballastzustand  $\nabla = 4413 \text{ m}^3$  (Schiff 2,50 m hecklastig) eine Leistungserhöhung von 19% bzw. ein Geschwindigkeitsverlust von fast 1,2 kn.

In Bild 36 und 37 sind die durch den Anbau eines Bugwulstes sich ergebenden Leistungsänderungen bei allen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schiffen zusammengestellt. Aus der gewählten Auftragung geht hervor, daß die durch einen Bugwulst bei der großen Verdrängung erzielten Leistungsverbesserungen bei den Geschwindigkeiten, für die die Schiffe ausgelegt sind, etwa die gleichen Größenordnungen haben und zwischen 7% und 10% liegen. Ähnlich verhält es sich mit den Widerstandserhöhungen durch den Wulst bei den Schiffen in Ballastfahrt.

Abschließend noch eine Bemerkung zu der durch den Anbau eines Wulstes sich ergebenden Veränderung des Verdrängungsschwerpunktes der Länge. Bei sämtlichen bisher durchgeführten Vergleichen der Restwiderstandsbeiwerte und Schlepplleistungen der Schiffe mit und ohne

Bild 35.

Vergleich der Schlepplleistungen von M 494 („Oriental Queen“) und M 485 (Kühlschiff) mit und ohne Wulst





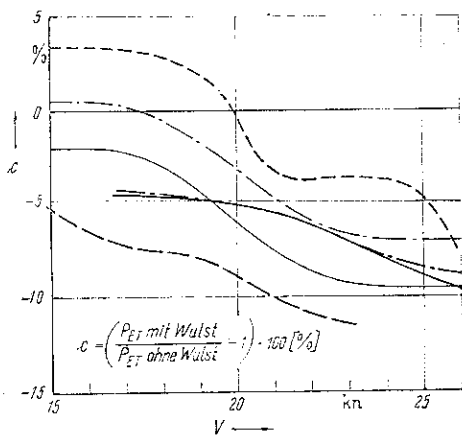


Bild 36. Prozentuale Leistungsunterschiede bei mehreren Fahrzeugen mit und ohne Wulst (voll beladen)

- M 477 mit Wulst 1.1.E,  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$
- - - M 477 mit Wulst 5.0.3,  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$
- M 426 mit Wulst 1.1.E,  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$
- - - M 426 mit Wulst 5.0.3,  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$
- M 485 mit Wulst,  $\nabla = 8533 \text{ m}^3$
- - - M 494 mit Wulst,  $\nabla = 18320 \text{ m}^3$

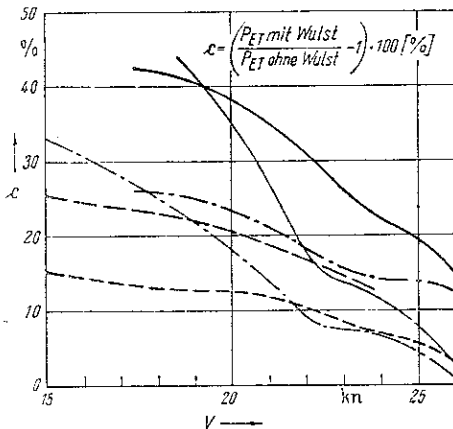


Bild 37. Prozentuale Leistungsunterschiede bei mehreren Fahrzeugen mit und ohne Wulst (Ballastzustand, 2% von L<sub>PP</sub> hecklastig)

- M 477 mit Wulst 1.1.E,  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$
- - - M 477 mit Wulst 5.0.3,  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$
- M 426 mit Wulst 1.1.E,  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$
- - - M 426 mit Wulst 5.0.3,  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$
- M 485 mit Wulst,  $\nabla = 4413 \text{ m}^3$
- - - M 494 mit Wulst,  $\nabla = 9900 \text{ m}^3$

Wulst war dieser Punkt nicht berücksichtigt worden. Um korrekt zu sein, müßte bei der Gegenüberstellung der Widerstände bzw. Leistungen eines Schiffes mit und ohne Bugwulst auch die dabei auftretende Schwerpunkverlagerung und deren Einfluß auf den Widerstand angegeben werden, um beide Einflüsse erkennen zu können. Um diese Frage nicht vollkommen zu übergehen, wurden von dem Kühlschiff zwei Modelle ohne Bugwulst geschleppt. Das eine war dadurch entstanden, daß bei dem Originalmodell (M 485) der Bugwulst nachträglich entfernt worden war, wodurch sich der Verdrängungsschwerpunkt weiter nach hinten verlagerte, und das

andere Modell M 486 war von vornherein so gebaut worden, daß es die gleiche Schwerpunktlage besaß wie M 485 mit Bugwulst. Vergleicht man die Schleppeleistungen dieser beiden Modelle für  $\nabla = 8533 \text{ m}^3$  miteinander, so sind keine Unterschiede festzustellen (Bild 35). Die dargestellten Leistungsunterschiede zwischen dem Kühlschiff mit Wulst und dem entsprechenden Schiff ohne Wulst sind folglich nur auf die Wirkung des Bugwulstes zurückzuführen. Es ist anzunehmen, daß das gleiche Ergebnis auch für die Modelle M 426 und M 477 zutrifft.

#### 4.2. Einfluß der Heckform auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften

Um festzustellen, ob ein Spiegelheck bei schnellen Frachtschiffen die Widerstands- und Propulsionseigenschaften des Schiffes verbessert [45], wurde das Modell M 426 ohne Bugwulst in der Mitte geteilt und anstelle des mit einem normalen Kreuzerheck versehenen Hinterschiffes ein Hinterschiff mit Spiegelheck angesetzt, dessen Decksbreite am Spiegel etwa 75% von der größten Decksbreite betrug. Mit dem so veränderten Modell M 436B wurden ebenso wie mit dem Ausgangsmodell M 426 bei der großen Verdrängung  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  und für den Ballastzustand  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$ , Schiff 3,30 m hecklastig, sowohl Widerstands- als auch Propulsionsversuche durchgeführt.

Wie sich zeigt, unterscheiden sich die Schleppeleistungen beider Heckausführungen kaum voneinander. Hinsichtlich der Propulsionseigenschaften im Ballastzustand ergaben sich zwischen den beiden Heckvarianten nur geringfügige Unterschiede, weil sich der Spantcharakter in dem Bereich zwischen Basis und Ballasttiefgang bei beiden Heckformen kaum unterschied (Bild 38). Bei der großen Verdrängung  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  waren jedoch Unterschiede zwischen den Propulsionseigenschaften von M 426 und M 426B vorhanden, wobei das Schiff mit Spiegelheck etwa 5% bis 7% kleinere Propulsionsgütegrade hatte als das Schiff mit Kreuzerheck. Dieses ist in erster Linie auf die im Mittel 4% höheren Sogziffern bei M 426B zurückzuführen, die

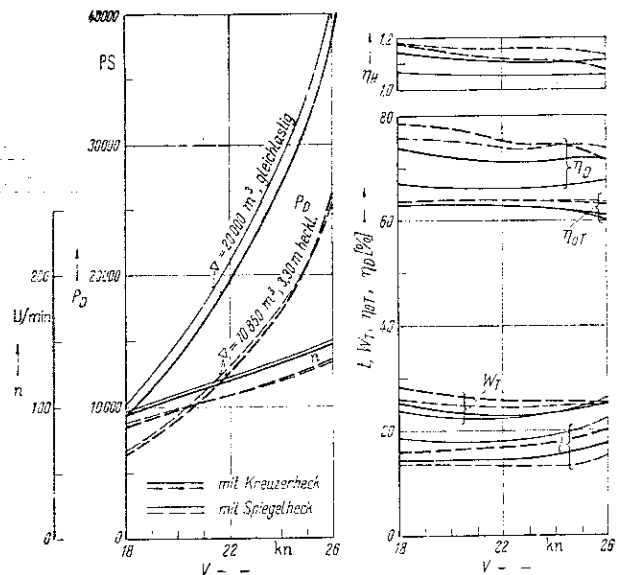


Bild 38. Ergebnisse des Propulsionsversuches der Ausgangsform (M 426); mit Kreuzerheck und mit Spiegelheck (D = 6,60 m, P/D = 0,90, Z = 4, A<sub>D</sub>/A<sub>0</sub> = 0,55)

sich wahrscheinlich durch die vor dem Propeller ab WL 6 stark ausfallenden Hinterschiffsspanen ergaben. Da sich die Mitstromziffern beim Spiegelheck gegenüber dem Kreuzerheck so gut wie nicht geändert hatten, haben sich die Schiffsgütegrade  $\eta_H$  von M 426B gegenüber M 426 verschlechtert. Zusammen mit den etwas kleineren Gütegraden der Anordnung führte das schließlich zu der erwähnten Verschlechterung der Gesamtpropulsionsgütegrade  $\eta_D$  beim Schiff mit Spiegelheck gegenüber dem Schiff mit Kreuzerheck. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß dieser Vergleich nur mit einer Spiegelheckausführung durchgeführt wurde und deshalb nicht verallgemeinert werden darf.

