

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 2

Entwicklung der Arten von Antrieb und Steuerung der einzeln fahrenden Schiffe und der Schleppzüge auf Flüssen und Kanälen. — Vergleich der Selbstfahrer mit den übrigen Schiffen.

Von Kurt Helm, Oberingenieur der Hamburgischen Schiffsbauversuchsanstalt und der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg.

Thema: „Der Stand der technischen Entwicklung im Binnenschiffsbau“.

Zusammenfassung:

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über den Einfluß der unterschiedlichen Fahrwasserverhältnisse in der Binnenschifffahrt auf die Form und Größe der Schiffe, ihre Antriebsart und die Größe der Antriebsleistungen, sowie über die Steuerorgane der Binnenschiffe.

Die einzelnen Faktoren werden für die hauptsächlichen Schiffstypen der deutschen Wasserstraßen näher erläutert und an Hand von Modellversuchsergebnissen Angaben über ihre Größe gemacht:

1. Beeinflussung des Widerstandes
 - a) durch die Schiffslänge,
 - b) für gegebene Hauptabmessungen (Länge, Breite, Tiefgang) durch die Spantform, durch die Völligkeit, durch die Lage des Verdrängungsschwerpunktes.
2. Beeinflussung des Widerstandes
 - a) durch die Fahrwassertiefe, bei verschiedenen Tiefgängen,
 - b) durch die Unebenheiten des Flußbodens,
 - c) durch die Stromgeschwindigkeit,
 - d) durch das Oberflächengefälle.
3. Beeinflussung des Widerstandes von Schleppzügen durch die Lage der Kähne zueinander.
4. Antriebsarten:
Besprechung der einzelnen hauptsächlichen Antriebe (Radantrieb, Tunnel-, Düsen- und Voith-Schneider-Propeller), ihrer hydraulischen Vor- und Nachteile.
5. Hydraulischer und wirtschaftlicher Vergleich der verschiedenen Schiffstypen:
 - a) Seitenrad- und Zweischauben-Düsen Schlepper bei gleicher Leistung,
 - b) freifahrende und schleppende Selbstfahrer verschiedener Größe und Antriebsleistung,
 - c) Zweischauben-Düsen Schlepper und schleppender Selbstfahrer.
6. Vergleich des üblichen Schleppens und der amerikanischen Schubschleppmethode.
7. Besprechung der bei Binnenschiffen verwendeten Steuerorgane und der Beeinflussung der Manövrierfähigkeit durch die Fahrwasserverhältnisse.

Literatur:

- [1] Helm, K.: Über den Einfluß von Form und Größe des Wasserquerschnittes sowie der Schiffsförmigkeit, der Geschwindigkeit und der Art des Antriebes auf die Gestaltung eines künstlichen Wasserlaufes. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen, Sept. 1949 (Herausg. Bundesverkehrsministerium).

- [2] Helm, K. und Wöltinger: Untersuchungen der Beziehungen zwischen einerseits der Querschnittsgestalt, der Bodenbeschaffenheit, der Art der Auskleidung und der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Wasserlauf (Fluß, Kanal), und andererseits dem Fahrwiderstand, dem Wirkungsgrad der Schrauben und den zulässigen Geschwindigkeiten der Schiffe in bezug auf die Unterhaltungskosten des Wasserlaufes. XVIII. Intern. Schiffahrtskongreß Rom 1953, Abt. I, Mitt. 1
- [3] Koch, Foerster, Kempf: Wirtschaftliche Binnenschiffe. WRH 1929, H. 3, S. 41
- [4] Helm, K.: Vergleich der Transportleistung der neuen Donau-Kähne einzeln und im Schleppzug. Schiff und Werft 1944, H. 5/6 und H. 11/12
- [5] Seiler, E.: Die Klasseneinteilung der europäischen Wasserstraßen und ihre Bedeutung für die Binnenschifffahrt. Wasserwirtschaft 45. Jahrg. Nr. 10, Juli 1955, S. 245 bis 258
- [6] Helm, K.: Der Einfluß von Unebenheiten des Flußbodens bei der Fahrt auf flachem Wasser. WRH 1937, H. 14, S. 218
- [7] Zülcher: Leistung und Wirtschaftlichkeit von Flußschleppern verschiedener Antriebsarten. WRH 1927, H. 24, S. 556
- [8] Helm, K.: Selbstfahrer-Güterboote mit eigenem Antrieb. Zeitschr. für Binnenschifffahrt, vermutlich 1942
- [9] Helm, K.: Modellversuchsergebnisse mit einem Flußschiff in strömendem Wasser im freien Flußlauf. WRH 1934, H. 12, S. 146
- [10] Kempf, G.: Über den Einfluß von Strombrückenpfeilern auf die Leistung und Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt. WRH 1934, H. 19, S. 265

