

Über den Einfluß von Form und Größe des Wasserquerschnittes sowie der Schiffsform, der Geschwindigkeit und der Art des Antriebes auf die Gestaltung eines künstlichen Wasserlaufes.

Von Kurt Helm, Obering. in Hamburg.

Mitteilung der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt.

Bei der Festlegung der günstigsten Bedingungen für den Binnenschiffsverkehr auf Kanälen ist es nicht immer in vollem Umfang möglich, eine für alle beteiligten Kreise gleich günstige Lösung zu finden. Es handelt sich hier vielmehr stets darum, einen möglichst günstigen Kompromiß zu schließen, bei dem jeder Gesichtspunkt nach seiner volkswirtschaftlichen Bedeutung berücksichtigt werden sollte.

Bei dem Bau eines Kanals sind zunächst zwei Hauptgesichtspunkte zu berücksichtigen: einerseits sollen die Kosten des Kanals einschl. Schleusen- und Brückenbauten und die späteren Unterhaltungskosten so niedrig wie möglich gehalten werden, d. h. aber, es ist ein baulich möglichst einfaches, nicht zu großes Kanalprofil zu wählen. Demgegenüber stehen jedoch Forderungen der Schifffahrt, die in dieser Arbeit hauptsächlich berücksichtigt werden sollen.

Die Hauptforderung der Schifffahrt an einen Kanal ist die Durchführung eines möglichst ungehinderten, zügigen Schiffsverkehrs bei minimalen Kanalabgaben. Zur Erfüllung dieser Forderung ist nötig

1. eine hohe Fahrgeschwindigkeit bei möglichst langen Schleusenhaltungen,
2. die Zeitverluste für die Überwindung der unvermeidbaren Schleusen sind auf ein Minimum zu beschränken, es sind daher moderne, leistungsfähige Schleppzugschleusen zumindest auf den durchgehenden Kanalstrecken vorzusehen. Für Abzweigkanäle vor allem dann, wenn es sich um eine größere Anzahl handelt, wird man sich mit kleineren, dem größten vorkommenden Schiffstyp angepaßten Schleusen begnügen müssen.
3. Der Kreis der für die Kanalfahrt zuzulassenden Fahrzeuge muß möglichst unbeschränkt sein, unabhängig davon, ob es sich um Kanal- oder Flußschiffe, Selbstfahrer oder Schleppzüge handelt.
4. Wie schon erwähnt, müssen sich die Kanalabgaben und die Schleppgebühren, sofern ein Schleppmonopol beabsichtigt ist, in Grenzen bewegen, die für die Schifffahrt noch wirtschaftlich sind.

Das heißt aber mit anderen Worten, daß sowohl eine Unter- als auch eine Überdimensionierung des Kanals vermieden werden muß. Bei Unterdimensionierung können die dem Kanal gestellten Aufgaben nur teilweise erfüllt werden; zur Abhilfe, nämlich einer nachträglichen Kanalerweiterung, sind

große Aufwendungen an Arbeitskräften und Material und dadurch Verluste an Volksvermögen unvermeidlich. Noch schlimmer aber ist eine Überdimensionierung, da hierdurch die für die Amortisation erforderlich werdenden Kanalgebühren stärker ansteigen als dem erzielten Nutzen aus der erhöhten Kanalgeschwindigkeit entspricht, was eine Erhöhung der Frachtraten oder aber eine geringere Benutzung der Wasserstraße zur Folge hätte. Ein solcher Fehler kann, wenn der Kanal gebaut ist, nie wieder gutgemacht werden.

Wie der Verfasser an dem Beispiel für einen Seekanal nachgewiesen hat, ist man bei einem klar umrissenen Projekt durchaus in der Lage, das wirtschaftlichste Kanalprofil rein rechnerisch zu bestimmen. (4)

Daß von Seiten der Schifffahrt ein möglichst großes und widerstandsmäßig günstiges Profil zur Erreichung relativ hoher Fahrgeschwindigkeiten erwünscht ist, liegt auf der Hand. Für die erreichbare Fahrgeschwindigkeit eines Schiffes im Kanal ist von entscheidender Bedeutung das Verhältnis von Kanal- zum Schiffsquerschnitt (F_K/F_S), während erst in zweiter Linie die Form des Kanalquerschnittes zum Tragen kommt.

I. Form des Kanalquerschnittes.

Zur Klärung dieser Zusammenhänge sind ausgedehnte systematische Versuche, neuerdings zum überwiegenden Teil in der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) durchgeführt worden.

Schon 1898 findet sich in der „Zeitschrift für Gewässerkunde“ eine Arbeit von Max Müller, in der er darauf hinweist, daß theoretisch ein Profil mit umgekehrter Trapezform am günstigsten wäre, eine Behauptung, die durch Engels und Gebers (1) versuchsmäßig bestätigt werden konnte. Sie stellten fest, daß bei gleicher Wassertiefe und gleicher Querschnittsgröße das Profil mit der kleinsten Wasserspiegelbreite den geringsten Widerstand hervorruft. Der Verfasser erweiterte diese Versuche in der HSVA durch systematische Untersuchungen mit rechteckigen und muldenförmigen Profilen.

Abb. 1 zeigt ein Schiff in vier verschiedenen Kanalprofilen von gleichem Querschnittsinhalt aber verschiedener Form, ausgehend von einem normalen Profil mit Trapezform, in dem das Schiff die Geschwindigkeit $V_K = 1,0$ erreicht. Fährt es in einem rechteckigen Profil mit gleicher Wasserbreite aber entsprechend geringerer Wassertiefe, so bewirkt die Widerstandserhöhung durch die Wassertiefenbeschränkung einen Abfall der Geschwindigkeit auf 0,92. Bei Profil III hingegen ist die Wassertiefe des ursprünglichen Profiles gehalten und ein rechteckiges Profil mit entsprechend verringerter Breite verwendet. Die erreichbare Geschwindigkeit liegt um 7,5 v. H. höher als beim Trapezprofil. Profil IV entspricht dem umgekehrten Trapezprofil von Engels und Gebers — es hat die günstigste Geschwindigkeit.

Allgemein kann man an Hand dieser Versuche ableiten, daß

1. bei gleichem Profilquerschnitt die Kanalgeschwindigkeit mit der Wassertiefe zunimmt. Das Optimum wird etwa erreicht, wenn der Abstand zwischen Schiffs- und Kanalprofil überall gleich groß ist. (2)
2. bei gleichem Profilquerschnitt und gegebener Wassertiefe das Profil mit der geringsten Wasserspiegelbreite am günstigsten ist.

Diese Tatsache erklärt sich wie folgt: Damit das vom Schiff verdrängte Wasser nach hinten abfließen kann, ist ein Spiegelgefälle erforderlich, das vom Schiff fortlaufend neu erzeugt werden muß. Es ist also Wasser auf eine bestimmte Höhe zu heben. Diese Wasserhöhe ist im wesentlichen nur von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Je schmaler nun die Wasseroberfläche ist,

um so kleiner ist die zu hebende Wassermenge und die hierfür erforderliche Kraft, die einen nicht unbeträchtlichen Anteil am Schiffswiderstand ausmacht.

Für die praktische Ausführung eines Kanals ist aber das umgekehrte Trapezprofil schon vom baulichen Standpunkt aus wegen der enormen Baukosten abzulehnen. Aber auch der zweiten Schlußfolgerung aus den Modellversuchen, das Kanalprofil so schmal und so tief wie möglich zu bauen, sind Grenzen gesetzt, da zumindest die Forderung erfüllt werden muß, daß zwei in entgegengesetzter Richtung fahrende Schiffe einwandfrei passieren können.

Für die Gegebenheiten, wie sie im Kanalverkehr vorliegen, bietet daher die Muldenform, die auch für die neueren Kanäle durchweg gewählt wurde, den besten Ausweg. Diese Lösung bietet bei größtmöglicher Wassertiefe in Kanalmitte, also günstigsten Fahrbedingungen für das alleinfahrende Schiff, eine relativ günstige Wasserbreite in Schiffsbodenhöhe, ein Maß, das für die notwendigen Begegnungen und Überholungen ausschlaggebend ist.

II. Größe des Kanalquerschnittes.

Nachdem die Frage nach der günstigsten Profilform geklärt ist, ist festzustellen, wie groß der Kanalquerschnitt im Verhältnis zum Hauptspant des Schiffes sein sollte.

Abb. 2 zeigt die Geschwindigkeiten, die mit einem 3-Kahn-Schleppzug aus guten Groß-Plauer-Maßkähnen ($67 \times 8,2 \times 2,5$ m; Abladung 2,0 m mit ca. 750 t Tragfähigkeit) mit einem Monopolschlepper von 250 PSe auf den verschiedenen deutschen Kanälen bei freier Fahrt in Kanalmitte zu erreichen sind. Diese Darstellung zeigt, daß die erreichbare Kanalgeschwindigkeit mit dem Querschnittsverhältnis zunimmt. (Querschnittsverhältnis $n = \text{Kanalquerschnitt } F_K \text{ zu Schiffsquerschnitt } F_S$.)

Es entspricht:

A	dem alten Dortmund-Ems-Kanal	$n = 3,57$
B	„ Küstenkanal zwischen Kempe und Oldenburg	$n = 4,04$
C	„ „ „ Dörpen und Kempe	$n = 4,60$
D	„ Datteln-Herne-Kanal	$n = 4,98$
D	„ Mittellandkanal zwischen Bergeshövede und Misburg	$n = 4,98$
E	„ „ „ Misburg und Peine	$n = 5,10$
	„ „ „ Peine und Magdeburg	$n = 5,50$
		bis 5,75
	„ Rhein-Herne-Kanal	$n = 5,60$
F	„ Wesel-Datteln-Kanal	$n = 5,80$
G	„ erweiterten Dortmund-Ems-Kanal	$n = 6,30 \text{ bis } 6,60$

Um einen Überblick der Geschwindigkeitsverluste durch die Wasserbreiten- und -tiefenbeschränkung zu geben, sei erwähnt, daß der gleiche Schleppzug auf 3,5 m Wassertiefe bei unbeschränkter Wasserbreite eine Geschwindigkeit von etwa 9,2 km/h und auf unbeschränkter Wassertiefe, also ohne Breiten- und Tiefeneinflüsse, ungefähr 10,7 km/h erreichen würde.

In Abb. 3 ist die erreichbare Maximalgeschwindigkeit der Schleppzüge abhängig vom Querschnittsverhältnis n gezeigt. Man sieht, daß die Kurve bei $n > 5$ schon sehr flach verläuft, d. h. der Einfluß der Querschnittsbeschränkung ist schon verhältnismäßig gering. Gleichzeitig kann man aus dieser Abb. entnehmen, daß vermutlich eine Steigerung des n -Wertes nur bis etwa höchstens 6 rentabel sein wird. Ob Verhältnisse zwischen 5 und 6 sich noch lohnen, hängt weitgehend von den Gestehungskosten des Kanals ab.