#### 4.3. Einfluß der Schiffslänge auf die Schlepp- und Wellenleistungen

Um den Einfluß der Schiffslänge, bzw. was in diesem Fall dasselbe ist, den Einfluß der Völligkeit auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften zu ermitteln, wurden außer dem Modell des 165 m langen Ausgangsschiffes (M 426) auch noch die Modelle von zwei 160-m-Schiffen (M 478 und M 479) und von zwei 155-m-Schiffen (M 476 und M 477) untersucht. Wie die Ergebnisse zeigen (Bild 39 und 40), ist die Länge des Schiffes bei  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 20 kn bis 21 kn für den untersuchten Längenbereich von 155 m bis 165 m absolut gesehen nicht wesentlich entscheidend für die Größe der Schleppleistungen. Bei den Geschwindigkeiten  $V > 21$  kn macht sich jedoch ein deutlicher Längeneinfluß bemerkbar, was einmal vor allem auf die bei den kürzeren Schiffen sich ergebenden größeren Völligkeitsgrade der Verdrängung zurückzuführen ist, und zum anderen darauf, daß die gleiche Geschwindigkeit bei den kürzeren Schiffen einer höheren Froudezahl entspricht. So benötigen beispielsweise bei 25 kn Geschwindigkeit die 160-m-Schiffe M 478 ( $C_{BPP} = 0,550$ ) 3% und M 479 ( $C_{BPP} = 0,567$ ) 7% und die 155-m-Schiffe M 476 und M 477 (beide  $C_{BPP} = 0,586$ ) etwa 22% mehr Leistung als das 165-m-Schiff M 426 ( $C_{BPP} = 0,550$ ). Bei 23 kn Geschwindigkeit steigt die Leistungserhöhung der beiden 155-m-Schiffe gegenüber dem 165-m-Schiff sogar auf 25% an, was einem Geschwindigkeitsverlust von etwa 1,4 kn entspricht. Während die 155-m-Schiffe im oberen Geschwindigkeitsbereich annähernd die gleichen Schleppleistungen benötigen, ergeben sich bei den 160-m-Schiffen, wahrscheinlich bedingt durch die verschiedenen Völligkeitsgrade der Verdrängung, unterschiedliche Leistungen. Umgekehrt ist es im Geschwindigkeitsbereich  $V < 21$  kn, wo der Einfluß des Völligkeitsgrades auf den Widerstand und der von der Froudezahl abhängige Wellenwiderstand nicht so groß ist. Das Modell M 476 hat auf Grund des etwa 8,5% von  $L_{PP}$  langen parallelen Mittelschiffes einen bis zu 6% höheren Widerstand als M 477, das kein paralleles Mittelschiff besitzt.

In Bild 41 sind die Schleppleistungen von M 477, M 479 und M 426, die alle drei die gleiche Konstruktionsverdrängung und kein paralleles Mittelschiff besitzen, für  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bzw. von der Schiffslänge aufgetragen. Diese Darstellung zeigt deutlich, daß sich der Einfluß der Schiffslänge bzw. des Völligkeitsgrades der Verdrängung, besonders absolut gesehen, erst bei den höheren Geschwindigkeiten ab  $V = 21$  kn bemerkbar macht.

Im Ballastzustand ist der Längeneinfluß auf die Leistungen wesentlich geringer als bei der großen Verdrängung. Auch die unterschiedlichen Völligkeitsgrade der Verdrängung bei den 160-m-Schiffen und das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein eines parallelen Mittel-

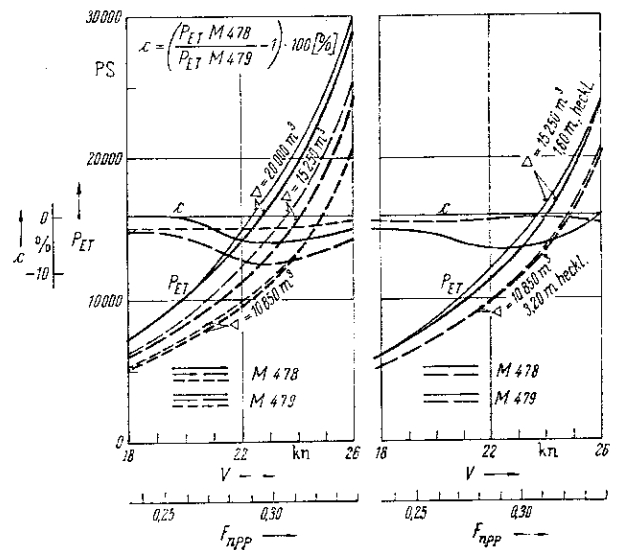


Bild 39. Schleppleistungen für die beiden 160-m-Varianten (M 478 —  $C_{BPP} \approx 0,550$ , M 479 —  $C_{BPP} = 0,567$ )

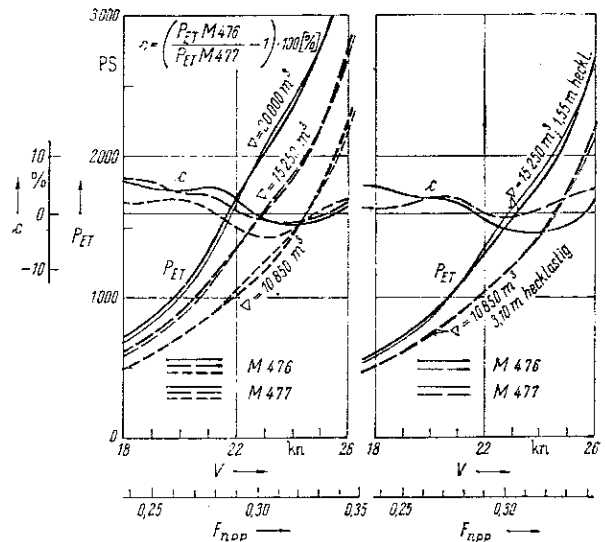


Bild 40. Schleppleistungen für die beiden 155-m-Varianten (M 476 — mit parallelem Mittelschiff, M 477 — ohne paralleles Mittelschiff)

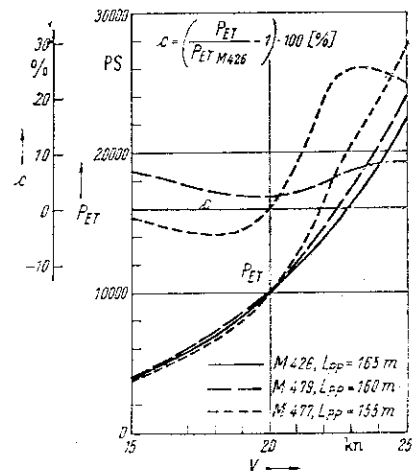


Bild 41. Schleppleistungen für ein 155-m-, 160-m- und das 165-m-Schiff für  $20000 \text{ m}^3$  Verdrängung