		Seite
Gliederung:	Vorbemerkung	34
	Fahrzeugtypen	35
	Antriebsarten	42
	Steuerorgane	55

Vorbemerkung

Wenn man die Entwicklung der Binnenschifffahrt nach der Einführung des Dampftriebes betrachtet und feststellt, in welchem Maße die Größe der Antriebsleistungen und die Schiffsabmessungen seither zugenommen haben, dann muß man berücksichtigen, daß diese Entwicklung nicht allein durch die technischen Fortschritte im Schiffs- und Maschinenbau und durch die wirtschaftliche Entwicklung des Transportwesens ermöglicht wurde, sondern daß erst der Ausbau der Wasserstraßen eine Schifffahrt mit den heute gebräuchlichen Schiffstypen ermöglicht hat.

Obgleich auf den einzelnen Stromgebieten die durchschnittlichen Abflußmengen noch heute praktisch die gleichen sind wie vor etwa 100 Jahren, ist es im Laufe des letzten Jahrhunderts gelungen, die Mindestwassertiefen auf den deutschen Strömen etwa zu verdoppeln, während in örtlich begrenzten Engpässen, wie sie in Felsstrecken mehrfach vorhanden sind, noch wesentlich größere Erfolge erzielt werden konnten.

Im Zusammenhang mit dieser Entwicklung nahm naturgemäß auch der Umfang der Binnenschifffahrt zu, und es traten Probleme auf, an deren Lösung sich die Hamburgische Schiffsbau-Versuchsanstalt (HSVA) seit etwa 1926 maßgebend beteiligt hat. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sowie die Ergebnisse der Untersuchungen der seit 1954 arbeitenden Versuchsanstalt für Binnenschiffbau in Duisburg (VBD) bilden die Grundlage für die vorliegende Abhandlung, deren Ziel ist, einen Überblick darüber zu vermitteln, wie die unterschiedlichen Fahrwasserverhältnisse auf den Strömen und Kanälen und deren Ausbau und Verbesserungen die Form und Größe der Schiffe und ihrer Steuerorgane, ihre

Antriebsart und die Größe der Antriebsleistungen beeinflußt hat. Weiter wird gezeigt, wie durch Anpassung der Schiffe an ihre Hauptreisestrecke („Regelschiffe“) die Wirtschaftlichkeit der Binnenschifffahrt gesteigert wurde.

Über den gegenseitigen Einfluß von Kanal- und Schiffsgröße sowie der Querschnittsform der Kanäle wurde von Helm und Wöltinger bereits eingehend früher berichtet [1], [2], so daß diese Fragen hier nur soweit behandelt zu werden brauchen, wie zum Verständnis unbedingt erforderlich ist.

Fahrzeugtypen

Die Binnenschiffe — Schleppkähne, Schlepper und Selbstfahrer (Frachtschiffe mit eigenem Antrieb) — müssen in ihren Hauptabmessungen selbstverständlich ihren Hauptfahrgebieten angepaßt sein. Für gleiche Fahrgebiete sind die Hauptabmessungen, die Formen und die Völligkeiten der Regel-Frachtfahrzeuge nahezu gleich. (Unterschiede bestehen vor allem in der Hinterschiffsform und bei freifahrenden Selbstfahrern wegen der höheren Reisegeschwindigkeiten auch geringfügig in der Völligkeit.) Aus diesem Grunde können Kähne und Selbstfahrer zunächst gemeinsam behandelt werden und zwar in bezug auf ihre Hauptabmessungen, ihre Formgebung und die Beeinflussung ihres Widerstandes durch die Fahrwasserverhältnisse.

In früheren Jahren hatte jedes Fahrgebiet seinen eigenen Schiffstyp, so daß als allgemeine Richtlinie nur gesagt werden kann, daß auf den flachen Strömen wie Weser, Elbe und vor allem Oder den breiteren, flachgehenden Fahrzeugen mit Holzböden der Vorzug gegeben wurde, während auf den tieferen Strömen (Rhein und Donau) schon damals Eisenkähne liefen, die wegen der größeren Wassertiefen auch mit entsprechend größeren Tiefgängen und geringeren Breiten gebaut werden konnten.

Mit der Schaffung der Querverbindungen zwischen den Strömen ergab sich dann die Notwendigkeit, die Kahnabmessungen auch den Schleusenabmessungen und den Kanalbreiten anzupassen, wobei der durch die Fahrwasserverhältnisse der Ströme gegebene größte Tiefgang auf den meisten Kanälen voll ausgenutzt werden konnte, so daß in dieser Beziehung keine Umstellung erforderlich war. Damit lagen aber die Hauptabmessungen für alle die Kanäle befahrenden Fahrzeuge fest, und ihre Tragfähigkeit konnte nur noch durch Variation der Völligkeit beeinflußt werden.