Diese Betrachtung bezieht sich jedoch nur auf die Fahrt von Schiffen in Kanalmitte, also wenn sich im Kanalquerschnitt nur 1 Schiff bzw. Schleppzug

befindet. Bevor die Frage geklärt wird, welches Querschnittsverhältnis mit Rücksicht auf die unvermeidlichen Begegnungen und Überholungen notwendig sind, soll untersucht werden, ob noch andere Möglichkeiten bestehen, diese Schwierigkeiten zu umgehen. Eine solche Möglichkeit wäre z. B. ein Doppelkanal, in dem jeweils nur in einer Richtung gefahren würde.

Es scheint zunächst, daß eine solche Lösung nicht unerhebliche Vorteile bieten könnte. Bei einem Doppelkanal wird die Gefahr der Kollision weitgehend vermieden, auch Schädigungen des Schiffes wie der Kanalböschung werden weit weniger vorkommen als bisher. Ferner könnte die zulässige Kanalgeschwindigkeit wegen der fehlenden Begegnungen gesteigert werden. Die Spannweiten für Brücken würden erheblich reduziert, da durch den Zwischendamm zwischen beiden Parallelkanälen die Möglichkeit gegeben ist, Mittelpfeiler einzuschieben. Bei Verlegung von Geleisen auf dem Zwischendamm oder auch eventuell einer Autobahn auf demselben bestünde zusätzlich noch die Möglichkeit, Schiffe von abnormen Abmessungen durch den Kanal zu treideln. Als weiterer Vorteil ist noch zu erwähnen, daß der Talfahrtkanal zur Ausnutzung von Wasserkraften herangezogen werden könnte. Die zu Tal fahrenden Schiffe hätten dann noch den Vorteil einer zusätzlichen Beschleunigung durch die Stromgeschwindigkeit und das Oberflächengefälle, während die zu Berg fahrenden Fahrzeuge nicht gegen den Strom zu fahren brauchten.

Dieses Problem wurde vom Verfasser schon früher für einen Seekanal (Abb. 4) erörtert. (4). Verglichen wurden:

A. Ein normaler zweiseiffiger Kanal, auf dem ein 4000-t-Schiff eine zulässige Geschwindigkeit von 10 km/h erreichen kann; das Querschnittsverhältnis ist $n = 5,5$.

B. Ein einschiffiger Doppelkanal, auf dem die gleiche Geschwindigkeit erzielt werden kann. Das Querschnittsverhältnis fällt auf $n = 4,88$.

C. Ein zweiseiffiger Kanal mit dem doppelten Wasserquerschnitt des einschiffigen Kanals. Das Querschnittsverhältnis wird dann $n = 9,77$ und die zulässige Geschwindigkeit steigt auf 16,8 km/h.

Da auf dem einschiffigen Kanal Begegnungen und Überholungen fortfallen, wird sich die tatsächlich erreichbare Geschwindigkeit gegenüber dem nach Erfahrungswerten für zweiseiffige Kanäle errechneten Wert noch etwas steigern lassen, wenn auch der Leistungsbedarf etwas größer sein wird. Unter günstigen Bedingungen dürften 11 km/h zu erreichen sein.

Während durch den Einfluß von Begegnungen und Überholungen die mittlere Geschwindigkeit im Kanal A um 25 v. H. niedriger, also bei 7,5 km/h liegt, wird dieser Einfluß bei dem günstigeren Kanal C etwa 20 v. H. betragen, die mittlere Geschwindigkeit liegt dann bei 13,5 km/h.

Der Vergleich dieser Resultate miteinander zeigt eindeutig, daß selbst bei günstigster Betrachtung des Einschiffssystems im Doppelkanal ein Profil nach altem Stil mit zweiseiffigem Verkehr bei gleichem Querschnitt, also etwa gleichen Baukosten (mit Ausnahme der Brückenbaukosten) bei weitem günstiger ist, daß sich also die erhöhten Aufwendungen praktisch kaum herausholen lassen. (Die Kosten sind eher für den Doppelkanal wegen der doppelten Böschungen noch höher.)

Bei Strömung im Talfahrtkanal kann sich das Bild zugunsten des Doppelkanals verschieben, es wäre aber mindestens eine Stromgeschwindigkeit von 5 km/h erforderlich, um eine hydraulische Gleichwertigkeit zu erzielen. Ob ein solcher Kanal auch wirtschaftlich gleichwertig bzw. überlegen ist, hängt davon ab, wie hoch die Ersparnisse bei der Kanalunterhaltung durch die geringere Kollisionsgefahr und die damit verbundene verminderte Abnutzung der

Kanalböschungen sind, und um wieviel günstiger die Verhältnisse durch die Wasserkraftausnutzung werden.

Da Strömungskanäle aber praktisch nur in Gebirgsgegenden verwirklicht werden können (z. B. ist beabsichtigt, einen Teil des Oder-Donau-Kanals als Strömungskanal auszunutzen), bleibt die wirtschaftlichste Lösung ein zweischiffiger Kanal mit einem Muldenprofil.

III. Einfluß von Begegnungen und Überholungen auf die Querschnittsgestaltung.

Bei der Wahl der Größe des Kanalquerschnittes sollte dieser auf die größten häufig vorkommenden Fahrzeuge — die sogenannten Regelschiffe — abgestellt werden. Ist der Kanal für diese richtig bemessen, so können kleinere Schiffe ihn jederzeit unbedenklich passieren.

Diese Ausführungen weisen wieder auf das Hauptproblem der Kanalfahrt hin, nämlich auf die Begegnungen und Überholungen. Diese sind, wie schon mehrfach erwähnt, der Grund dafür, daß man das Profil viel breiter bauen muß, als es für ungestörte Fahrt in gleicher Richtung erforderlich wäre. Will man nun die mittlere Reisegeschwindigkeit besonders störenden Überholungen ganz vermeiden, so müßte eine für alle Fahrzeuge verbindliche Fahrgeschwindigkeit angesetzt werden. Das würde aber bedeuten, daß alle anfallenden Schiffe auf die Fahrgeschwindigkeit der langsamsten Fahrzeuge, also der ungünstigsten Schleppzüge begrenzt würden.

Einen gewissen Ausgleich könnte man hier erreichen, wenn man auch bei Binnenschiffskanälen Weichen wie bei Seeschiffskanälen vorsehen würde.

Da ein Überholungsverbot für alle schnellen Fahrzeuge, zur Hauptsache also für die Selbstfahrer, eine starke Belastung bedeuten würde, war festzustellen, bis zu welchem Grade Überholungen möglich sind, ohne daß die Gefahr von Havarien besteht und wie groß darüber hinaus die Verringerung der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit für das überholende wie für das überholte Fahrzeug ist, wobei ins Gewicht fällt, daß mit steigender Verkehrsgeschwindigkeit auch die Anzahl der Begegnungen sich erhöht. Weiter war festzustellen, welche Geschwindigkeit für Kanäle ohne Schädigung der Kanalböschung durch die Wellenbildung und der Kanalsohle durch den Schraubenstrahl der Fahrzeuge zulässig ist.

Bezüglich der Begegnungen kann gesagt werden, daß hierfür die bisher üblichen Formen und Größen der Kanäle vollkommen ausreichend sind, um allen in Frage kommenden Schiffen das Begegnen zu ermöglichen, da die Schiffe hierbei durch ihre Bugwellen auseinandergedrückt werden.

Schwieriger ist die Frage der Überholungen. Da bei diesen die Gefahr von Kollisionen und Grundberührungen sehr groß ist, müssen die dabei auftretenden Kräfte möglichst genau bestimmt und die zu ihrer Beherrschung erforderlichen Bedingungen festgelegt werden. Zu diesem Zweck wurden von der HSVA ausgedehnte Modellversuche durchgeführt und zu ihrer Kontrolle mit Großversuchen verglichen.

Bei den Modellversuchen, die sich auf die Verhältnisse im Mittellandkanal bezogen, wurde so vorgegangen, daß die überholenden Selbstfahrer mit eigener Kraft parallel an den Schleppzügen vorbeifuhren, die ihrerseits mit einer vorgegebenen Schlepperleistung entsprechend der mittleren Schleppgeschwindigkeit fuhren, und daß die dabei auftretenden Kräfte automatisch aufgezeichnet wurden. Gewählt wurde hierfür ein gemischter 3-Kahn-Schleppzug mit einer Gesamttragfähigkeit von 2000 t. Die Überholungen wurden sowohl mit dem Saalemaß- (51 × 6 m) als auch mit dem Groß-Finowmaß-Selbstfahrer (41 × 5 m) für Tiefgänge von 1,2 m; 1,5 m und 1,8 m durchgeführt.

Es würde zu weit führen, die Versuchsanordnung und Registrierung eingehend zu beschreiben. Nur soviel sei gesagt, daß es mit ihrer Hilfe möglich war, die auftretenden Drehmomente und Seitenkräfte gesondert in ihrer Größe und Richtung zu bestimmen sowie festzustellen, ob sie für Ruderlagen zwischen 35° BB und 35° StB beherrschbar waren oder nicht.

Aus diesen Versuchen konnten folgende Bedingungen für Überholungen festgelegt werden:

Als oberste Grenze der zulässigen Geschwindigkeit des Schleppzuges während der Überholung ist die Schleppzugsgeschwindigkeit anzusprechen, bei der die Selbstfahrerleistung noch gerade eben ausreicht, um den ungünstigsten Kahn im Schleppzug zu überholen.

Bei Erhöhung der Schleppgeschwindigkeit und damit der Überholungsgeschwindigkeit durch den Selbstfahrer steigt der zur Überholung notwendige Leistungsbedarf des Selbstfahrers sehr schnell an, wodurch der Zeitersparnis eine Grenze gesetzt ist. Für die Verhältnisse auf dem Mittellandkanal sind Überholungsgeschwindigkeiten von 5 km/h möglich, wobei der überholte Schleppzug seine Geschwindigkeit bis auf etwa 3,5 km/h vermindern muß. Entscheidend ist, ob die Steuerfähigkeit der Schleppkähne ausreicht, um die auftretenden Kräfte zu beherrschen.

Während der Überholungen gibt es zwei Zeitpunkte, bei denen die Gefahr der Kollision bzw. des Auflaufens besonders groß ist:

1. wenn der Selbstfahrer den Schleppkahn etwas aufgeholt hat, und
2. wenn er den Schleppkahn zum größten Teil überholt hat. (Abb. 5)

Man sieht schon auf den ersten Blick, daß die Gefahrenzone II kritischer ist als die erste Zone, bei der zwar die Drehmomente die Fahrzeuge zueinander zu drehen streben, die gleichzeitig dabei auftretenden entgegengesetzt gerichteten Seitenkräfte sie aber zumindest teilweise in ihrer Wirkung wieder aufheben. Bei der Zone II hingegen werden die Schiffe auch noch durch die Seitenkräfte aneinandergedrückt.

Die mit den maximal möglichen Ruderwinkeln (35° BB und 35° StB) ausgeführten Messungen zeigen, daß sie für den Selbstfahrer ausreichend sind, sonst aber in fast allen Fällen, daß es mit den vorhandenen Kahnrudern nicht möglich ist, den auftretenden Kräften restlos das Gleichgewicht zu halten, woraus folgt, daß die Fahrzeuge mehr oder weniger in der angedeuteten Richtung aus der im Modellversuch vorgegebenen Fahrtrichtung ausweichen.