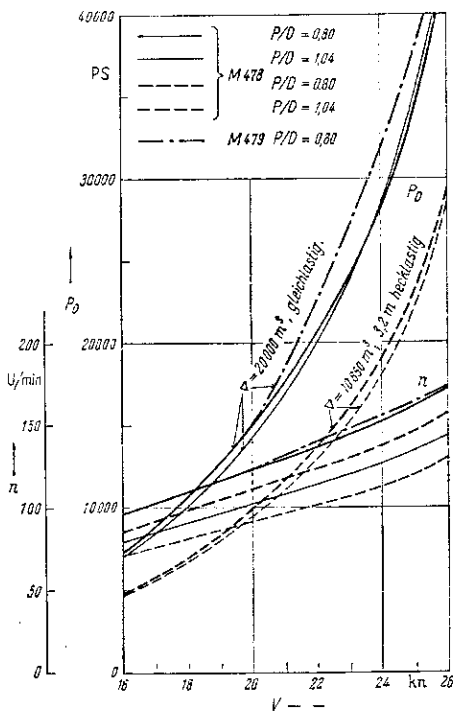


Bild 42. Wellenleistungen der 160-m-Varianten  
( $D = 6,40$  m,  $P/D = 0,80$  u.  $1,04$ ,  $Z = 4$ ,  $A_D/A_0 = 0,55$ )

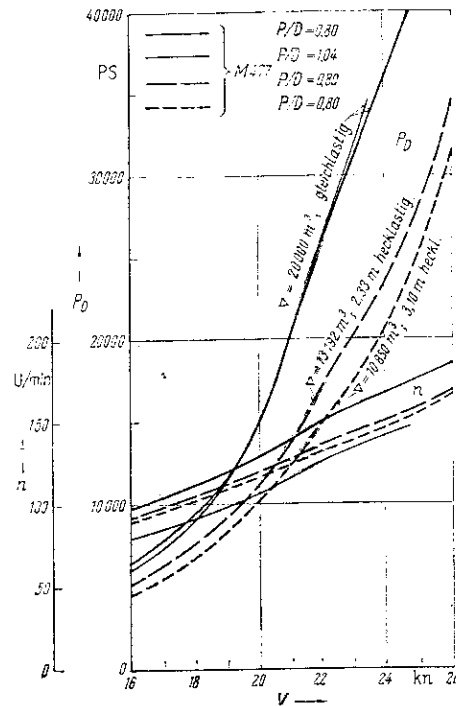


Bild 43. Wellenleistung einer 155-m-Variante (M 477)  
( $D = 6,20$  m,  $P/D = 0,80$  u.  $1,04$ ,  $Z = 4$ ,  $A_D/A_0 = 0,55$ )

schiffes bei den 155-m-Schiffen wirken sich kaum auf den Schiffswiderstand aus, so daß die Schlepplaste für eine bestimmte Geschwindigkeit benötigen. Allgemein ist zu sagen, daß der Widerstand der 160-m-Schiffe bei Ballastfahrt für den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich etwa 4% höher liegt als der des Ausgangsschiffes und der Widerstand der 155-m-Schiffe bei kleinen Geschwindigkeiten ( $V = 14$  kn) 6% niedriger und bei hohen Geschwindigkeiten ( $V = 24$  kn) 10% höher liegt als der des Ausgangsschiffes.

Zusammenfassend kann im Hinblick auf diese Versuche gesagt werden, daß die Schiffslänge, innerhalb der untersuchten Grenzen, bei gleicher Verdrängung im Geschwindigkeitsbereich bis etwa 20 kn die Schlepplaste des Schiffes kaum beeinflußt. Bei höheren Geschwindigkeiten wirkt sich jedoch eine kleine Schiffslänge ungünstig auf die Widerstandseigenschaften aus.

Um den Einfluß der unterschiedlichen Schiffslänge auch auf die Propulsionseigenschaften zu erfassen, wurden mit mehreren Modellen auch Propulsionsversuche durchgeführt. Für alle Versuche wurde der gleiche, mit verstellbaren Flügeln versehene, 200 mm große Modellpropeller VP 1113 benutzt. In Bild 38, 42 und 43 sind die Propulsionsversuchsergebnisse aufgetragen; sie gelten für Probefahrtbedingung.

Wie aus Tafel 12 und 13 hervorgeht, wurden bei M 426, M 478 und M 477 bei der großen Verdrängung trotz etwas unterschiedlicher Sog- und Mitstromziffern bei den höheren Schiffsgeschwindigkeiten die gleichen Schiffsgütegrade  $\eta_H$  und Gütegrade der Anordnung  $\eta_R$  gemessen. Jedoch ergaben sich bei dem langen Schiff M 426 ( $L_{PP} = 165$  m) die günstigsten und bei dem kurzen Schiff M 477 ( $L_{PP} = 155$  m) infolge des kleineren Propellerdurchmessers die ungünstigsten Propellerwirkungsgrade  $\eta_0$ . Allgemein kann man sagen, daß die Propulsionseigenschaften bei der Ballastverdrängung für

$V = 17$  kn bis 21 kn etwa 5% und für 25 kn etwa 1,5% höher sind als bei der großen Verdrängung.

Aus den Diagrammen ergeben sich für die einzelnen Fahrzeugtypen und drei abgenommenen Wellenleistungen die in Tafel 14 angegebenen Probefahrtgeschwindigkeiten (bei den mit verschiedenen Propellersteigungen durchgeführten Versuchen wurden die mittleren Geschwindigkeiten gewählt).

Aus der Zusammenstellung in Tafel 14, die nur den Geschwindigkeitsbereich über 20 kn erfaßt, ist ebenfalls, wie bei den Widerstandsversuchsergebnissen, deutlich der Einfluß der Schiffslänge auf die Leistung zu erkennen.

#### 4.4. Vergleich der SVA-Entwürfe mit den Vergleichsschiffen

Die Schlepplaste der beiden Vergleichsschiffe sind in Bild 44 und 45 dargestellt. Zwecks besseren Vergleiches der Versuchsergebnisse wurden die Meßwerte der großen Verdrängung so auf die Großausführung umgerechnet, daß sich, wie bei den SVA-Entwürfen, eine Verdrängung von 20.000 m<sup>3</sup> ergab. Die auf diese Weise für M 485, M 486 und M 494 ermittelten Schlepplaste sind zusammen mit den Leistungen der SVA-Entwürfe M 426 und M 477 in Bild 46 aufgetragen. Dieser Vergleich ist zwar nicht ganz exakt, weil die beiden Vergleichsschiffe für eine andere Geschwindigkeit bzw. für eine andere Froudezahl ausgelegt worden sind, zeigt aber doch die besonderen günstigen Widerstandseigenschaften des 165-m-Ausgangsschiffes (M 426) im oberen Geschwindigkeitsbereich, und zwar sowohl beim Vergleich der Schiffe ohne Wulst als auch mit Wulst. Das ist im Hinblick auf M 494 sowohl auf den gegenüber

Tafel 12. Zusammenstellung der wichtigsten Propulsionsgrößen für die untersuchten Modelle (große Verdrängung)