Da aber die Schleppgebühren nicht nach dem tatsächlich erforderlichen Leistungsaufwand, sondern nach den beförderten Ladungstonnen, der Länge und der Beschaffenheit der Reisestrecke berechnet werden, ist es natürlich für die Kahnhalter am günstigsten, möglichst völlige Kähne zu bauen; der Mehraufwand an Schlepplohn wird durch die höheren Frachteinnahmen leicht ausgeglichen.

Diese Tatsachen führten zum Bau sehr ungünstiger Kähne mit einem außergewöhnlich hohen Schleppwiderstand, die außerdem wegen ihrer zumeist übermäßig völligen Hinterschiffe schlecht steuerten und daher stark gierten, also auch in ihren nautischen Eigenschaften unzureichend waren. Im Laufe der Zeit machten sich diese schlecht schleppenden Kähne vor allem auf den Kanalstrecken so unangenehm bemerkbar, daß man sich (um 1928) entschloß, für die damals auf den mitteldeutschen Wasserstraßen üblichen Kahn Typen durch systematische Modellversuche festzustellen, wie groß die Widerstandsunterschiede sind, die durch Verschiedenheiten der Form und der Völligkeit auftreten können. Dieses in der HSPA durchgeführte Versuchsprogramm zeigte (Bild 1), daß bei Einhaltung glei-

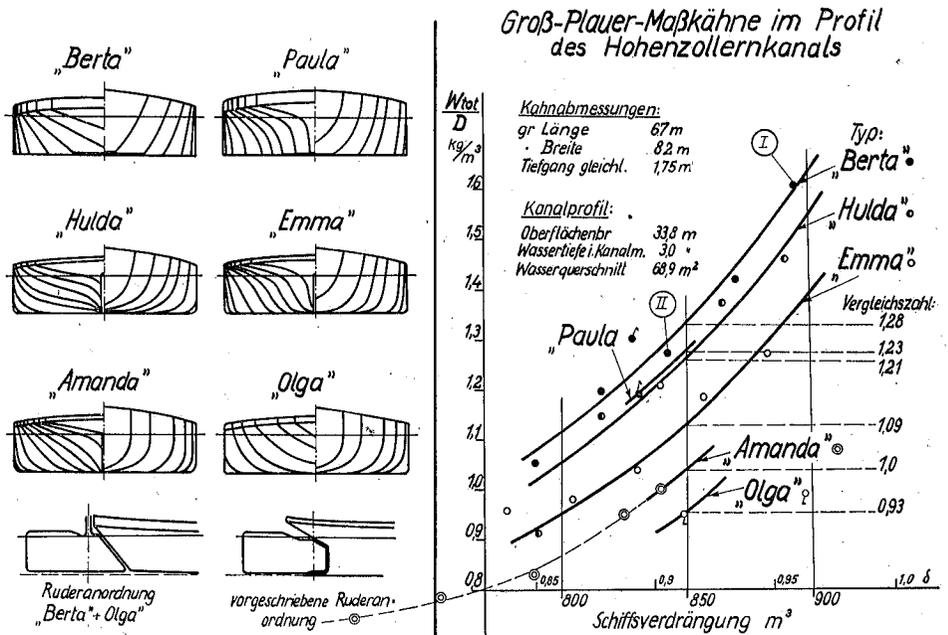


Fig. 1

Bild 1 Einfluß von Schiffsform und Völligkeit auf den Schleppkraftbedarf bei einer Schleppgeschwindigkeit von 5 km/h.

cher Verdrängung die Veränderung der Form den Widerstand bis zu 30 % beeinflusst, während bei gleichem Spantcharakter eine Erhöhung der Völligkeit von ca. 0,86 auf ca. 0,96 den Widerstand um mehr als 50 % ansteigen läßt.

Diese Untersuchungen waren für die Gestaltung der Binnenschiffe von maßgebender Bedeutung; ihr Endergebnis war die Schaffung des sogenannten "Amanda"-Typs, dessen höchstzulässige Völligkeit auf 0,88 beschränkt wurde. Dieser Typ hat sich in der Praxis dann sowohl in bezug auf die erforderliche Schleppkraft als auch auf die Kursstetigkeit im Schleppverband und auf Steuerfähigkeit so gut bewährt, daß er mit geringen Abwandlungen noch jetzt als Standardform für Schleppkähne gelten kann [3].