Abb. 6 zeigt ein Beispiel für die zeichnerische Erfassung solcher Versuche. Oben ist das Schema der Überholung bildlich wiedergegeben, darunter sind die für das Manöver bei den 3 Ruderlagen 35° BB, 0° und 35° StB erforderlichen Zeiten dargestellt. Darunter sind für eben diese 3 Zustände die Originaldiagramme der während der Versuche gemessenen Widerstände, Momente und Seitenkräfte aufgezeichnet. Der Bereich zwischen den Kurven für 35° BB und 35° StB ist vom Ruder beherrschbar. Würden sich die auftretenden Kräfte und die Ruderkräfte dauernd das Gleichgewicht halten, dann würde die Kurve für 0° Ruderwinkel bei den Drehmomenten auf der Nulllinie und bei den Seitenkräften parallel zu dieser verlaufen und die Drehmomente und Kräfte für gelegte Ruder parallel hierzu liegen. Die während der Überholung auftretenden Kräfteschwankungen spiegeln sich in dem Diagramm in einer Verschiebung der Kurven nach oben oder unten wieder, wobei vom Ruder nicht mehr beherrschbare Kräfte eine so große Verschiebung bewirken, daß alle 3 Kurven (Ruder 35° BB, 0° und 35° StB) ober- bzw. unterhalb der Nulllinie liegen. Diese Gebiete, d. h. die Stellen, an denen beim Überholen die Fahrzeuge in Wirklichkeit aus ihrer Bahn gedrängt werden, obwohl versucht wird,

durch Rudergeben so weit wie möglich zu stützen, sind auf dem Diagramm als schraffierte Flächen auf den ersten Blick erkennbar und zwar sowohl hinsichtlich ihrer Stärke als auch ihrer Dauer.

Es stellte sich heraus, daß diese nicht beherrschbaren Kräfte wesentlich zunehmen mit der Größe der bei der Überholung beteiligten Fahrzeuge und zwar ist sowohl der Tiefgang als auch Länge und Breite der Schiffe wirksam. Ebenfalls nehmen die auftretenden Kräfte bei zunehmender Fahrgeschwindigkeit rasch zu und zwar sowohl bei höherer Gesamtgeschwindigkeit als auch, je größer die Differenz zwischen der Geschwindigkeit der überholten und der überholenden Fahrzeuge ist. Je geringer sowohl die Grundgeschwindigkeit des Schleppzuges als auch die Geschwindigkeitsdifferenz der Fahrzeuge bei einer Überholung ist, desto günstiger verläuft diese. Außerdem sollte die Geschwindigkeit des Selbstfahrers während der ganzen Zeit der Überholung möglichst gleich bleiben (d. h. der Selbstfahrer müßte beim Vorbeifahren an einem Schleppzug seine Leistung laufend verändern, was praktisch aber nur sehr schwer und unvollkommen verwirklicht werden kann) und nicht mehr als höchstens 1,5 km/h höher als die Geschwindigkeit der überholten Fahrzeuge liegen. Außerdem ist es wichtig, daß die Fahrzeuge so weit als möglich aus Mitte Kanal fahren, denn nur so ist es möglich, die Gefahrenzone II, bei der die Schiffe zusammengesaugt werden, zu überwinden, so daß der Selbstfahrer schon vorbeigefahren ist, ehe es zu einem Zusammenstoß kommen kann.

Auch spielt die Lage, die die Fahrzeuge beim Eintreten in die Überholung zur Fahrtrichtung einnehmen, eine wesentliche Rolle während derselben. Das beste wäre natürlich, wenn die Kähne eine leicht nach StB gerichtete Lage hätten, um den später besonders bei Zone II auftretenden Kräften nach Möglichkeit zu begegnen. Jedenfalls ist bei einer Ausgangslage, die leicht nach BB zeigt, ein Zusammenstoß nur dann zu vermeiden, wenn die Überholung so schnell ausgeführt werden kann und die Fahrzeuge einen solchen Abstand voneinander haben, daß das überholende Fahrzeug schon vorbei ist, ehe das überholte Schiff erheblich ausscheeren kann. Das bedeutet aber, daß die Kollisionsgefahr bei Schleppzügen bei Voraussetzung gleicher Gesamttonnage mit abnehmender Anzahl dann größer werdender Kähne zunimmt, daß also die neuerdings verfolgte Tendenz, in Zukunft möglichst mit 2-Kahn-Schleppzügen zu fahren, die Kollisionsgefahr relativ erhöht. Andererseits ist bei einem sehr kurzen Schleppzug, d. h. bei zwei oder gar nur einem Kahn im Anhang, für den Schlepper viel eher die Möglichkeit gegeben, die Schlepptrassen während der gesamten Überholung auf Zug zu halten, d. h. also, ein Ausscheeren der Kähne weitgehend zu verringern. Da neuerdings auch auf den Kanälen mehr und mehr Selbstfahrer verkehren, die auf dem Kanal freifahrend ihre volle Leistung nicht ausnutzen können, besteht die Möglichkeit, daß in bezug auf durchschnittliche Reisegeschwindigkeit und gute Überholungsmöglichkeit die beste Lösung im schleppenden Selbstfahrer mit nur einem Kahn im Anhang zu sehen ist.

Bei gleichartigen Schleppkähnen ist die Kollisionsgefahr für den letzten Kahn am größten und für den ersten direkt hinter dem Schlepper fahrenden Kahn am geringsten. Hat man also verschiedene Kähne im Schlepp, so empfiehlt es sich, den besten bzw. kleinsten Kahn am Ende des Schleppzuges und den ungünstigsten bzw. schwersten direkt hinter dem Schlepper zu fahren. Diese Methode ist in der Praxis auch allgemein üblich; trotzdem sind bei längeren Schleppzügen Kollisionen oft nicht zu vermeiden.

Das zeigte sich auch bei Großversuchen, die zur Kontrolle dieser Modellversuche mit einem 5-Kahn-Schleppzug auf dem Ems-Weser-Kanal, dem ungünstigsten Streckenabschnitt des Mittellandkanals, durchgeführt wurden.

Obwohl hier die erwähnte Reihenfolge — größte und schwerste Kähne gleich hinter dem Schlepper und kleinster, leichtester Kahn ganz hinten — eingehalten wurde, konnte der überholende Selbstfahrer nur die beiden letzten und den ersten Kahn einwandfrei überholen. Beim Überholen des mittelsten Kahnes wurde der Selbstfahrer vom Kahn auf die Böschung gedrückt, kam jedoch wieder frei, nachdem er seine Geschwindigkeit bis zur Schleppzugsgeschwindigkeit reduziert hatte, und überholte dann mit ganz geringer Zusatzgeschwindigkeit. Im ungünstigsten Fall, bei der Überholung des zweiten Kahnes nach dem Schlepper, mußte der Selbstfahrer sogar noch unter die Schleppzugsgeschwindigkeit gehen, also eine Zeitlang zurückbleiben, ehe er mit ganz geringer Geschwindigkeit überholen konnte. Dabei schrammte er hart an der Kanalböschung entlang, während er auf der anderen Seite nur durch die Fender vom Kahn abgehalten wurde. Es ist klar, daß unter solchen Umständen die Kanalböschungen sehr stark leiden müssen, auch die Kimmplatten der Fahrzeuge werden dementsprechend stark mitgenommen. Bei den Groß-Plauer-Maß-Selbstfahrern treten sogar trotz Überholungsverbotes, also nur beim Begegnen, so starke Beschädigungen der Kimmplatten auf, daß viele Kanalreedereien ihre Selbstfahrer mit Dopplungsplatten an den hauptsächlich gefährdeten Stellen ausrüsten.

Die ausgeführten Untersuchungen über die Überholungsmöglichkeiten auf dem Mittellandkanal haben für die ungünstigste Teilstrecke zwischen Ems und Weser ergeben, daß Schleppkähne bis etwa 750 t Tragfähigkeit mit einiger Sicherheit nur von kleinen Selbstfahrern vom Groß-Finow-Maß ($41,5 \times 5,0$ m) mit höchstens 1,5 m Abladung, d. h. bei etwa 180 t Tragfähigkeit überholt werden können (Linienselfahrer). Für alle größeren Selbstfahrer mußte ein Überholungsverbot erlassen werden. Selbst bei diesen stark eingeschränkten Überholungen sind die Geschwindigkeitseinbußen durch Fahrtverminderung recht erheblich.

Bei einem Jahresmittel von 12 Fahrstunden pro Tag und täglich 12 Begegnungen und 8 Überholungen würde sich die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der Schleppzüge von 6,5 km/h auf 5,5 km/h, also um 15 v. H. und die der überholenden Selbstfahrer von 7 km/h auf 6,45 km/h, d. h. um 8 v. H. vermindern. Ein Überholen ist daher nur für solche Selbstfahrer vorteilhaft, die auf den freien Kanalstrecken schneller als 7 km/h fahren dürfen. Die inzwischen mit den 1000 t-Regelkähnen gesammelten Erfahrungen beim Begegnen und Überholen haben ergeben, daß diese Kähne zumindest für die ungünstigste Teilstrecke zwischen Ems und Weser bereits zu groß sind, während das größere Profil zwischen Weser und Elbe gerade eben als ausreichend angesehen werden kann. Die Wasserbreite in Schiffsbodenhöhe beträgt für die ungünstigste Strecke zwischen Ems und Weser ca. $2,6 \times$ Schiffsbreite und zwischen Weser und Elbe maximal $3 \times$ Schiffsbreite.

Da sich die Entwicklung in der Binnenschifffahrt mehr und mehr zum Selbstfahrer verlagert und auch mit Rücksicht auf die sehr großen Geschwindigkeitsverluste durch die beschränkte Überholungszulassung erscheint es für künftige Kanalbauten geboten, eine Vergrößerung der Querschnittsverhältnisse gegenüber den Werten, wie sie auf dem Mittellandkanal vorliegen (n zwischen 4,5 und 5,2) vorzusehen. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, also Einschränkung der für den Kanalbau aufzuwendenden Kosten auf ein Minimum, dürfte wohl ein Querschnittsverhältnis von mindestens 5,5, besser aber bis zu 6 bei einer Wasserbreite in Schiffsbodenhöhe von mindestens $3 \times B$, besser $3,25 \times B$ für das Regelschiff als angemessen für die Schifffahrt betrachtet werden, um so mehr, wenn man bedenkt, daß die allge-

meine Tendenz in der gesamten Binnenschifffahrt eine ansteigende Größe der Schiffsgefäße zeigt, die auch in Zukunft noch anhalten dürfte. Bei den neuesten Kanalprojekten, dem Rhein-Main-Donau-Kanal und dem Oder-Donau-Kanal entspricht die Dimensionierung auch schon dieser Forderung. Als geringste Wassertiefe in Kanalmitte dürfte der 1,75 fache Tiefgang des Regelschiffes anzusprechen sein. Bei der Entwicklung von kanalgängigen Binnenschiffen hat sich immer wieder gezeigt, daß die übliche Brückenhöhe von 3,9 m über Wasserspiegel unzureichend ist. Bei neu zu bauenden Kanälen empfiehlt es sich daher, die Brückenhöhe möglichst bis auf 4,5 m zu vergrößern.