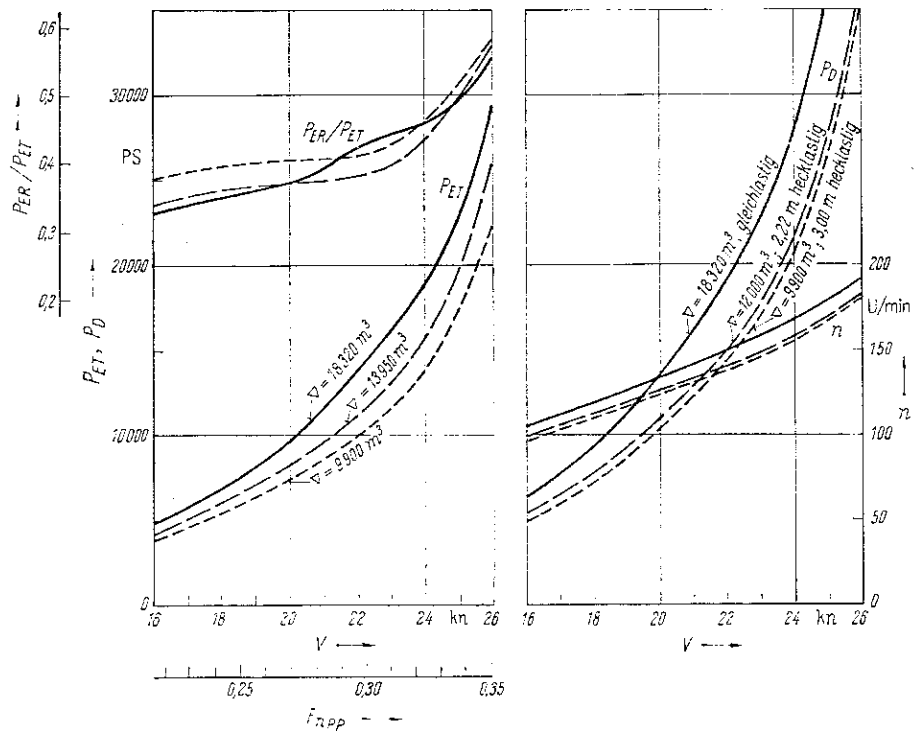
Modell Nr.	426	478	479	477	494	426 B
Verdrängung $\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	20000	20000	20000	20000	18320	20000
Modellmaßstab	33	32	32	31	30	33
Prop.-Durchm. D [m]	6,60	6,40	6,40	6,20	6,00	6,60
Prop.-Steigungsverhältnis P/D	0,90	0,80/1,04	0,80	0,80/1,04	0,80	0,90
Sogziffer t [%]						
V = 17 kn	14,4	14,4	14,4	15,6	16,6	16,6
21 kn	14,4	17,0	17,0	18,9	18,8	17,7
25 kn	16,4	19,0	19,0	19,8	19,4	20,8
Mitstromziffer w <sub>T</sub> [%]						
V = 17 kn	26,4	27,4	26,2	25,6	28,5	30,6
21 kn	23,2	25,6	24,1	25,3	26,4	25,4
25 kn	24,3	26,5	25,0	25,0	27,4	24,9
Mitstromziffer w <sub>Q</sub> [%]						
V = 17 kn	25,0	29,8	25,7	26,8	28,8	26,8
21 kn	22,1	25,9	20,8	25,3	27,9	24,1
25 kn	21,4	24,3	21,8	24,8	24,5	23,0
Schiffsgütegrad $\eta_H = (1-t)/(1-w_T)$						
V = 17 kn	1,555	1,180	1,160	1,135	1,167	1,202
21 kn	1,115	1,116	1,093	1,086	1,104	1,089
25 kn	1,105	1,101	1,080	1,070	1,110	1,055
Propellerwirkungsgrad $\eta_{eT}$ [%]						
V = 17 kn	63,0	61,3	61,2	61,5	61,1	60,0
21 kn	63,0	61,1	61,0	61,0	59,8	60,4
25 kn	61,8	59,8	59,2	59,6	57,1	59,0
Gütegrad der Anordnung $\eta_R = \eta_D/\eta_H \cdot \eta_{eT}$						
V = 17 kn	1,034	0,948	1,012	0,973	1,000	1,071
21 kn	1,028	1,003	1,063	0,998	0,982	1,013
25 kn	1,055	1,046	1,048	1,007	1,040	1,038
Propulsionsgütegrad $\eta_D = P_E/P_D$ [%]						
V = 17 kn	75,0	68,6	71,8	67,9	71,3	77,2
21 kn	72,2	68,4	70,8	66,1	64,8	65,1
25 kn	72,1	68,8	67,0	64,2	65,9	64,6

Tafel 13. Zusammenstellung der wichtigsten Propulsionsgrößen für die untersuchten Modelle (Ballastzustand)

Modell Nr.	426	478	477	494	426 B
Verdrängung $\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	10850	10850	10850	9900	10850
Modellmaßstab $\lambda$	33	32	31	30	33
Prop.-Durchm. D [m]	6,60	6,40	6,20	6,00	6,60
Prop.-Steigungsverhältnis P/D	0,90	0,80/1,04	0,80	0,80	0,90
Sogziffer t [%]					
V = 17 kn	15,9	13,2	13,2	15,9	17,9
21 kn	16,9	14,9	14,9	19,9	18,0
25 kn	18,6	19,0	19,0	21,8	20,2
Mitstromziffer w <sub>T</sub> [%]					
V = 17 kn	29,2	31,5	30,3	31,2	32,0
21 kn	26,9	28,0	28,0	29,2	29,2
25 kn	25,5	27,4	27,2	28,0	27,1
Mitstromziffer w <sub>Q</sub> [%]					
V = 17 kn	27,5	33,5	29,5	31,5	29,3
21 kn	25,0	28,8	26,1	29,1	26,6
25 kn	24,7	27,1	24,2	26,9	24,1
Schiffsgütegrad $\eta_H = (1-t)/(1-w_T)$					
V = 17 kn	1,192	1,266	1,245	1,223	1,207
21 kn	1,137	1,182	1,182	1,132	1,158
25 kn	1,093	1,116	1,113	1,086	1,095
Propellerwirkungsgrad $\eta_{eT}$ [%]					
V = 17 kn	63,8	62,3	62,5	62,1	61,0
21 kn	63,8	62,4	62,6	61,7	61,3
25 kn	63,5	61,8	61,8	61,0	60,3
Gütegrad der Anordnung $\eta_R = \eta_D/\eta_H \cdot \eta_{eT}$					
V = 17 kn	1,043	0,970	1,014	0,991	1,075
21 kn	1,054	0,988	1,038	1,002	1,065
25 kn	1,060	1,013	1,060	1,017	1,060
Propulsionsgütegrad $\eta_D = P_E/P_D$ [%]					
V = 17 kn	79,0	76,4	78,9	76,0	79,1
21 kn	76,4	72,9	76,8	69,9	75,5
25 kn	73,6	69,9	72,9	67,4	70,0

Bild 11.

Schlepp- und Wellenleistungen von M 494 („Oriental Queen“) mit Bugwulst (D = 6,00 m, P/D = 0,80, Z = 4, A<sub>D</sub>/A<sub>0</sub> = 0,55)



Tafel 11. Erreichbare Geschwindigkeit der untersuchten Fahrzeuge für verschiedene Wellenleistungen

Modell Nr.	M 426	M 478	M 479	M 477	M 426 B
$L_{PP}$ [m]	165	160		155	165
$\nabla = 20000 \text{ m}^3$ , gleichlastig					
18000 PS	21,5 kn	21,3 kn	20,9 kn	20,6 kn	21,0 kn
24000 PS	23,3 kn	23,0 kn	22,3 kn	21,7 kn	22,8 kn
36000 PS	25,8 kn	24,9 kn	24,7 kn	23,5 kn	25,5 kn
$\nabla = 10850 \text{ m}^3$ , 3,30 m hecklastig					
18000 PS	21,3 kn	23,8 kn	—	23,2 kn	24,2 kn
24000 PS	25,6 kn	25,3 kn	—	24,7 kn	25,7 kn

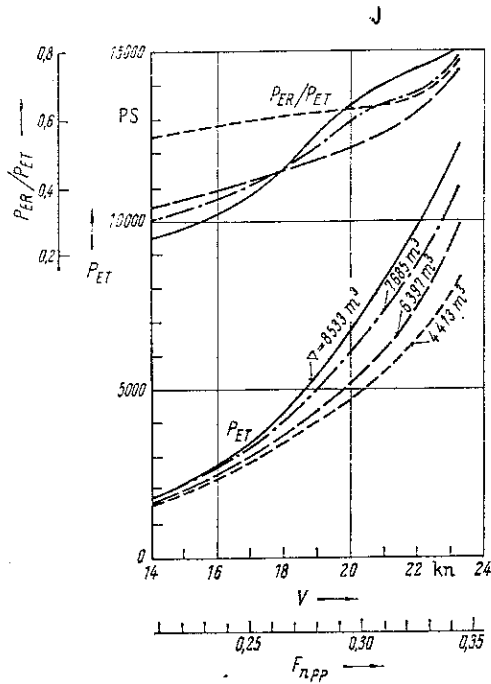


Bild 45. Schleppleistungen von M 485 (Kühlschiff) mit Bugwulst

M 426 ( $C_{BPP} = 0.55$ ,  $L_{PP} = 165 \text{ m}$ ) unterschiedlichen Völligkeitsgrad der Verdrängung ( $C_{BPP} = 0.572$ ) als auch auf die unterschiedliche Schiffslänge ( $L_{PP} = 152.38$  bei  $\lambda = 30,89$ ) zurückzuführen und bezüglich M 485/M 486 ( $C_{BPP} = 0.557$ ,  $L_{PP} = 164.72 \text{ m}$  bei  $\lambda = 33,21$ ) mehr auf die Form des Schiffes, weil hier die beiden genannten Formparameter mit denen von M 426 sehr gut übereinstimmen. Das bedeutet aber, daß M 494 („Oriental Queen“), auch wenn es gegenüber M 426 schlechtere Widerstandseigenschaften aufweist, trotzdem im Hinblick auf die Formparameter eine widerstandsmäßig günstige Schiffsförmigkeit besitzt.