In einem späteren Programm wurde dann die in bezug auf den Widerstand günstigste Lage des Verdrängungsschwerpunktes ermittelt (Bild 2) und festgestellt, daß bei der "Amanda"-Form mit einer Völligkeit von ca. 0,88 der Schwerpunkt bei Flußkähnen ungefähr 1 % der Länge und von reinen Kanalkähnen etwa 1,5 % der Länge vor Mitte Schiff liegen sollte. Bei schärferen Kähnen, die z. B. auf der Donau wegen der höheren Stromgeschwindigkeiten der Kataraktenstrecke und des Oberlaufes gebräuchlich sind, muß der Verdrängungsschwerpunkt noch weiter vorn (ca. 1,5 bis 1,75 % der Länge vor Mitte Schiff) angeordnet sein. Die bei der Vorverlagerung des Schwerpunktes entstehende zusätzliche Hinterschiffsverschärfung ergab eine weitere Verbesserung der Steuerfähigkeit [4].

Bisher wurde der Einfluß des Spantcharakters, der Völligkeit und der Schwerpunktlage besprochen, als nächstes wäre zu untersuchen, welchen Einfluß die Größe der Schiffe auf ihre Widerstand hat.

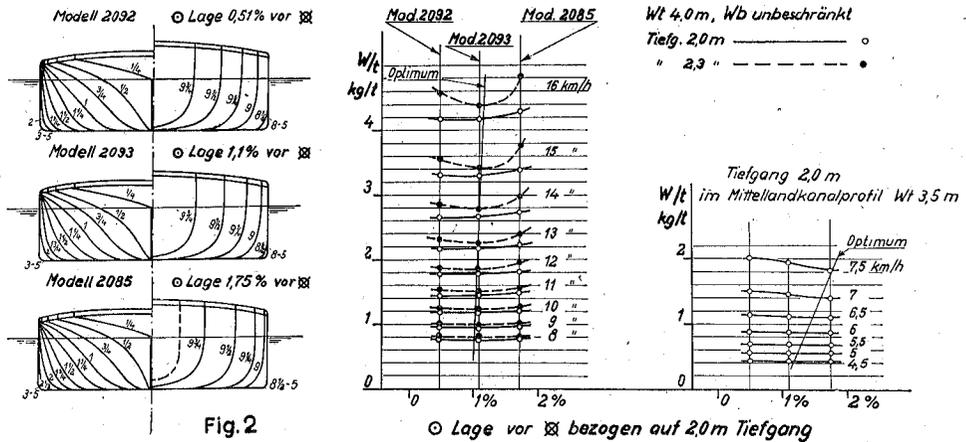


Bild 2 Einfluß der Lage des Verdrängungsschwerpunktes auf den Schleppkraftbedarf. (Schiffsabmessungen: 80 m × 9 m × 2 m, Verdrängung 1222 m³, Völligkeit 0,87)

Seiler [5] hat in seiner Arbeit über die Klasseneinteilung der europäischen Wasserstraßen für jede Klasse der Wasserstraßen auch das zugehörige größte zulässige Typschiff angegeben.

Klasse I umfaßt etwa 42,5 % des insgesamt 19760 km langen europäischen Wasserstraßennetzes und kann nur von dem kleinsten Schiffstyp, den Penischen (Länge 38,5 m, Breite 5,0 m, größter Tiefgang 2,2 m, größte Tragfähigkeit 300 t), befahren werden, die ihrerseits das gesamte Wasserstraßennetz befahren könnten.

Das Regelschiff für die Wasserstraßen der Klasse II ist der Kempenaar-Kahn (Länge 50,0 m, Breite 6,6 m, gr. Tiefgang 2,5 m, gr. Tragfähigkeit 600 t), der 57,5 % aller Wasserstraßen befahren kann.

Der Dortmund-Ems-Kanal-Kahn (Länge 67,0 m, Breite 8,2 m, gr. Tiefgang 2,5 m, gr. Tragfähigkeit 1000 t) kann noch auf Wasserstraßen der Klasse III verkehren, er ist damit über 44 % des Gesamtnetzes einsetzbar.

Das Regelschiff für Klasse IV, der Rhein-Herne-Kanal-Kahn (Länge 80,0 m, Breite 9,5 m, gr. Tiefgang 2,5 m, gr. Tragfähigkeit 1350 t) kann noch 30,5 % des Wasserstraßennetzes befahren.

Die größten Binnenschiffe, die sogenannten Rheinkähne (Länge 95,0 m, Breite 11,5 m, gr. Tiefgang 2,7 m, gr. Tragfähigkeit 2000 t) können nur noch die Wasserstraßen der Klasse V befahren (im wesentlichen die Rheinstrecke bis etwa Koblenz aufwärts und das Mündungsgebiet des Rheins mit Juliana- und Albert-Kanal).