IV. Günstigste Schiffsabmessungen.

Die bisherigen Überlegungen waren hauptsächlich darauf abgestellt, die Größe und Form des Kanalquerschnittes auf die berechtigten Forderungen der Kanalschifffahrt abzustimmen. Hierbei hat sich ergeben, daß es wünschenswert wäre, wenn der eingetauchte Hauptspantquerschnitt des Regelkahnes nicht mehr als $\frac{1}{6}$ des Kanalquerschnittes betragen sollte. Selbst für diese wesentlich verbesserten Schifffahrtsverhältnisse können bei wirtschaftlicher Ausnutzung des Kanals Überholungen im günstigsten Fall nur freifahrenden Selbstfahrern von etwa 650 t Tragfähigkeit gestattet werden. Daher ist die Formgebung der Kähne ebenfalls von ausschlaggebender Bedeutung, da ja die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit auf dem Kanal vom ungünstigsten Kahntyp diktiert wird.

Ein Ausgleich könnte hier von schiffbaulicher Seite nur durch eine unwirtschaftliche Leistungsreserve der Schlepper oder durch eine Tiefgangsbeschränkung für schwerschleppende Kähne geschaffen werden. Eine solche Einschränkung könnte durch eine Widerstandseichung der Kähne erreicht werden und würde vermutlich ein Ansporn zum Umbau ungünstiger Kähne sein.

1. Einfluß der Hauptabmessungen.

Da der größte Teil der auf einem Kanal verkehrenden Schiffe auch über längere Flußstrecken fahren muß, ist bei der Wahl der Hauptabmessungen hierauf Rücksicht zu nehmen. Von einigen Spezialfahrzeugen abgesehen ergibt sich für die deutschen Binnenschifffahrtsverhältnisse eine größte Kahlänge von 80 m und ein mittlerer Tiefgang von etwa 2 m, dieser kann auf den unteren Stromstrecken der großen Flüsse bis auf 2,5 m erhöht werden, während andererseits auf Strömen mit ungünstiger Wasserführung schon Abladungen von 1,6 bis 1,7 m zu den Seltenheiten gehören. Um auf diesen Strömen die Tragfähigkeit möglichst gut auszunutzen, sind hier breite, niedrige Schiffe mit B/T-Werten zwischen 5 und 6 vorzuziehen, während sich auf den großen Strömen schmalere und hochbordige Schiffe mit B/T-Werten zwischen 3 und 4 am besten bewährt haben. Die L/B-Werte liegen für die großen Kahntypen, die allein als Regelkähne in Frage kommen, zwischen 7,5 und 9.

Auf Kanalstrecken, bei denen allgemein eine volle Tragfähigkeitsausnutzung vorausgesetzt werden kann, haben sich gleichfalls die schmaleren, tiefergehenden Kähne den breiten, flachen Formen überlegen gezeigt. Gesamtwirtschaftlich gesehen steigt die Überlegenheit der breiten, flacher gehenden Fahrzeuge mit dem Anteil der Flußstrecke mit Tiefgangsbeschränkung an der Gesamtreise. Eine Vergleichsrechnung für 2 gleich lange, in ihrer Formgebung und Völligkeit ähnliche 1000-t-Kähne von 9 bzw. 10,5 m Breite (bei entsprechend vermindertem Tiefgang) zeigte, daß bereits wirtschaftliche Gleichwertigkeit besteht, wenn der Anteil der mit Tiefgangsbeschränkung zu

befahrenden Flußstrecke etwa $\frac{1}{3}$ des Gesamtweges ausmacht. Hierbei ist es gleichgültig, ob der Fahrstreckenanteil, der bei voller Abladung befahren werden kann, auf Kanälen oder im freien Strom zurückgelegt wird.

Aus Modellversuchen und Erfahrungen mit großen Schiffen ergibt sich, daß bei gleicher Völligkeit, gleicher Lage des Verdrängungsschwerpunktes und gleichwertiger Spantform die durch Unterschiede in den Hauptabmessungen (Länge, Breite und Tiefgang) hervorgerufenen Differenzen im spezifischen Widerstand (W/D in kg/t) nur bis 5 v. H. betragen.

Innerhalb festgelegter Hauptabmessungen sind aber noch Unterschiede in der Formgebung der Schiffe möglich, die einen ganz erheblichen Einfluß sowohl auf den Widerstand als auch auf die Manövrierfähigkeit ausüben. Bei sonst gleicher Form (Spantform, Kimmabrundung, Lage des Verdrängungsschwerpunktes) kann durch Unterschiede in der Völligkeit bei Kähnen eine Veränderung des spezifischen Widerstandes bis zu 60 v. H. auftreten! Bei gleicher Völligkeit können durch Veränderungen der Spantform Unterschiede bis zu 35 v. H. verursacht werden, eine Abänderung der eckigen in eine abgerundete Kimm bringt bis zu 5 v. H. und eine Verlagerung des Verdrängungsschwerpunktes von Mitte Schiff bis zur Optimallage bei Kanalfahrt (maximal 2 v. H. vor Mitte Schiff) kann den spezifischen Widerstand noch um 6 bis 10 v. H. verbessern. Es ist also möglich, daß bei gleichen Hauptabmessungen ein schlechtes Fahrzeug mehr als den doppelten Widerstand bezogen auf die Verdrängungstonne hat wie ein anderes, das nach optimalen Linien gebaut ist.

Ausgedehnte Schleppversuche und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für alle nur möglichen Varianten, die größtenteils im Rahmen eines großen Typisierungsprogramms in der HSVA durchgeführt wurden, brachten grundlegende Erkenntnisse für dieses Problem, vor allem für Schleppkähne, jedoch auch für Selbstfahrer und Schlepper, die sich bei ihrer Überprüfung in der Praxis auf das beste bestätigten. Die vorliegenden Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf diese Untersuchungen. Zunächst soll die Formgebung der Kähne, die ja das ursprüngliche Beförderungsmittel auf den Kanälen darstellen, besprochen werden.

2. Einfluß der Spantform.

Eine Übersicht über die auf den deutschen Flüssen und Kanälen hauptsächlich auftretenden Kahnformen gibt die Abb. 7. Aus den Kurven im rechten Teil des Bildes ist sofort ersichtlich, daß der flachbodige Typ „Berta“ mit seinen Knickspanten den ungünstigsten Typ repräsentiert. Die sogenannte „dicke Berta“ (vgl. Abb. 7, I) ist sogar so ungünstig, daß der Anbau eines neuen Vor- und Hinterschiffes bei gleichzeitiger Verlängerung notwendig wird, um sie mit den übrigen Kähnen konkurrenzfähig zu machen. Die etwas bessere „schlanke Berta“ (Abb. 7, II) ist durch verhältnismäßig einfachen Umbau (abgerundete Spantfüße im Vor- und Hinterschiff) in eine auch den heutigen Anforderungen genügende Form zu bringen.

Bei der weitaus besten Form „Olga“ handelt es sich um einen besonders guten Oderkahn, der in seiner Bauweise ausschließlich der Flußfahrt angepaßt ist. Für Kanalfahrt ist ein widerstandsmäßig etwas schlechteres Heck erforderlich, das aber den Vorteil besserer Kursbeständigkeit aufweist (Form „Amanda“, der heute allgemein übliche Kahntyp). Anzumerken ist noch, daß der Unterschied zwischen „Olga“ und „Amanda“ in Wirklichkeit kleiner ist als 7 v. H. Die Kurven entsprechen Modellversuchsergebnissen, bei denen die größeren Gierverluste der „Olga“ nicht berücksichtigt werden konnten.

3. Einfluß der Kimm.

Kähne mit eckiger Kimm haben eine gute Kursstabilität und geringe Abtrift, sie sind deshalb besonders geeignet für das Zutatreiben auf Flüssen. In Kanälen jedoch verursacht eine eckige Kimm starke Beschädigungen der Böschung und ist deshalb für dies Fahrgebiet ganz verboten; abgesehen davon ist eine runde Kimm auch widerstandsmäßig besser. Normalerweise wird ein Kimmradius von 500 mm gewählt, nur für die Kähne aus dem ostdeutschen Raum (Elbe- und Oderkähne) ist mit Rücksicht auf das Treiben auf der Talfahrt eine Kimmabrundung von nur 250 mm gestattet.

4. Einfluß der Völligkeit.

Eine der schwierigsten Fragen war die Festlegung der wirtschaftlichsten Völligkeit für die Schleppkähne, die an Hand von Modellversuchen nicht ohne weiteres eindeutig beantwortet werden kann. Wohl zeigt der Modellversuch, daß der spezifische Kahnwiderstand mit zunehmender Völligkeit ansteigt, woraus man aber nicht ohne weiteres entscheiden kann, bis zu welcher Völligkeitsgrenze wirtschaftlich noch gegangen werden kann (vgl. Abb. 7). Die schiffbauliche Grenze ist dadurch gegeben, daß bei Völligkeiten über 90 v. H. die Steuerfähigkeit zu ungünstig wird.

Bei der allgemein üblichen Berechnungsmethode für die Schleppgebühren, die im wesentlichen nur proportional mit der tatsächlich geschleppten Ladungsmenge ansteigt, wobei die Güte der Schiffsform außer Ansatz bleibt, wäre es vom Standpunkt der Schlepper aus gesehen am vorteilhaftesten, wenn die Kähne möglichst scharf gebaut würden.

Betrachtet man diese Frage jedoch vom Standpunkt der Einzelschiffer, die im wesentlichen den Kahnraum auf den ost- und westdeutschen Strömen stellen, so sieht man, daß es für diese um so günstiger wird, je völliger ihre Kähne gebaut werden. Die Verdienstmöglichkeit nimmt mit der Größe der Tragfähigkeit mehr zu als die höheren Aufwendungen für die Schleppgebühren. Aus diesem Grunde sind Völligkeiten bis zu 90 v. H. und mehr keine Seltenheiten bei den Fahrzeugen der Partikulierschiffer.

Die heute noch übliche Tarifpolitik hat also die vielen besonders schwer schleppenden Kähne auf dem Gewissen. Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, daß so hohe Völligkeiten auf jeden Fall zu ungünstig sind und daher in Zukunft nicht mehr gebaut werden sollten. Andererseits sind aber z. B. die auf der Donau üblichen Völligkeiten von 80 bis 82 v. H. für die übrigen Wasserstraßen zu gering.

Im Auftrage des Zentralvereins für Deutsche Binnenschifffahrt hat der Verfasser deshalb im Jahre 1940 durch systematische Modelluntersuchungen und Rentabilitätsrechnungen für Groß-Plauer-Maßkähne festgestellt, bei welcher Kahnvölligkeit das Optimum liegt, wenn die Interessen von Kahnhalter und Schleppreederei berücksichtigt werden. (3)

Abb. 8 zeigt diese Ergebnisse für mittlere Flußfahrtverhältnisse (z. B. Rheingebiet unterhalb von Köln) und für die Fahrtverhältnisse auf dem Mittellandkanal. Für beide Fahrgebiete ergab sich eine optimale Völligkeit von ca. 88 v. H., die heute für alle Neubauten mit wenigen Ausnahmen als verbindlich anerkannt wird.