Außerdem wurden mit dem Modell 494 („Oriental Queen“) Propulsionsversuche mit dem SVA-Modellpropeller VP 1113 ( $D = 6,0 \text{ m}$ ) durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 44 dargestellt sind. Hiernach erreicht das Schiff im vollbeladenen Zustand mit der vorhandenen Wellenleistung von 12800 PS eine Probefahrtgeschwindigkeit von 19,75 kn. Das sind 0,5 kn weniger als nach [28] angegeben wurde. Es ist möglich, daß der Unterschied darauf zurückzuführen ist, daß die angegebene Geschwindigkeit für andere Probefahrtbedingungen gilt, als sie bei den SVA-Versuchen zugrunde gelegt wurden. Vergleicht man jedoch die SVA-Entwürfe im Hinblick auf ihre Propulsionseigenschaften mit M 494, so zeigt sich, daß sie mindestens ebenso gute Eigenschaften aufweisen wie dieses Vergleichsschiff.

## 5. Zusammenfassung

### 5.1. Einfluß eines Bugwulstes auf die Widerstandseigenschaften

In letzter Zeit nimmt die Zahl der mit einem Wulstbug ausgerüsteten Schiffe ständig zu, da sich gezeigt hat, daß ein Bugwulst, hauptsächlich durch Verminderung des Wellenwiderstandes, die Widerstandseigenschaften schneller Schiffe erheblich verbessern kann. Das gilt vor allem für im Liniendienst verkehrende Frachtschiffe.

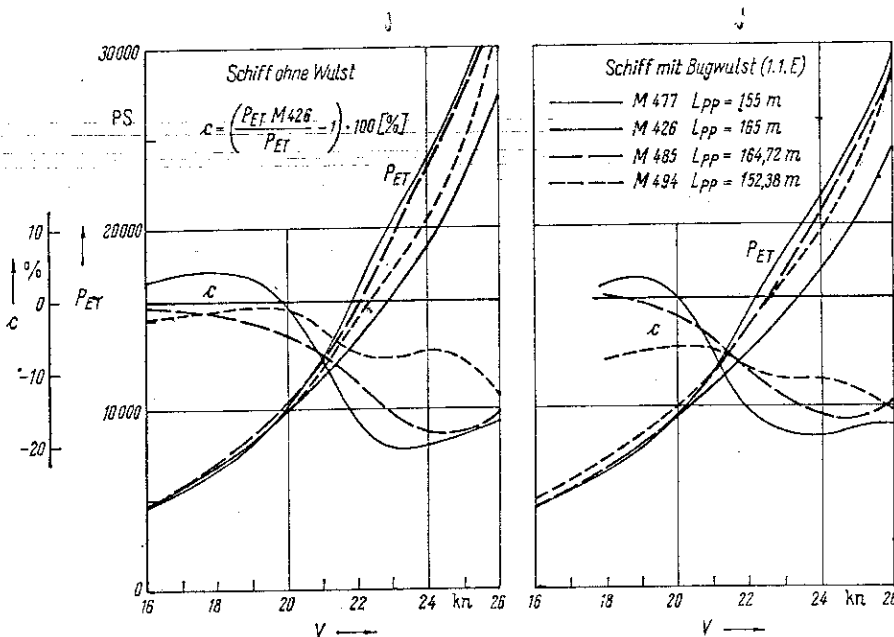


Bild 46.

Versuchsergebnisse von 2 Serien- und 2 Vergleichsschiffen, umgerechnet auf eine einheitliche Verdrängung von  $20000 \text{ m}^3$

Aus der Vielzahl der in den letzten Jahren erschienenen Veröffentlichungen ist jedoch zu ersehen, daß die Ansichten über die Bugwulstgestaltung erheblich auseinander gehen. Das ist wohl in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die Untersuchungen, auf die sich verschiedene Autoren stützen, jeweils an verschiedenen Schiffstypen und Schiffskörperformen durchgeführt wurden. Zweck der vorliegenden Untersuchung war es festzustellen, welcher Bugwulst für ein 155 m bzw. 165 m langes, mit einer Geschwindigkeit von über 20 kn fahrendes Frachtschiff am geeignetsten ist.

Zu diesem Zweck wurde zunächst das Modell eines 165-m-Schiffes nacheinander mit einer Vielzahl von Bugwulsten versehen und bei der Konstruktionsverdrängung  $\nabla = 20000 \text{ m}^3$  und einer angenommenen Ballastverdrängung  $\nabla = 10850 \text{ m}^3$  (Schiff hecklastig) für einen korrespondierenden Geschwindigkeitsbereich von 18 kn bis 26 kn untersucht. In der Hauptsache wurden nur die aus den Versuchen sich ergebenden Restwiderstände des Schiffes mit und ohne Wulst verglichen, weil der Wulsteinfluß auf diese Werte am größten ist und die Änderungen des Reibungswiderstandes durch den Wulst, von Veränderungen in der Grenzschicht abgesehen, sich rechnerisch erfassen lassen. Die Untersuchungen haben zu folgenden Feststellungen geführt:

1. Ausgehend von gleichen Wulstquerschnitten am vorderen Lot ( $A_{FP}/A_M = 0,09$ ) kann man sagen, daß die Form der untersuchten Wulste beim vollbeladenen Schiff keinen großen Einfluß auf den Widerstand ausübte. Beim Schiff im Ballastzustand ergaben sich in jedem Fall höhere Widerstände als beim Schiff ohne Wulst. Am kleinsten waren die Widerstandsverschlechterungen bei den zur KWL hin schlank auslaufenden Wulsten.
2. Aus den Untersuchungen mit Bugwulsten unterschiedlicher Querschnitte ( $A_{FP}/A_M < 0,09$ ) und Formen ergab sich, daß sowohl die durch den Wulst erzielten Widerstandsverbesserungen bei der großen Verdrängung als auch die Widerstandsverschlechterungen bei der kleinen Verdrängung mit größer werdendem Wulstquerschnitt zunehmen und umgekehrt. Daß darüber hinaus aber auch noch bei Wulsten mit kleinem Querschnitt die Wulstform eine Rolle spielt, zeigte sich an dem in Anlehnung an die Maierform entworfenen Bugwulst ( $A_{FP}/A_M = 0,06$ ), der bei der großen Verdrängung noch eine recht beachtliche Widerstandsverbesserung brachte und bei der kleinen Verdrängung den Schiffswiderstand so gut wie gar nicht erhöhte.
3. Bei den Untersuchungen mit zylindrischen Wulsten unterschiedlicher Größe zeigte sich, daß der größere Wulst ( $A_{FP}/A_M = 0,13$ ) bei der großen Verdrängung und den hohen Geschwindigkeiten ( $V > 22 \text{ kn}$ ) etwas günstiger, im unteren Geschwindigkeitsbereich, vor allem aber bei der Ballastverdrängung wesentlich ungünstiger war als der kleinere Wulst mit den etwa üblichen Abmessungen ( $A_{FP}/A_M = 0,09$ ).
4. Eine Verjüngung des Wulstes nach hinten zum Schiffskörper brachte bei dem Wulst mit kreisförmigem Querschnitt ( $A_{FP}/A_M = 0,09$ ) bei der großen Verdrängung eine Verschlechterung und bei der kleinen Verdrängung, aber erst im oberen Geschwindigkeitsbereich, eine leichte Verbesserung des Widerstandes.
5. Die Untersuchungen mit verschiedenen Wulstkopfausführungen bei den Wulsten mit kreisförmigem Querschnitt ergaben, daß sich ein langgestreckter, ellipsoidförmiger Wulstkopf günstiger auf den Widerstand auswirkt als ein kugelförmiger, vor allem bei den zylindrischen Wulstkörpern. Nur bei der kleinen Verdrängung und dem nach hinten am stärksten eingeschnürten Wulst war der kugelförmige Wulstkopf dem anderen widerstandsmäßig überlegen.
6. Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Wulstlängen zeigten, daß für die meisten Wulstformen und -größen eine bestimmte, etwa 2,5% bis 5% von  $L_{PP}$  über das vordere Lot hinausragende Wulstlänge bei der großen Verdrängung die günstigsten Widerstandswerte lieferte, während bei einigen anderen Wulsten sich gerade dieser Längenbereich als ungünstig erwies. Bei der Ballastverdrängung nahm der Widerstand bei größeren Wulstlängen zu; nur bei den in den Schiffskörpern eingestakten Wulsten nahm er ab, was wahrscheinlich auf die damit verbundene Wulstkopfveränderung zurückzuführen ist. Allgemein kann man wohl sagen, daß der Wulst übers vordere Lot hinausragen sollte, nur muß von Fall zu Fall entschieden werden, wie weit.
7. Die Versuche mit einem torpedoähnlichen Wulst nach *Nulku*, der in verschiedenen Lagen am Modell befestigt, nur bei der großen Verdrängung untersucht worden war, ergaben, daß sich bei kleinen Geschwindigkeiten der weit unter der Wasseroberfläche angebrachte und bei den hohen Geschwindigkeiten der sehr hoch liegende, halb ausgetauchte Wulst am günstigsten auf den Widerstand auswirkte. Der Nachteil des halb ausgetauchten Wulstes war jedoch, daß er im unteren Geschwindigkeitsbereich eine erhebliche Widerstandserhöhung bewirkte. Im Hinblick auf die horizontale Verschiebung zeigte der nach vorn weiter vorstehende Wulst bessere Eigenschaften als der mit dem vorderen Lot schließende Wulst.
8. Die für mehrere, besonders ausgewählte Wulstvarianten ermittelten Schleppleistungen zeigen, daß sich durch den Anbau eines Wulstes an das untersuchte Schiff bei der großen Verdrängung und den höheren Geschwindigkeiten ( $V > 20 \text{ kn}$ ) je nach Wulstgröße, Wulstform und Geschwindigkeit Leistungsverbesserungen von 5% bis 10% ergaben; was einem Geschwindigkeitsgewinn von 0,4 kn bis maximal 0,7 kn entspricht. Andererseits wieder erhöhten sich die erforderlichen Schleppleistungen beim Schiff in Ballastfahrt erheblich, und es ergaben sich, wieder in Abhängigkeit von der Wulstausführung und der Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsverluste von über 1 kn bis 2 kn.
9. Um festzustellen, ob der Wulsteffekt auch an einem kürzeren Schiff in gleicher Größe eintritt, wurden zwei ausgewählte Wulste an dem Modell M 477 untersucht. Im allgemeinen ergaben sich bei der großen Verdrängung und im oberen Geschwindigkeitsbereich keine allzu großen Unterschiede zwischen beiden Schiffen, nur für  $V \leq 20 \text{ kn}$  war der Geschwindigkeitsgewinn beim 10 m längeren Schiff etwas größer. Bei der Ballastfahrt waren die durch den Bugwulst sich ergebenden Leistungs- bzw. Geschwindigkeitsverluste im oberen Geschwindigkeitsbereich bei dem kürzeren Schiff geringer als bei dem Ausgangsschiff.

10. Bei einem Schiff, das lange nicht gedockt worden ist, ist der bei der großen Verdrängung durch den Wulsteffekt erzielte Leistungsgewinn kleiner als bei einem neuen Schiff, weil sich die Außenhaut des Schiffes durch Bewuchs im Laufe der Zeit verschlechtert. Das zeigten die Berechnungen der Schleppleistungen mit unterschiedlichen Rauheitszuschlägen. Bei einer Erhöhung des Reibungswiderstandes um 20% verringert sich beispielsweise die durch den Wulst gewonnene Leistung bei M 477 und  $V = 25$  kn um mehr als 1%.

11. Die mit einer großen Anzahl von Verdrängungen durchgeführten Vergleiche mit M 477 zeigten, daß der Wulsteffekt sowohl von der Geschwindigkeit als auch vom Tiefgang des Schiffes abhängt. Bei hohen Geschwindigkeiten ( $V > 25$  kn) ergaben sich für einen sehr großen Tiefgangsbereich durch den Wulsteffekt z. T. erhebliche Widerstandsverbesserungen, sogar noch bei Tiefgängen, wo der Wulst bereits teilweise austauchte.

12. Untersuchungen an Modellen von 2 bereits in Dienst gestellten, mit einem Bugwulst versehenen Schiffen zeigten, daß die mit den SVA-Entwürfen erzielten Wulsteffekte nicht geringer, z. T. sogar besser waren als bei den beiden Vergleichsschiffen. Ferner wurde mit einem der beiden Modelle festgestellt, daß die durch den Wulstbug entstehende Veränderung der Schwerpunktage des Schiffes sich nur unwesentlich auf die durch den Bugwulst erzielte Widerstandsverbesserung bei diesem Schiff auswirkte.

### 5.2. Einfluß der Heckform auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften

Die Untersuchungen mit zwei verschiedenen Heckformen, einem normalen Kreuzerheck und einem Spiegelheck, ergaben bei dem Grundmodell keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der Widerstandseigenschaften des Schiffes. Auch die Propulsionseigenschaften stimmten im Ballastzustand recht gut überein. Nur bei der großen Verdrängung ergaben sich für das Schiff mit Spiegelheck infolge der durch die vor dem Propeller stark ausfallenden Spanten sich ergebenden 4% höheren Soziffern zwischen 5% bis 7% kleinere Propulsionseigenschaft als beim Schiff mit Kreuzerheck.

### 5.3. Einfluß der Schiffslänge auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften

Um den Einfluß der Schiffslänge auf die Widerstands- und Propulsionseigenschaften des Schiffes zu ermitteln, wurden die Modelle eines 165-m-Schiffes (M 426), zweier 160-m-Schiffe (M 478 und M 479) und zweier 155-m-Schiffe (M 476 und M 577) untersucht, die alle fünf etwa die gleiche Konstruktionsverdrängung  $\nabla = 20\,000$  m<sup>3</sup> hatten. Dabei ergab sich, daß bis zu einer Geschwindigkeit von ungefähr 21 kn der Einfluß der Länge auf die Widerstandseigenschaften nur gering war. Bei den höheren Geschwindigkeiten hatten die kürzeren Schiffe jedoch bedeutend ungünstigere Widerstandseigenschaften als das lange Schiff. Die beiden 155 m langen Schiffe hatten bei 23 kn Geschwindigkeit einen 25% höheren Widerstand als das 165 m lange Ausgangsschiff. Bei der Ballastverdrängung war der Einfluß der Schiffslänge bedeutend kleiner.

Hinsichtlich der Propulsionseigenschaften, wie Sog, Mitstrom, Propulsionseigenschaft usw., ergaben sich vor allem bei der großen Verdrängung ebenfalls nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen langen Schiffen. Lediglich die für den Antrieb des Schiffes benötigten Wellenleistungen unterschieden sich auf Grund der unterschiedlichen Widerstände der Schiffe voneinander. So zeigte sich, daß das lange Schiff mit gleicher Wellenleistung, je nachdem, wie groß die Maschinenleistung ist, bei der großen Verdrängung 1 kn bis 2 kn und bei der Ballastverdrängung rd. 1 kn schneller fahren kann als das kurze Schiff. Das gilt für einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 21 kn bis 26 kn.