Da nun diese 5 Regelschiffe alle auf der größten Wasserstraße (Klasse V) anfallen können und hier für eine mittlere Schleppergeschwindigkeit von 12 km/h, wie sie z. B. auf dem Rhein üblich ist, nahezu unbeschränkte Fahrwasserverhältnisse vorliegen, läßt sich unter Voraussetzung gleicher Völligkeit für alle Fahrzeuge aus Mittelwerten von Modellversuchsergebnissen mit Kahnformen der angenäherte Einheitswiderstand ($W_{tot}/L; L = \text{Ladungstonnen}$) feststellen. Danach ergibt sich folgender Vergleich:

**Vergleich der Einheitswiderstände der Regelkähne
für die Wasserstraßen der Klassen I bis V**
bei Fahrt mit 12 km/h gegen Wasser auf unbegrenztem Fahrwasser
(Kahnvölligkeit ∞ 0,88)

Eigenes Fahrgebiet	Gesamtes Fahrgebiet	Kahntyp	Länge m	L/B	Einheitswiderst. %
V	V	Rheinkahn	95,0	8,25	100
IV	IV V	Rhein-Herne-Kanal-Kahn	80,0	8,4	105
III	III V	Dortmund-Ems-Kanal-Kahn	67,0	8,2	120
II	II V	Kempenaar-Kahn	50,0	7,6	215
I	I V	Penische	38,5	7,7	360

Abgesehen davon, daß die kürzeren Kähne ungünstigere L/B-Werte haben, ist der höhere Einheitswiderstand im wesentlichen eine Funktion der Länge. Es zeigt sich deutlich, daß bei der gewählten Geschwindigkeit von 12 km/h der Widerstand enorm ansteigt, wenn eine Schiffslänge von 65 m unterschritten wird. Diese Tendenz verstärkt sich noch bei höheren Geschwindigkeiten, wie sie für freifahrende Selbstfahrer gewählt werden.

Da der Völligkeitsgrad der Penischen wesentlich höher liegt als bei den modernen deutschen Kahntypen, ist der tatsächliche Einheitswiderstand dieses Schiffstyps noch ungünstiger, als die Tabelle zeigt.

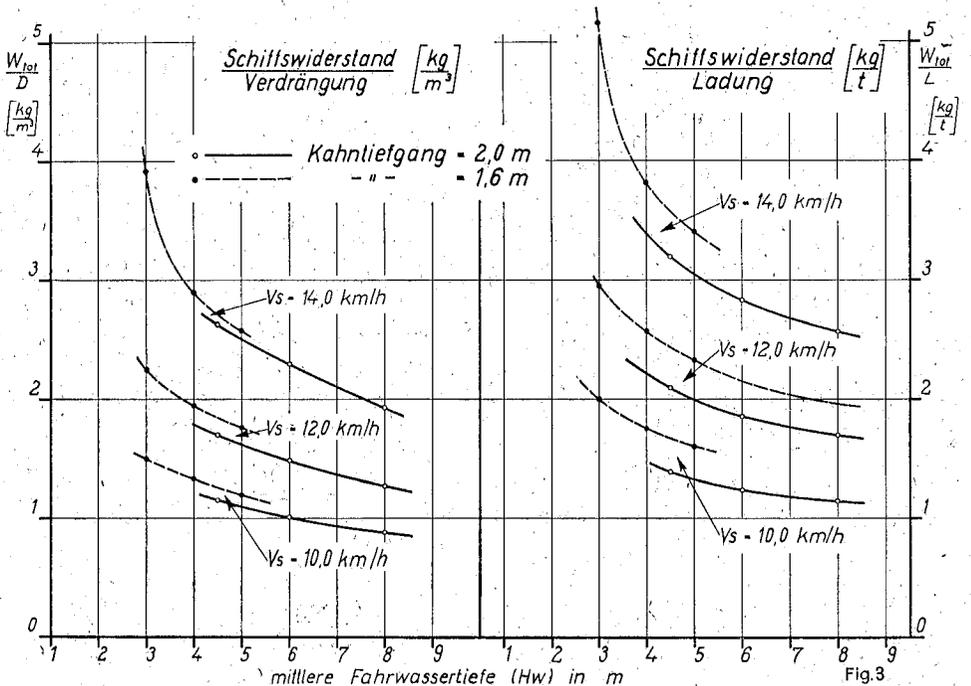


Bild 3 Einfluß von Fahrwassertiefe und Schiffstieftgang auf den Schleppkraftbedarf.
(Schiffsabmessungen: 67 m \times 8,16 m \times 2 m, Verdrängung 934 m³, Völligkeit 0,88)