Gleichzeitig erkennt man, daß die wirtschaftlichste Schleppgeschwindigkeit für Flußfahrt bei etwa 12 km/h gegen Totwasser liegt, ein Wert, der auch durch jahrzehntelange Erfahrung der Rheinschifffahrt als optimal festgestellt wurde. Für den Mittellandkanal ergab die Rechnung eine wirtschaftliche Schleppgeschwindigkeit von ca. 6,5 km/h. Wenn diese auch von der Kanalverwaltung

angestrebte Geschwindigkeit in der Praxis noch nicht ganz erreicht wird, so beruht das z. T. auf den vielen ungünstigen Kähnen, die auf dem Kanal eingesetzt sind und z. T. auf dem Schleppermangel, der dazu zwingt, längere Schleppzüge zu bilden, als ursprünglich vorgesehen war.

5. Einfluß der Schwerpunktslage.

Untersuchungen über die Schwerpunktslage haben ergeben, daß bei 88 v. H. Völligkeit für mittlere Flußfahrtverhältnisse der günstigste Verdrängungsschwerpunkt etwa 1 v. H. und für reine Kanalfahrt bis 2 v. H. vor Mitte Schiff angeordnet werden muß. Bei schärferen Schiffen muß der Schwerpunkt noch weiter nach vorn verlagert werden. Hieraus folgt die Erkenntnis, daß es bei Kähnen in erster Linie darauf ankommt, ein möglichst scharfes Hinterschiff zu entwickeln, wobei man mit der Vorschiffsvölligkeit sehr weit gehen kann.

Kähne, die während des Krieges nach diesen Erkenntnissen gebaut wurden, haben sich nicht nur im Widerstand sondern auch bezüglich ihrer Steuerfähigkeit ausgezeichnet bewährt. Die gute Steuerfähigkeit beruht z. T. auf dem gewählten Spantcharakter (Amandaform) und z. T. auf der durch die Schwerpunktslage bedingten Hinterschiffsschärfe. Der vor Mitte Schiff gelegte Verdrängungsschwerpunkt vermindert also nicht nur den Schiffswiderstand, sondern er erhöht darüber hinaus noch die Steuerfähigkeit.

Wie sich die Widerstandsunterschiede der verschiedenen Kahnformen auf die Geschwindigkeit der Schleppzüge auswirken, zeigt die folgende Tabelle für die Fahrtverhältnisse auf dem Mittellandkanal.

Erreichbare Schleppgeschwindigkeiten verschiedener Schleppzüge mit 250 WPS Schleppleistung.

Schleppzug	Abladung m	Verdrängung m ³	Ladung t	Geschw. km/h
3 normale Amanda	2,00	2880	2250	6,80
3 Hulda	2,00	2880	2250	6,50
Hulda-dicke Berta-Weser	2,00	2562	2010	6,20
Hulda-schlanke Berta-Weser	2,00	2518	1980	6,35
Hulda-schlanke Berta (umgebaut)-Weser	2,00	2513	1975	6,55
3 dicke Berta	2,00	2481	1890	5,50
3 schlanke Berta	2,00	2349	1800	6,20
3 schlanke Berta (umgebaut)	2,00	2334	1785	6,90
2 große Amanda	2,00	2500	2000	6,85
2 Rhein-Herne-Kanalkähne	1,80	2394	1670	6,80
2 Hulda	2,35	2260	1840	6,50

V. Kanalschlepper.

Der Entwicklung möglichst hochwertiger Kanalschlepper sind gleichfalls umfangreiche Modellversuche vorausgegangen. Geprüft wurden die verschiedenen Antriebsarten wie Dampf-, Gas- und Dieselantrieb als Ein- und Zweischrauber mit und ohne Kortdüse.

Grundsätzlich hat sich ergeben, daß bei gleicher Gesamt-Propellerstrahlfläche der Einschrauber dem Zweischrauber hydraulisch stets überlegen ist, selbst dann, wenn die Schraube stark eingetunnelt werden muß. Der Düsenantrieb übertrifft jede andere Anordnung; die Propulsionsverbesserung durch die Düse nimmt mit abnehmendem Schraubendurchmesser, also mit steigender

Propellerbelastung zu, unbeschadet der Tatsache, daß ein großer Propeller immer besser sein wird als ein kleiner Propeller, wenn die Drehzahl frei gewählt werden kann.

Im Laufe der ausgeführten Modellversuche über den Sohlenangriff mit Schleppern und Selbstfahrern haben sich wirksame Mittel ergeben, um den Sohlenangriff eines Propellerstromes von bestimmtem Energiegehalt weitgehend zu vermindern. Es kommt darauf hinaus, die vom Propeller dem Wasser mitgeteilte Energie möglichst vom Boden abzulenken und auf einen breiten Querschnitt nach oben zur Wasseroberfläche hin zu verteilen; das ist wesentlich wirksamer als der früher meist angewandte Ausweg, die Propellerbelastung allein zu vermindern, indem man die kleinen, hochbelasteten Schrauben durch minderbelastete von großem Durchmesser ersetzt, deren Flügel dann z. T. aus dem Wasser tauchten und durch einen Tunnel abgeschirmt werden mußten. Hierdurch wird die Ausbreitung der Energie nach oben verhindert und der hydraulisch sehr leistungsfähige Einschrauber mit großem Propellerdurchmesser wirkt in Bezug auf den Sohlenangriff ungünstig.

Die aus dieser Erkenntnis entwickelten Mittel haben bewirkt, daß sowohl bei den Schleppern als auch bei den Selbstfahrern der Sohlenangriff gegenüber dem bisher beobachteten Maß wesentlich — in Grenzfällen bis auf etwa $\frac{1}{10}$ — herabgedrückt werden konnte. Die zur Erzielung dieser Wirkung vorgeschlagenen Maßnahmen verschlechterten im allgemeinen die hydraulische Leistungsfähigkeit nur unwesentlich.

Unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Sohlenangriffes haben die Zweischrauber, bei denen trotz kleinerer Propellerdurchmesser die größten Strahlflächen untergebracht werden konnten, allgemein die günstigsten Trossenzugwerte. Ihre Überlegenheit über in Bezug auf Sohlenangriff gleichwertige Einschrauber betrug im günstigsten Fall ca. 10 v. H.

VI. Selbstfahrer.

Die seit 1930 klar erkennbare Tendenz in der Weiterentwicklung der Binnenschifffahrt zeigt, daß das eigengetriebene Güterschiff — der sogenannte Selbstfahrer — immer mehr an Boden gewinnt. Das zunächst nur für die notwendige Verkehrsbeschleunigung im Stückgutverkehr gedachte Fahrzeug hat sich im Laufe der Zeit mit Erfolg auch im Massengutverkehr einschalten können. Es muß deshalb damit gerechnet werden, daß dieser Schiffstyp in immer größerer Zahl auch auf den Kanälen erscheinen wird. Bei Neuplanungen von Binnenschiffskanälen muß deshalb dieser Entwicklung weitgehend Rechnung getragen werden.

Für die Bemessung eines Kanals ist, wie schon mehrfach erwähnt, der größte in größerer Anzahl auftretende Schiffstyp, das sogenannte Regelschiff, entscheidend. Im Verkehrsraum der deutschen Binnenschifffahrt kommt hierfür z. Z. und höchstwahrscheinlich auch für die weitere Zukunft als Selbstfahrer, der in größerer Zahl auftritt, der Groß-Plauer-Maß-Selbstfahrer von ca. 700 t Tragfähigkeit bei 2 m Abladung in Frage. Dieser Schiffstyp kann nämlich alle vorhandenen Großschiffahrtsstraßen einschließlich der ostdeutschen Wasserstraßen befahren.

Im Zuge der Moselkanalisierung wird von französischer Seite ein noch größerer Selbstfahrer von ca. 1000 t Tragfähigkeit geplant. Ob sich dieser Typ durchsetzt und auch für den Verkehr auf den größeren Kanälen in Frage kommt, muß abgewartet werden. Jedenfalls sollte man bei Neuplanungen einen solchen Typ mit ins Auge fassen.

Abgesehen von den anfänglichen Schwierigkeiten, die die z. T. sehr hoch belasteten Selbstfahrschrauben in Bezug auf den Angriff der Kanalsohle verursacht haben und die alle mit verhältnismäßig einfachen Mitteln behoben werden konnten, haben die Rundfahrt-Selbstfahrer in Hinsicht auf Geschwindigkeit und Manövrierfähigkeit selbst in den ungünstigsten Fällen, bei nachträglich motorisierten Schleppkähnen, keinen Anlaß mehr zu Beanstandungen von seiten der Kanalverwaltung gegeben.

Die Schwierigkeiten für die Schifffahrt besteht darin, daß infolge der begrenzten Kanalgeschwindigkeit die Motoren bei zu niedrigen Drehzahlen arbeiten müssen, worunter die Maschinen sehr leiden. Da sich andererseits gezeigt hat, daß die eingebauten Motorleistungen von 400 PSe, eigentlich noch zu klein für die Oberrheinfahrt bemessen sind, und daher die Maschinen zu stark überlastet werden, wird bei zukünftigen Bauten eine Motorleistung von ca. 500 PSe beabsichtigt. Hierdurch würden sich jedoch die Verhältnisse für die Kanalfahrt noch ungünstiger stellen.

Technische Möglichkeiten zur Behebung dieser Schwierigkeiten sind kostspielig und würden die Wirtschaftlichkeit dieses Schiffstyps ungünstig beeinflussen. Eine technische Möglichkeit wäre z. B., für die Kanalfahrt einen etwa 100pferdigen Sonderantrieb vorzusehen, dessen Drehzahl durch ein Getriebe bzw. dieselelektrisch auf die niedrige Propellerzahl unteretzt wird. Bei hohen Belastungen auf dem Oberrhein könnte dieser Motor durch eine zweite Getriebestufe bzw. durch elektrische Übertragung zu der vorhandenen 400pferdigen Hauptmaschine zugeschaltet werden.