### Literatur

- [1] —: „Blaues Band“ für Linienfrachter, Hansa, Hamburg 100 (1963) 18, S. 1735.
- [2] Lewis, E. V.: High Speed Ships, Nav. Eng. J., Washington 75 (1963) 3, S. 567 bis 573.
- [3] Nützi, L.: Beitrag zur Frage der schnellen Frachtschiffe; der Trend, seine Ursachen und Betrachtungen zur Geschwindigkeitsauslegung, Schiff und Hafen, Uetersen 16 (1964) 11, S. 975 u. 976.
- [4] —: Der Trend geht zum schnelleren Schiff, Wirtschafts-Corresp., Hamburg 19 (1965) 9, S. 19.
- [5] —: Speed-competition waged on liner-services, Jap. Shipp. & Shipbuild., Tokyo 10 (1965) 4, S. 18 bis 21.
- [6] —: The demand for high-speed cargo-liners, Motor Ship, London 46 (1965) 540, S. 156 bis 158.
- [7] Miroschnitschenko, L.: Zum Problem einer wesentlichen Erhöhung der Fahrtgeschwindigkeit von Trockenfrachtschiffen, Trudy CNIMF (1964) 54, S. 14 bis 27.
- [8] Nogid, L. M.: Über die Wahl der Hauptabmessungen schneller Frachtschiffe, Sudostroenie, Leningrad 56 (1966) 10, S. 9 bis 16.
- [9] Schneekluth, H.: Die Bestimmung von Schiffslänge und Blockkoeffizient nach Kostengesichtspunkten, Hansa, Hamburg 104 (1967) 5, S. 367 bis 375.
- [10] Caldera, D. L., Swenson, C. C., und Hoch, C. E.: Gas Turbine Propulsion Machinery of the MSTs Roll-on/Roll-off Ship, Report 67 — GT — 31 of the American Society of Mech. Eng.
- [11] —: Contra-rotating propellers and 36000 bhp medium-speed engines proposed for unique U.S. cargo ships, Motor Ship, London 48 (1967) 566, S. 248 bis 250.
- [12] —: Der Container industrialisiert den Verkehr (Eine Stellungnahme zu McKinsey-Report), Wirt.-Corresp., Hamburg 21 (1967) 27, S. 3.
- [13] Boie, C.: Betrachtung zur Entwicklung von Schiffsgeschwindigkeit und Umschlagszeit am Beispiel des japanischen Schnellfrachters „Yamashiro Maru“, Hansa, Hamburg 101 (1964) 7, S. 639 u. 640.
- [14] —: Les American Export-Isbrandtsen Lines s'offrent a exploiter sur le Pacifique des navires nucleaires de 30 noeuds, J. Mar. March., Paris 46 (1964) 2342, S. 2579.
- [15] Meek, M.: Glenlyon class — design and operation of high-powered cargo liners, Trans. R.I.N.A., London 106 (1964) 3, S. 241 bis 285.
- [16] —: „Yamashiro Maru“, Motor Ship, London 45 (1964) 525, S. 39 bis 41. Schiff und Hafen, Uetersen 16 (1964) 2, S. 131 u. 132. Shipp. World & Shipbuilder, London 151 (1964) 3708, S. 679 bis 681. Fairplay, London 211 (1964) 4206, S. 27. Shipbuild. & Shipp. Rec., London 103 (1964) 6, S. 172.
- [17] —: Latest Holt orders — six for U.K., two for Japan, Shipp. World, London 150 (1964) 3694, S. 1068.
- [18] —: „Louise Lykes“, first of series of twelve advanced automated cargo liners for the far east trade, Shipbuild. & Shipp. Rec., London 106 (1965) 18, S. 584 bis 591. Shipp. World & Shipbuilder, London 156 (1965) 3769, S. 325 bis 327.
- [19] —: High-speed cargoliner joins American Mail Line's Far East service, Marine Engng./Log, Philadelphia 70 (1965) 3, S. 50 bis 57.
- [20] —: „American Racer“ — first „Challenger“-class vessel Fairplay, London 213 (1964) 4244, S. 28. Shipp. World & Shipbuilder, London 153 (1965) 3734, S. 700 bis 704. Marine Engng./Log, Philadelphia 69 (1964) 12, S. 56 bis 69.
- [21] —: Schnellfrachter „Hammonia“, Schiff und Hafen, Uetersen 17 (1965) 6, S. 505 bis 515. Hansa, Hamburg 102 (1965) 10, S. 929 bis 940.
- [22] —: „Benledi“ — first of a new class of diesel-engined Ben Line strips, Motor Ship, London 46 (1965) 541, S. 223 bis 225. Shipbuild. & Shipp. Rec., London 106 (1965) 2, S. 42 bis 48. Marine Engng. & Naval Archit., London 88 (1965) 1073, S. 336 bis 339.
- [23] Cusner, Nicholas und Minton, R.: 22.5 knot cargo liners — the advantages offered to shippers — „Southampton Castle“, Motor Ship, London 46 (1965) 539, S. 105 bis 118. Hansa, Hamburg 102 (1965) 23, S. 2251 bis 2256.
- [24] —: Cargos de 30 noeuds? J. Mar. March., Paris 46 (1964) 2342, S. 2579.
- [25] Heess, Fred L.: Cargo Liner „Morcaacargo“, Shipp. World & Shipb., London 153 (1965) 3726, S. 69 bis 75. Marine Engng./Log, Philadelphia 69 (1964) 10, S. 68 bis 78.