Der Einfluß von Wassertiefe, Tiefgang und Geschwindigkeit auf den Einheitswiderstand wird für das Beispiel des Dortmund-Ems-Kanal-Kahnes nach Versuchsergebnissen der VBD auf Bild 3 wiedergegeben.

a) Einfluß der Fahrwassertiefe; mittlere Schleppgeschwindigkeit 12 km/h

mittlere Fahrwassertiefe m	Tiefgang 2,0 m		Tiefgang 1,6 m	
	Einheitswiderstand kg/t	W/L %	Einheitswiderstand kg/t	W/L %
8	1,70	100	1,96	100
6	1,85	109	2,14	109
4	2,20	129	2,56	131
3	—	—	2,95	151

Für die mittlere Schleppgeschwindigkeit von 12 km/h ist also der Schiffswiderstand ziemlich unabhängig vom Tiefgang um etwa 30 % höher, wenn die Fahrwassertiefe von 8,0 m auf 4,0 m, also auf die Hälfte absinkt. Dieser Prozentsatz nimmt bei geringeren Wassertiefen zu, z. B. bei einer Wassertiefenverminderung von 6,0 m auf 3,0 m (fast 40 %).

b) Einfluß des Tiefgangs; mittlere Schleppgeschwindigkeit 12 km/h

Tief- gang	mittlere Fahrwassertiefe 8 m		mittlere Fahrwassertiefe 6 m		mittlere Fahrwassertiefe 4 m	
	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %
2,0	1,70	100	1,85	100	2,20	100
1,6	1,96	115	2,14	115,5	2,56	116

Bei einer mittleren Schleppgeschwindigkeit von 12 km/h erhöht sich der Einheitswiderstand ziemlich unabhängig von der Wassertiefe um ca. 15 %, wenn der Schiffstiefgang von 2,0 m auf 1,6 m vermindert wird.

c) Einfluß der Schleppgeschwindigkeit; Kahntiefgang 2,0 m:

Vs km/h	mittlere Fahrwassertiefe 8 m		mittlere Fahrwassertiefe 6 m		mittlere Fahrwassertiefe 4 m	
	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %
10	1,15	100	1,24	100	1,47	100
12	1,70	148	1,85	149	2,20	150
14	2,56	223	2,83	229	3,39	231

Kahntiefgang 1,6 m:

Vs km/h	mittlere Fahrwassertiefe 5 m		mittlere Fahrwassertiefe 4 m		mittlere Fahrwassertiefe 3 m	
	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %	W/L kg/t	W/L %
10	1,60	100	1,74	100	2,00	100
12	2,33	146	2,56	147	2,95	148
14	3,40	212	3,82	220	5,16	258

Innerhalb der normalen Schleppgeschwindigkeitsgrenzen (10 km/h bis 12 km/h) schwankt die Widerstandszunahme unabhängig vom Tiefgang und von der Wassertiefe um ca. 50 %; bei höheren Geschwindigkeiten aber nimmt der Widerstandszuwachs mit abnehmender Wassertiefe stark zu (zwischen 75 % und 110 % über die Widerstände bei 12 km/h hinaus).

Im Schleppverband ergibt sich noch eine weitere Beeinflussung der Kahnwiderstände, die von der Art der gewählten Schleppmethode abhängig ist.

Für die Bergfahrt ist auf dem Rhein üblich, die Kähne gestaffelt zu schleppen, wobei der Abstand zwischen Schlepper und erstem Kahn zwischen 120 m und 150 m beträgt, während die Abstände zwischen den Kähnen bei ungefähr 1 Kahnlänge liegen. Hierbei ist der vom Schlepper zu überwindende Gesamtwiderstand des Schleppzuges praktisch gleich der Summe der Einzelwiderstände der geschleppten Kähne.

Auf den anderen Strömen werden die Kähne jedoch in einer Reihe hintereinander geschleppt (auf der Donau u. U. in zwei nebeneinander fahrenden Reihen). Dabei sind die Abstände zwischen den einzelnen Kähnen z. T. nur gering. Die Kähne fahren also praktisch in der Kiellinie des vorausfahrenden Fahrzeuges. Modellversuche der HSVA zeigten, daß der Gesamtwiderstand von 4 mit Zwischenräumen von $\frac{1}{2}$ bis 1 Kahnlänge in Kiellinie hintereinander fahrenden Kähnen nur etwa 83 % der Summe der Einzelwiderstände ausmacht. Wird der Abstand zwischen den Kähnen auf das geringst mögliche Maß vermindert, dann geht der Gesamtwiderstand auf etwa 70 % der Widerstandssumme zurück. Eine Verkleidung der Übergänge zwischen den Vor- und Hinterschiffen (Anbringung von Boden- und Seitenplatten) vermindert den Widerstand weiter auf etwa 65 % der Summe der Einzelwiderstände. (Dieser Fall entspricht ungefähr der in Amerika üblichen Schleppmethode mit „integrated towboats“.) Bei größeren Schleppverbänden kann nach Versuchsergebnissen der VBD und nach Aussagen amerikanischer Schiffahrtssachverständiger der Widerstand so gekoppelter Fahrzeuge sogar bis auf ca. 50 % der Summe der Einzelwiderstände zurückgehen.