Eine durchaus wirtschaftliche Lösung kann z. B. sein, die Selbstfahrer auf den Kanalstrecken als Schlepper einzusetzen. Die vorhandene Antriebsleistung von 400 PSe würde auf dem Mittellandkanal durchaus ausreichen, um zusätzlich noch 2 gute, voll abgeladene Kähne von 1000 t Tragfähigkeit bei der angestrebten Schleppgeschwindigkeit von 6,5 km/h zu schleppen. (3) Praktische Versuche dieser Art, die während des letzten Krieges auf dem Mittellandkanal durchgeführt und später wegen Brennstoffmangel wieder aufgegeben werden mußten, haben in technischer Hinsicht auch durchaus befriedigt. Andererseits hat sich jedoch gezeigt, daß die große wirtschaftliche Überlegenheit der Selbstfahrer gerade in ihrer Freizügigkeit liegt. Während sich der schleppende Selbstfahrer den Gepflogenheiten der Schleppschifffahrt anpassen muß, kann der freifahrende Selbstfahrer in den Zeiten nach Betriebsschluß, wo die Schleppschifffahrt ruht, noch nahezu ungehindert durch die vor Anker liegenden Schleppzüge mit ziemlich hoher Geschwindigkeit weiterfahren, solange es die Sichtverhältnisse gestatten. Der hierdurch für den Selbstfahrer erzielbare Nutzen ist wesentlich größer als der beim zusätzlichen Schleppen erzielbare. Als weiterer Beweis für die große Wirtschaftlichkeit der Selbstfahrer sei z. B. erwähnt, daß in den letzten Jahren eine Reise von der Weser bis Mannheim in beiden Richtungen mit einem Selbstfahrer 20 Tage gegenüber 55 bis 60 Tage mit einem Schleppkahn dauerte. Wenn auch damit zu rechnen ist, daß diese extremen Unterschiede zum Teil auf die schwierigen Verhältnisse der letzten Jahre zurückzuführen sind, so bleibt ein beachtlicher Vorteil doch unter allen Umständen bestehen.

Andererseits geht die Entwicklung in der Flußschifffahrt dahin, die Selbstfahrer auf den unteren Stromstrecken, wo sich für die Freifahrt die volle Auslastung der vorhandenen Motorleistung nicht mehr lohnt, als Eilschlepper mit einem bis höchstens zwei Anhangskähnen einzusetzen. Auf den oberen Stromstrecken, wo die Stromgeschwindigkeiten sehr hoch werden, wird der Anhang dann an flachgehende Spezialschlepper abgegeben, während der Selbstfahrer

den Rest der Reise freifahrend beendet. Dieser Eilschleppdienst wird sich wohl hauptsächlich auf den wasserarmen Strömen wie Weser, Elbe und Oder durchsetzen. Auf der Donau ist vor und während des letzten Krieges mit den starken, 800pferdigen Doppelschrauben-Selbstfahrern ein solcher Eilschleppdienst bereits mit großem Erfolg betrieben worden.

Bei weiterer Steigerung der Antriebsleistung für Einschrauber auf die geplanten 500 PSe wird sich diese Methode wohl auch auf dem Rhein stärker durchsetzen. Ob sich ein solcher Eilschleppdienst auch auf den vorhandenen Kanalstrecken mit Erfolg durchführen läßt, wird in erster Linie davon abhängen, ob solche Schleppzüge in den Zeiten, wo der normale Schleppdienst ruht, noch mit möglichst hoher Geschwindigkeit einige Stunden weiterfahren können.

VII. Grenzggeschwindigkeiten im Kanal.

Untersuchungen über die Frage, wie weit sich rein technisch ohne Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die Grenzggeschwindigkeit für Schleppzüge auf dem Mittellandkanal steigern läßt, haben zu folgenden Erkenntnissen geführt (5):

Die Grenze der Kanalgeschwindigkeit wird hauptsächlich von 3 Faktoren bestimmt:

1. hydraulisch durch den von der Stauwelle vergrößerten Kahnwiderstand,
2. nautisch durch die Steuerfähigkeit der Kähne,
3. bautechnisch durch die Einwirkung des Propellerstromes auf die Kanalsole.

Zu 1. hat sich ergeben, daß die Grenzggeschwindigkeit auf dem Kanal bei etwa 55 v. H. der Stauwellengeschwindigkeit gegenüber 60 v. H. bei Flußfahrt liegt (Abb. 9). Auf einem in seiner Wasserbreite praktisch unbeschränkten Fluß errechnet sich die kritische Geschwindigkeit nach der Beziehung $v_k = \sqrt{g \cdot H_w}$ (Erdbeschleunigung \times mittlere Wassertiefe in der Fahrrinne). Auf dem Kanal wird einmal durch die Breitenbeschränkung und darüber hinaus durch die Querschnittsbeschränkung durch das Schiff und die Wasserspiegelabsenkung diese Formel zu dem Ausdruck: $v_k = \sqrt{\frac{F_c}{U}}$ hierbei bedeutet F_c den effektiven Kanalquerschnitt bei Erreichung der Stauwellengeschwindigkeit, d. h. ursprünglicher Wasserquerschnitt des Kanals minus Schiffsquerschnitt minus Wasserspiegelabsenkung, und U den verbleibenden benetzten Kanalumfang).

Für den Mittellandkanal mit $n = 4,5$ bis $5,2$ ergibt sich demnach die Grenzggeschwindigkeit zu etwa 7,6 km/h, während auf einem freien Strom bei gleicher Wassertiefe die Grenzggeschwindigkeit bei 12,5 km/h liegen würde. Unter den gleichen Annahmen errechnet sich diese Grenzggeschwindigkeit für den wesentlich günstigeren Rhein-Main-Donau-Kanal mit einem Querschnittsverhältnis von $n = 6$ zu etwa 8,6 km/h.

Ein Selbstfahrer, der auf dem Fluß bei 3,5 m Wassertiefe 14 bis 15 km/h fährt, d. h. also bei etwa 70 v. H. der Stauwellengeschwindigkeit, wird im Mittellandkanal bei voller Ausnutzung seiner Maschinenleistung kaum über 9 km/h hinaus kommen.

Um eine Schleppgeschwindigkeit von 7,6 km/h mit den bisherigen Regelschleppzügen mit gut geformten Kähnen und 2000 t Ladung zu erreichen, wäre eine Schlepperleistung von 500 PSe erforderlich. Mit der für den Mittellandkanal noch tragbaren Schlepperleistung von 350 PSe könnte diese Geschwindigkeit nur mit 2 gut geformten Kähnen von 1600 bis 1700 t Ladung im Anhang erreicht werden.

Zu 2. haben die Untersuchungen ergeben, daß eine Steigerung der Schleppgeschwindigkeit bis zu etwa 8 km/h mit geeigneten Ruderanlagen (statt des im Totwasser des Kahns liegenden Mittelruders beiderseitig nach außen in gesunde Strömung verlegte Ruder wie z. B. das Hitzler-Ruder) durchaus möglich ist, daß es aber bei dem heutigen Kahnbestand (viele plumpe, ältere Kähne mit Hackebeilruder) fraglich ist, ob mit diesen Kähnen solche Geschwindigkeiten gefahrlos wegen ihrer schlechten Kursstetigkeit gefahren werden könnten.

Zu 3. Mit einer stärkeren Wellenbildung durch den Stauwelleneinfluß ist bei gut geformten Kähnen, die allein für eine Geschwindigkeitssteigerung in Frage kommen, erst bei Geschwindigkeiten ab 70 v. H. der Stauwellengeschwindigkeit, also etwa bei 9,5 km/h zu rechnen. Entscheidend bleibt also die Wirkung des Propellerstromes auf die Kanalsohle. Die in dieser Hinsicht angestellten Versuche haben gezeigt, daß noch durchaus die Möglichkeit besteht, die Schlepperleistung über 250 PSe hinaus zu steigern, wenn nur die Energievernichtung in geeigneter Weise von der Kanalsohle ferngehalten wird. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen wird man als Grenze für die Leistungssteigerung wohl eine Leistung von 350 PSe annehmen müssen. Mit den geeigneten Mitteln wird es möglich sein, den Sohlenangriff in tragbaren Grenzen zu halten.

Als Gesamtergebnis dieser Untersuchungen folgt, daß technisch die Grenzgeschwindigkeit für den Schleppzug auf dem Mittellandkanal bis auf etwa 7,6 km/h und die Schlepperleistung bis auf 350 PSe gesteigert werden können. Mit dieser Leistung kann ein 2-Kahn-Schleppzug mit gut geformten Kähnen bei einer Gesamtladung von 1600 bis 1700 t auf die obige Geschwindigkeit gebracht werden. Bei dieser Belastung und Geschwindigkeit würde der Schlepper gerade das Optimum seines Schleppwirkungsgrades mit 37 v. H. erreichen (vgl. Abb. 10). Voraussetzung hierbei ist jedoch, daß die geschleppten Kähne über eine besonders gute Steuerfähigkeit verfügen. Durch eine Rentabilitätsrechnung, die für die mutmaßlichen Fahrtverhältnisse des geplanten Rhein-Main-Donau-Kanals angestellt wurde, konnte nachgewiesen werden, daß in wirtschaftlicher Hinsicht eine Überschreitung der Schlepperleistung von 350 PSe selbst für diesen sehr großen Kanal nicht zu empfehlen ist.

Bei den derzeitigen Gegebenheiten auf dem Mittellandkanal kann in absehbarer Zeit kaum damit gerechnet werden, daß diese Grenzgeschwindigkeit auch nur näherungsweise von allen Schleppzügen erreicht wird, da hierfür die notwendigen Voraussetzungen nicht gegeben sind. Des weiteren haben die angestellten Wirtschaftlichkeitsberechnungen ergeben (vgl. Abb. 8), daß es sich für den normalen Frachtverkehr kaum lohnen dürfte, die mittlere Schleppgeschwindigkeit wesentlich über 6,5 km/h hinaus zu steigern, da einmal die Aufwendungen für die Modernisierung des vorhandenen Kahnarks und für die Beschaffung der notwendigen stärkeren Schlepper viel zu hoch sind und zum anderen die für die stärkeren Schlepper erforderlich werdenden höheren Schleppgebühren bei Beibehaltung der üblichen Frachtraten von der Schifffahrt nicht getragen werden könnten.

Dagegen scheint für den Transport hochwertiger Güter der in Vorschlag gebrachte Eilschleppdienst durch Selbstfahrer mit einem gut steuerfähigen Anhangkahn durchaus realisierbar zu sein. Die notwendigen höheren Brennstoffkosten könnten durch günstigere Frachtraten leicht ausgeglichen werden, zumal da die Belastung des Selbstfahrermotors beim Schleppen wesentlich günstiger ist, als bei der sehr geringen Freifahrtbelastung. Der spezifische Brennstoffverbrauch wird daher beim Schleppen

günstiger, weiter wird die Maschinenanlage mehr geschont, wodurch die Reparaturkosten fallen.

Für diesen Eilschleppdienst wird vorausgesetzt, daß während der Hauptbetriebszeit die normale Schleppgeschwindigkeit (etwa 6,5 km/h) eingehalten wird, also keine Überholungen ausgeführt werden dürfen, daß aber nach Betriebsschluß genau so, wie es heute die freifahrenden Selbstfahrer machen, mit erhöhter Geschwindigkeit noch so lange weiterfahren wird, wie die Sichtverhältnisse dies gestatten. Ob sich die errechnete Grenzgeschwindigkeit in voller Höhe erreichen läßt, müßte dem praktischen Versuch überlassen bleiben. Bei modernen Selbstfahrern müßte die z. Z. vorhandene Antriebsleistung von ca. 400 PSe für diese Geschwindigkeit jedenfalls reichlich genügen. Da die Überholungsuntersuchungen ergeben haben, daß die Zugwirkung des Schleppers die Kursstetigkeit des ersten Kahnesehr erhöht, müßte ein gut geformter Schleppkahn mit einer modernen Ruderanlage durchaus in der Lage sein, die erhöhten Anforderungen an die Manövrierfähigkeit zu erfüllen. Weiter haben die modernen, für Kanalfahrt entwickelten Selbstfahrer bei gleicher Leistung einen wesentlich geringeren Sohlenangriff als jeder Kanalschlepper, so daß auch in dieser Hinsicht gegen eine Leistungssteigerung über 250 PSe hinaus keine Bedenken bestehen.