- [26] —: Pascagoula order for 23-knot ship. Shipbuild. & Shipp. Rec., London 105 (1965) 5, S. 138.
- [27] —: Fünf moderne Schnellfrachter der American President Lines. Schiff und Hafen, Uetersen 18 (1966) 3, S. 184.
- [28] *Csupor, D.*: Analysis of the published speed/power results of the „Oriental Queen“. Motor Ship, London 47 (1967) 559, S. 530 bis 532. Shipp. World & Shipbuilder, London 158 (1966) 3791, S. 96 bis 98.
- [29] —: „Strathardle“, fast cargo liner for the P. & Q. Group. Shipp. World & Shipbuilder, London 160 (1967) 3806, S. 745 bis 755.
- [30] —: „Leuve Lloyd“ — first of four 21-knot Japanese — built cargo liners for Dutch owners. Motor Ship, London 47 (1967) 560, S. 552 bis 556.
- [31] *Fiser, A. S., Spakov, V. S., und Stumpf, V. M.*: Der heutige Stand und die Entwicklungsperspektiven der Anwendung von Bugwulsten auf Seetransportschiffen. Sudostroicnie. Leningrad 31 (1965) 4, S. 6 bis 10.
- [32] *Saunders, H. E.*: Hydrodynamics in Ship Design. Soc. Nav. Arch. & Mar. Eng., New York (1957) Vol. I und II.
- [33] *Bergemann, A.*: The Blohm & Voss bulbous bow. Shipbuild. & Shipp. Rec., London 109 (1967) 11, S. 359 bis 362.
- [34] *Troim, O.*: Bulbafärens renässans — och varför. Svensk Sjöfartstidning. Göteborg 60 (1964) 29, S. 1650 u. 1651.
- [35] *Brard, R.*: Research in Ship Hydrodynamics. Schiffstechnik 14 (1967) 70.
- [36] *Dillon, E. S., und Lewis, E. V.*: Ships with Bulbous Bows in Smooth Water and in Waves. SNAME Transactions, Vol. 63 (1955) S. 726 bis 766. Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Report No. 648, March 1955.
- [37] *Comstock, J. P.*: Principles of Naval Architecture. SNAME 1967, New York.
- [38] *Wahab, R.*: Das Verhalten eines schnellen Frachtschiffes mit konventionellem Bug und mit Wulstbug im Seegang. STG-Novembertagung in Berlin 1966.
- [39] *Nutku, A.*: Waterline bulb on high speed boats. Naval Engineers Journal, Washington 77 (1965) 6, S. 943 bis 947.
- [40] *Csupor, D., und Borreguero, A.*: Versuchsergebnisse mit dem neuen Maierform SV-Bug. Schiff und Hafen, Uetersen 18 (1966) 11, S. 783 u. 784. Holland Shipbuilding, Rotterdam 35 (1966) 8, S. 50 u. 51. Shipp. & Shipp. Rec., London 108 (1966) 14, S. 465 u. 466. Motor Ship, London 47 (1966) 555, S. 316 u. 317.
- [41] *Miroshnitschenko, I.*: Über einen neuen schnellen Trockenfrachtertyp. Mors. Flot., Moskva 25 (1965) 5, S. 37 bis 39.
- [42] *Inui, T.*: The bulbous bow — a glimpse of its past and present status. Japan Shipbuild. & Mar. Eng., Tokyo 1 (1966) 2, S. 5 bis 12. SNAME Transactions, Vol. 70 (1962) S. 288 bis 353.
- [43] *Bogdanowa, Z. W., u. a.*: Ergebnisse der Untersuchung der Fracht- und Seefähigkeitseigenschaften von Schiffen mit wulstförmiger Linienführung. Trudy CNIMF (1963) Ausgabe 45, S. 27 bis 37.
- [44] *Müller, B.*: Einige Erfahrungen mit Bugwulstschiffen. Schiff und Hafen, Uetersen 17 (1965) 1, S. 20 u. 21.
- [45] *Weinblum, G.*: Über neue Verfahren und neue Ergebnisse bei der Entwicklung von Schiffenformen. VDI 106 (1964) Nov., S. 1603 bis 1610.
- [46] *Takezawa, S.*: A Study on the large bulbous of a high speed displacement ship. Journal of Zosen Kiokai, Tokyo 110 (1960) S. 145 bis 157 und 111 (1962) S. 19 bis 29.
- [47] *Lindblad, A.*: Experiments with Bulbous Bows. SSPA-Bericht Nr. 3 (1944) u. Nr. 6 (1948), Göteborg.
- [48] *van Lammeren, W. P. A., und Wahab, R.*: Research on bulbous bow ships. Part. I A: Still water investigations into bulbous bow forms for a fast cargo liner. TNO-Report No. 74 S, Oct. 1965.  
*van Lammeren, W. P. A., und Muntjewerf, J. J.*: Research on bulbous bow ships. Part. II A: Still water performance of a 24000 dtw bulkcarrier with a large bulbous bow. TNO-Report No. 71 S, May 1965.  
*Wahab, R.*: Research on bulbous bow ships. Part. I B: The behaviour of a fast cargo liner with a conventional and with a bulbous bow in a seaway. TNO-Report No. 76 S, Dec. 1965.  
*van Lammeren, W. P. A., und Pangalila, F. V. A.*: Research on bulbous bow ships. Part. II B: Behaviour of a 24000 dtw bulkcarrier with a large bulbous bow in a seaway. TNO-Report No. 72 S, June 1965.
- [49] *Fossers, G.*: Das Verhalten von Schiffen im Seegang. Schiffstechnik, Hamburg 12 (1965) 63, S. 99 bis 108.
- [50] *Hughes, G., und Allan, J. F.*: Turbulence Stimulation on Ship Models. SNAME Transactions, Vol. 59 (1951) S. 281 bis 314.
- [51] *Tingogador, L. T.*: Über die Wahl des Blockkoeffizienten von seegehenden Frachtschiffen. Sudostroicnie. Leningrad 56 (1966) 10, S. 6 bis 9.
- [—] *Silvertief, A., und Dawson, J.*: Formes hydrodynamiques des navires de commerce rapides. Bur. Veritas, Paris 48 (1966) 7, S. 141 bis 149. Schiff und Hafen, Uetersen 18 (1966) 7, S. 459 bis 461. Hansa, Hamburg 103 (1966) 14, S. 1172 u. 1173.
- [—] *Maor, D. T.*: Resistance, propulsion an motion of high speed single cargo liners. NEC 82 (1966) S. 277 bis 328.
- [—] *Kraich, A.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Verringerung des Wellenwiderstandes gegebener Schiffenformen durch den Bugwulst. IFS-Bericht Nr. 166, Hamburg.
- [—] *Kraich, A.*: Lineartheoretische Abhandlung über die optimale Verringerung des Wellenwiderstandes gegebener Schiffenformen durch einen Wulst in symmetrischer oder asymmetrischer Anordnung. IFS-Bericht Nr. 183, Hamburg.

## Anhang

Die bei einigen Geschwindigkeiten und verschiedenen Wulstformen gemachten Fotoaufnahmen lassen in Bild 47 bis 55 deutlich die Beeinflussung des Bugwellensystems in Abhängigkeit von der Wulstform und der Tauchtiefe erkennen.

Wie aus Bild 47 zu ersehen ist, nimmt die Wellenbildung des Schiffes ohne Bugwulst mit wachsender Geschwindigkeit und Verdrängung zu. Damit wird der Wellenwiderstand, der bei schnellen Schiffen einen verhältnismäßig großen Anteil am Gesamtwiderstand hat, um so größer, je ausgeprägter das Wellensystem ist. Durch Anbringen eines Wulstes am Vorschiff läßt sich jedoch der Wellenwiderstand dadurch verringern, daß das durch den Wulst erzeugte Wellensystem sich mit dem vom Schiff erzeugten so überlagert, daß sie sich teilweise aufheben (s. Bild 48, 49 und 50 im Vergleich zu Bild 47 bei der großen Verdrängung). Eine ungünstige Beeinflussung des Bugwellensystems durch die Anbringung eines Bugwulstes kann beispielsweise auch bei hecklastig vertrimmten Zuständen auftreten bzw. immer dann, wenn von einem verhältnismäßig völligen Wulst in Ruhelage die Wasserlinien austauschen (s. Bild 48, 49 und 50 — kleine Verdrängung).

Bild 48 zeigt den Einfluß des zylindrischen Wulstes 1.1.E (Wulstdurchmesser 5,0 m) auf das Wellensystem des 165 m langen Ausgangsschiffes (M 426) für 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung (T = 9,22 m, gleichlastige Schwimmelage) und 10850 m<sup>3</sup> Verdrängung (T<sub>m</sub> = 5,47 m, 2% von L<sub>PP</sub> heckl. Schwimmelage). Ein Vergleich mit den Aufnahmen für das Modell ohne Wulst (Bild 47) zeigt, daß der Wulst bei 20000 m<sup>3</sup> Verdrängung das Wellenbild günstig beeinflusst. Bei der kleinen Verdrängung und hecklastigen Schwimmelage beeinflusst der Wulst das Wellenbild ungünstig, vor allem bei kleinen Geschwindigkeiten. So erzeugt beispielsweise der Wulst bei 18 kn Geschwindigkeit einen ausgeprägten Wellenberg zwischen Spant 14 und 18, während das Modell ohne Wulst bei dieser Geschwindigkeit nur eine geringe Wellenbildung aufweist. Diese deutliche Wellenbildung, teilweise als Schwall auftretend, ist auf das teilweise Austauschen des Bugwulstes in Ruhelage zurückzuführen und drückt sich in einer nicht erwünschten Widerstandserhöhung aus. Ähnlich ist auch die Ausbildung der Wellensysteme bei den Wulsten 5.0.3 und 6.2.E (Bild 49 und 50). Der bei 18 kn Geschwindigkeit und 10850 m<sup>3</sup> Verdrängung entstandene Wellenberg zwischen Spant 14 und 18 war bei dem nach oben sich allmählich verjüngenden, in den Schiffskörper eingestakten, tropfenförmigen Wulst 5.0.3 nicht ganz so ausgeprägt; dagegen war bei dem zylindrischen Wulst 6.2.E (Wulstdurchmesser 6,0 m) die Wellenbildung noch wesentlich intensiver als bei dem Wulst 1.1.E.

Der in Bild 18 dargestellte Tauchtiefeneinfluß auf den spezifischen Restwiderstand für den Wulst 9. kann aus den Bildern 51 bis 53 abgeleitet werden. Bild 51 zeigt das Modell mit dem in Ruhelage nur halb eingetauchten Wulst 9.0.1 (t/D = 0). Deutlich ist hier, vor allem bei 18 kn Geschwindigkeit vor Spant 18 ein ausgesprochenes Wellental zu erkennen; davor die abfließende Bugwelle und dahinter ein Stau mit verwirbeltem Wasser. Diese Ausbildung des Wellensystems ist, wahrscheinlich in Verbindung mit Grenzschielebeeinflussungen, die Ursache für die bei dieser Geschwindigkeit aufgetretenen erheblichen Widerstandserhöhungen. Es zeigte sich, daß diese Wellenbildung bei den beiden tiefer liegenden Wulsten 9.0.2 (t/D = 0.5) und 9.0.3 (t/D = 1.0) kleiner war und sich bei höheren Geschwindigkeiten normalisierte.

Die Bilder 54 und 55 zeigen den Einfluß der Wulste 1.1.E