Bei Talfahrt ist es mit Rücksicht auf gute Manöviereigenschaften notwendig, die Schleppzüge möglichst kurz zu halten, weshalb die Kähne z. B. auf der Donau zu 2 bis 4 Fahrzeugen nebeneinandergekoppelt an zwei kurzen Kreuzseilen geschleppt werden. Auf dem Rhein werden wegen der großen Verkehrsdichte nur jeweils 2 Kähne nebeneinandergelegt und insgesamt 3 bis 4 Kähne in kurzem Abstand hintereinander geschleppt.

Der Widerstand zweier nebeneinander geschleppter Kähne erhöht sich auf das 1,5fache und bei 3 Kähnen, wenn der dritte Kahn eng aufgeschlossen hinter den beiden nebeneinander fahrenden Kähnen liegt, auf das 1,15fache der Summe der Einzelwiderstände.

Der auf den Bug des ersten KAHNES treffende Propellerstrahl des Schleppers erhöht ebenfalls noch den Widerstand des Schleppzuges; diese Frage wird später gesondert behandelt.

Zum Abschluß des ersten Teiles dieser Arbeit soll noch auf einen weiteren Faktor hingewiesen werden, der den Schleppwiderstand beeinflusst, und zwar sind dies die Unebenheiten des Flußbodens. Zur Klärung dieser Frage wurden in der HSVA Versuche bei verschiedenen großen, quer zur Fahrtrichtung liegenden Unebenheiten durchgeführt; die ungünstigsten Stellen lagen dabei 160 m bis 320 m für die Großausführung auseinander, die Höhenunterschiede betragen $\pm \frac{1}{2}$ bis 1 m. Aus den auf der oberen Hälfte von Bild 4 wiedergegebenen Versuchsergeb-

nissen geht hervor, daß die auf unebenem Boden erreichbare mittlere Fahrge-
 schwindigkeit nicht der mittleren Wassertiefe, sondern einer etwas geringeren
 Wassertiefe zugeordnet ist. Will man also Modellversuche für unebenen Boden
 (Flußfahrt) wie üblich über ebenem Boden durchführen, dann muß statt der arith-
 metisch gemittelten Wassertiefe die „wirksame Wassertiefe“ verwendet werden.
 Diese „wirksame Wassertiefe“ ist dem arithmetischen Mittel der auf der kleinsten
 und der größten Wassertiefe des entsprechenden Fahrgebietes erreichbaren
 Geschwindigkeiten zugeordnet und kann aus diesen, aufgetragen über den zuge-
 hörigen Wassertiefen, konstruiert werden (Bild 4, unter Hälfte) [6].

Bei Unebenheiten, die parallel zur Fahrtrichtung verlaufen, entspricht dagegen
 die „wirksame Wassertiefe“ dem arithmetischen Mittel der Querschnittstiefen,
 wie Vergleichsversuche in der VBD mit einem seitlich etwas (i. M. etwa 0,25 m
 entsprechend) abfallenden Tankprofil und einem ebenen Profil zeigten.

Diese Ergebnisse sind von grundsätzlicher Bedeutung für den Vergleich zwi-
 schen Modell- und Großversuch. Sie zeigen, daß das von Helm schon etwa 1930
 vorgeschlagene Verfahren, bei Flachwasserversuchen, die ja allgemein auf
 ebenem Boden unternommen werden, eine „wirksame Wassertiefe“ einzusetzen,
 die etwas kleiner ist, als dem arithmetischen Mittel aus dem Längenprofil der
 Flußstrecke entsprechen würde, richtig ist.

Nach den Ergebnissen der neuen Versuche der VBD wäre dieses Verfahren voll-
 ständig korrekt, wenn statt der Mittelwerte aus dem Längenprofil in der Fahrrinne
 zunächst ein Mittelwert der mittleren Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne (etwa
 für 100 bis 120 m Strombreite oder, bei schmalen Strömen, im Bereich zwischen
 den Bühnenköpfen) gebildet und dieser Wert dann nach Bild 4 korrigiert würde.