Die vorgeschlagene Maßnahme bedeutet keine zusätzliche Belastung für den normalen Schiffsverkehr auf dem Kanal, auch sind genügend geeignete Fahrzeuge schon jetzt vorhanden, so daß eine versuchsmäßige Aufnahme eines solchen Eilschleppdienstes jederzeit möglich wäre und für die Weiterentwicklung im Kanal- und Schiffbau sicher sehr interessante Ergebnisse liefern würde.

VIII. Zusammenfassung.

Aus dem in der vorliegenden Arbeit zusammengestellten Material haben sich die folgenden Erkenntnisse ergeben:

1. Für die Anforderungen, wie sie von Seiten der Schifffahrt an einen modernen Binnenschifffahrtskanal gestellt werden müssen, ist unter der Voraussetzung möglichst langer Schleusenhaltungen ein Wasserquerschnitt von mindestens 5,5fachem, besser aber 6fachem Betrag des eingetauchten Hauptspantquerschnittes vom Regelschiff vorzusehen.

2. Zur Gewährleistung einwandfreier Begegnungen bei beschränkter Überholungsmöglichkeit ist eine Kanalbreite in Schiffsbodenhöhe von mindestens 3 Schiffsbreiten des Regelschiffes erforderlich. Bei erweiterter Überholungsmöglichkeit ist dieses Maß auf 3,25- bis 3,5fache Schiffsbreite zu erhöhen bzw. es sind Weichen vorzusehen.

3. Andererseits steigt die wirtschaftliche Kanalgeschwindigkeit mit der Wassertiefe in Kanalmitte. Als Mindestwert muß hier der 1,75fache Tiefgang des Regelschiffes gefordert werden, besser wäre etwa der 1,9fache Betrag des Tiefganges.

Zu 2. und 3.: Eine eindeutige Entscheidung über das Optimum zwischen diesen beiden Werten ist nach dem bisher vorliegenden Material noch nicht möglich. Hierfür wären weitere Modellversuche erforderlich. Daß eine solche Entscheidung bei dem heutigen Stande der Modellversuchstechnik auf Grund von Modellversuchen getroffen werden kann, haben die in der vorliegenden Arbeit im Auszug mitgeteilten Modell- und Großversuche bewiesen.

4. Als Profilumriß ist die Muldenform am besten geeignet. Die Kanalbrückenhöhe sollte 4,5 m nicht unterschreiten.

5. Die wirtschaftliche Kanalgeschwindigkeit liegt etwa bei 47 v.H. und die höchstzulässige Kanalgeschwindigkeit ungefähr bei 55 v. H. der Stauwellengeschwindigkeit.

6. Um eine wirtschaftliche Kanalausnutzung zu gewährleisten, ist anzustreben, daß die mittlere Reisegeschwindigkeit auf dem Kanal der wirtschaftlichen Kanalgeschwindigkeit ziemlich nahekommt. Aus diesem Grunde sind

- a) Überholungen auf ein Mindestmaß zu beschränken,
- b) eine möglichst engbegrenzte Durchschnittsgeschwindigkeit, die etwa der wirtschaftlichen Kanalgeschwindigkeit entspricht, von allen Fahrzeugen einzuhalten,
- c) schwerschleppende Kähne vom Kanalverkehr auszuschließen oder in ihrer Abladung zu beschränken.

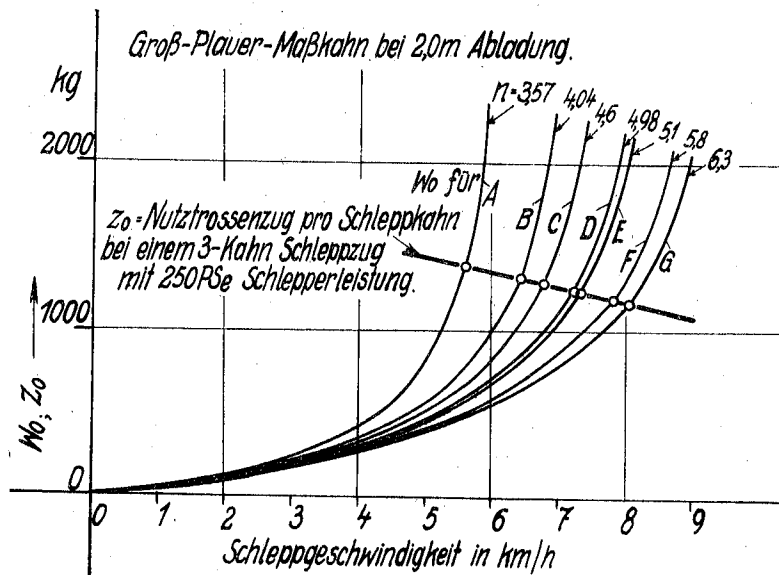
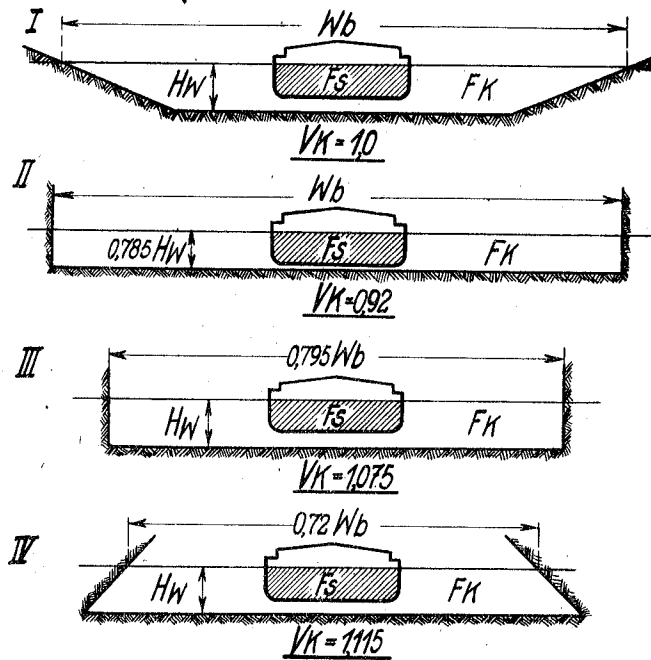
7. Die hydraulisch günstigste Schlepperleistung liegt bei 350 PSe, während die wirtschaftlichste Schlepperleistung im allgemeinen etwas niedriger liegt.

8. Selbstfahrer, die unter das Überholungsverbot fallen, sollten zur wirtschaftlichen Ausnutzung ihrer Leistung zum Schleppen und zwar möglichst für Eilschleppzüge, die nur einen Kahn befördern, eingesetzt werden. Diesen Eilschleppzügen müßte bei guter Sicht eine verlängerte Fahrzeit innerhalb der einzelnen Schleusenhaltungen zugebilligt werden.

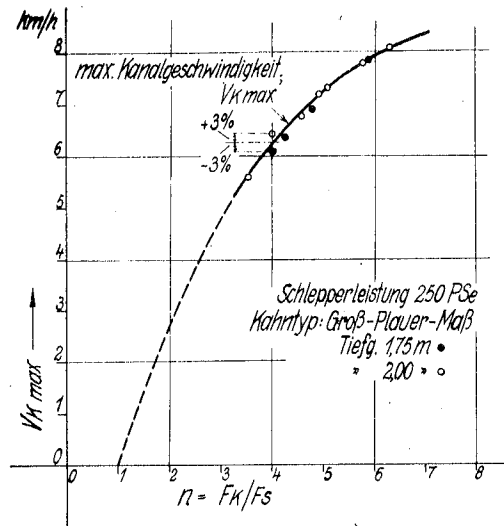
9. Die Schlepper und Selbstfahrer sind so zu konstruieren, daß ihre Antriebsmittel keine unzulässigen Beschädigungen der Kanalsole hervorrufen.

Literaturverzeichnis.

- (1) Engels u. Gebers: Weitere Schleppversuche mit Kahnmodellen in Kanalprofilen, ausgeführt in der Übigauer Versuchsanstalt; Jahrb. Schiffbautechn. Ges. IX, 1908.
- Helm: Tiefen- und Breitereinflüsse von Kanälen auf den Schiffswiderstand; Hydromechan. Probleme d. Schiffsantriebs II, R. Oldenbourg, München u. Berlin, 1940.
- (3) Helm: Selbstfahrer-Güterboote als Schlepper; WRH, 1941, Heft 18.
- (4) Helm: Einfluß von Kanalstrecken auf die Wirtschaftlichkeit im Seeverkehr; Schiff und Werft 1943, Heft 9/10.
- (5) Kempf u. Helm: Grenzgeschwindigkeit für den Schleppzug im Kanal; Jahrb. Schiffbautechn. Ges. XXXIX, 1938.

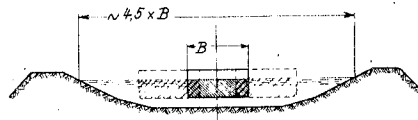


Nr. 14
Abb. 3·4



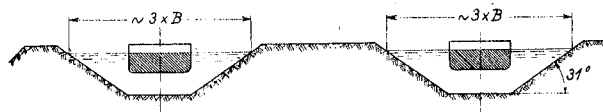
A. zweischiffiger Kanal $Q = 430 \text{ m}^3$, $F_k/F_s = 5.5$

zulässige Kanalgeschw. $\sim 10 \text{ km/h}$, vermutliche mittlere Reisegeschw. $\sim 7.5 \text{ km/h}$



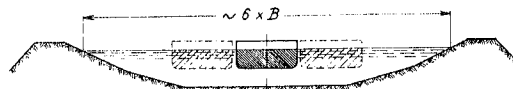
B. einschiffiger Doppelkanal $\Sigma Q = 2 \times 382 \text{ m}^3$, $F_k/F_s = 4.88$

zulässige Kanalgeschw. $\sim 10 \text{ km/h}$, vermutliche mittl. Reisegeschw. max. $\sim 11 \text{ km/h}$



C. zweischiffiger Kanal $Q = 764 \text{ m}^3$, $F_k/F_s = 9.77$

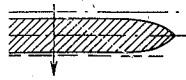
zulässige Kanalgeschw. $\sim 16.8 \text{ km/h}$, vermutliche mittlere Reisegeschw. $\sim 13.5 \text{ km/h}$



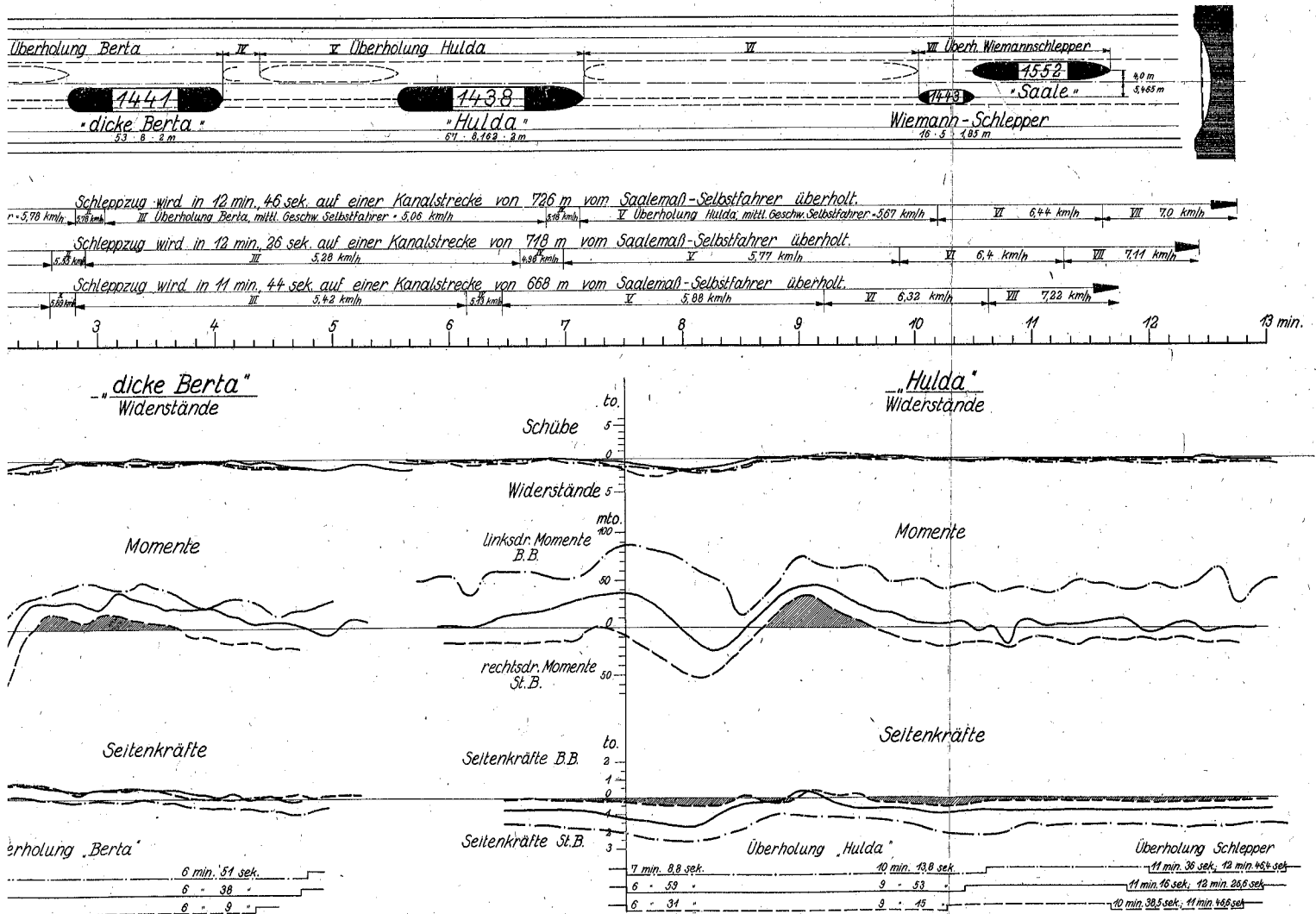
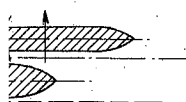
Nr. 14

Abb. 5 - 6

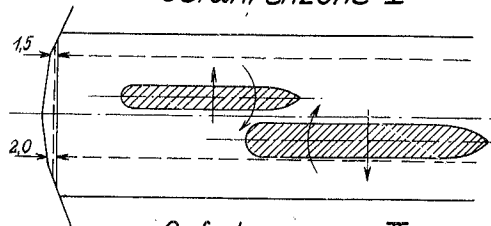
one I



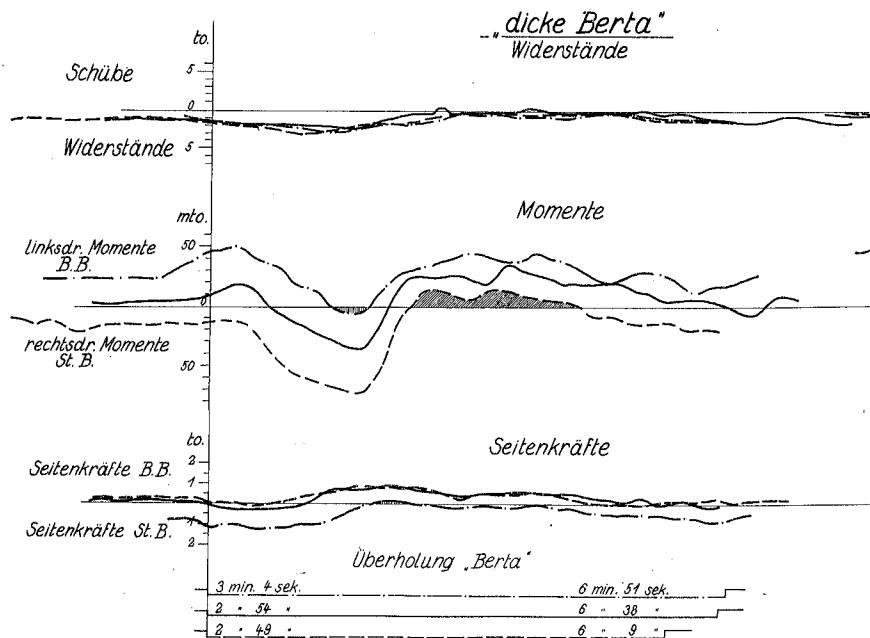
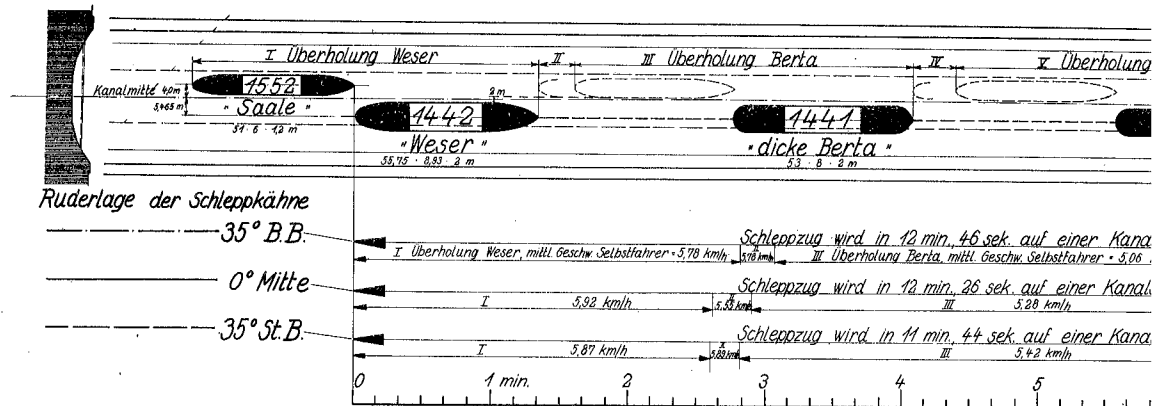
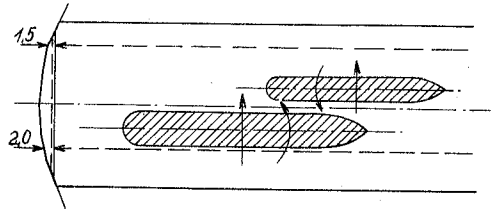
one II



Gefahrenzone I



Gefahrenzone II



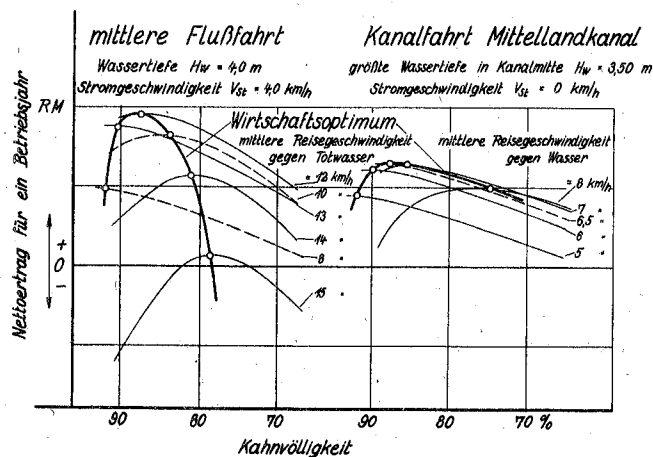
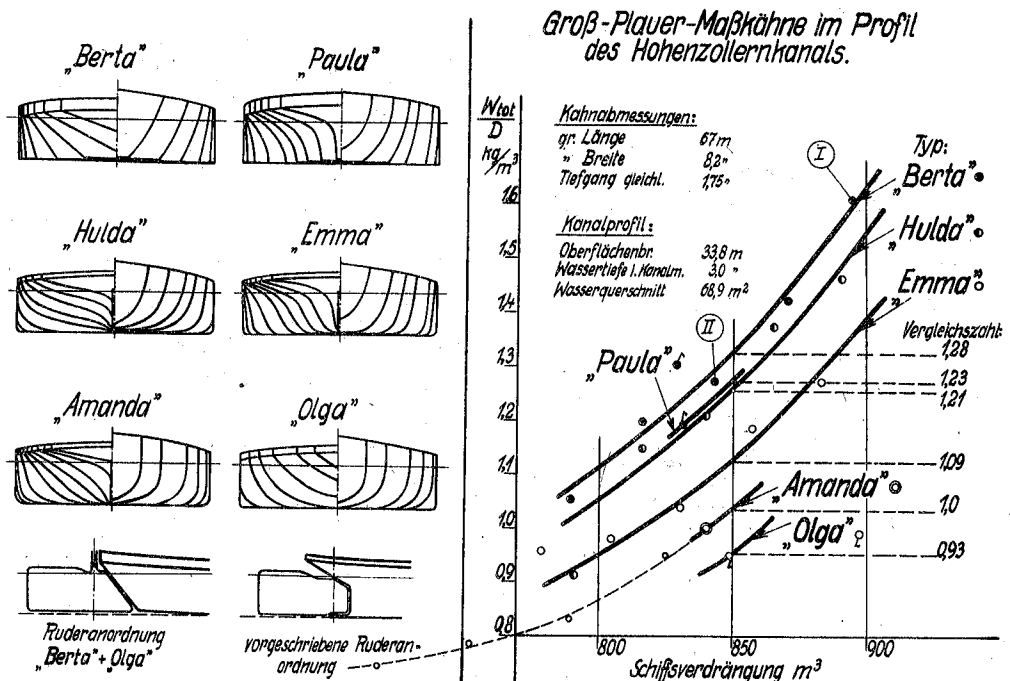


Abb. 9-10