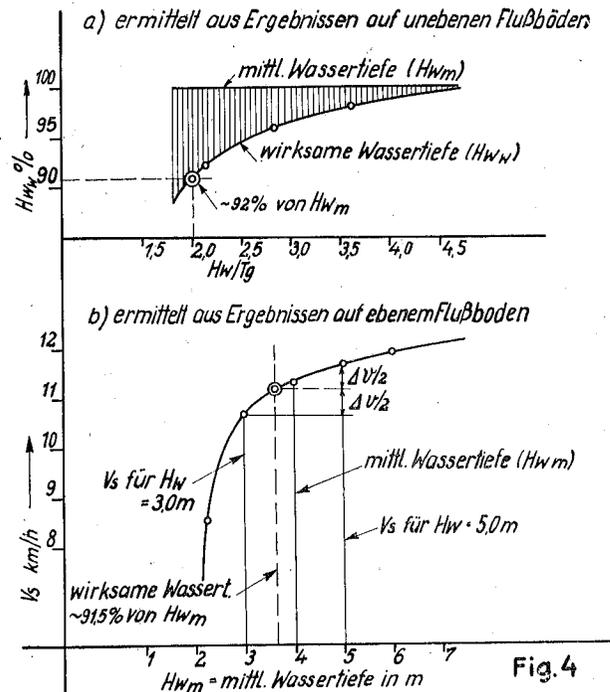


Bild 4 Einfluß der Unebenheiten des Flußbodens auf die Schiffsgeschwindigkeit. Ermittlung der wirksamen Wassertiefe.

Dieses kombinierte Verfahren wäre jedoch viel zu zeitraubend, auch fehlen oft die hierzu erforderlichen hydrographischen Unterlagen. Außerdem hat sich bereits mehrfach gezeigt, daß auch die bisher gewählte Methode zufriedenstellende Ergebnisse für den Vergleich von Modell- und Großversuch hat.

Antriebsarten

Bis zur Einführung des Dieselmotors (etwa in den Jahren 1924 bis 1926) wurde in der Binnenschifffahrt überwiegend geschleppt und nur mit wenigen sogenannten „Eildampfern“ ein Stückgutverkehr durchgeführt.

Als Antriebsmittel diente in dieser Zeit hauptsächlich das Schaufelrad, und zwar wurde auf den großen, breiten Strömen wie Rhein, Donau und Elbe durchweg der hydraulisch günstigere Seitenradantrieb bevorzugt, bei dem die Gesamtbreite über Radkasten je nach der Stärke des Schleppers das Doppelte bis 2,5fache der eigentlichen Schiffsbreite beträgt. Auf schmalen Flußläufen mit starken Krümmungen und engen Brückendurchfahrten und auf kanalisierten Flußstrecken wurde der schmalere Heckantrieb gewählt. Hierbei bewährte sich am besten die Bauart mit 2 seitlich am Heck angeordneten Rädern von je etwa $\frac{1}{3}$ Schiffsbreite, wobei das Hinterschiff schwanzartig zwischen den Rädern ausläuft.

Die Schiffschraube als Antriebsmittel für Flußschlepper wurde etwa 1910 eingeführt, jedoch wegen des notwendigen größeren Tiefgangs zunächst nur auf den unteren Stromstrecken mit größeren Wassertiefen. Wirklich wirksam eingesetzt werden konnte aber der Propellerantrieb erst nach Einführung der Dieselmotoren, die es durch ihr wesentlich geringeres Maschinengewicht ermöglichten, kleinere Schlepper mit geringeren Tiefgängen zu bauen, die auch auf den oberen Stromstrecken einsetzbar waren. Gleichzeitig hatten diese Maschinen Drehzahlen, die bei Wahl von Tunnelschrauben auch im Binnenschiffbau optimale Propellerdurchmesser zuließen, so daß die Antriebskraft wirtschaftlich ausgenutzt werden konnte.

Grundsätzlich muß gesagt werden, daß derjenige Antrieb am günstigsten ist, der die auf ihn übertragene Energie möglichst verlustfrei dem Wasser mitteilt. Je größer die beschleunigte Wassermasse und je kleiner die erteilte Beschleunigung, d. h. aber, je geringer die Belastung PS pro m² Strahlfläche bei gleicher Schiffsgeschwindigkeit ist, um so günstiger ist der Antrieb. Auf dieser Tatsache beruht die hydraulische Überlegenheit des Randantriebes, vor allen Dingen bei stark beschränkter Wassertiefe, wo der Zustrom des Wassers zu den Antriebsorganen stark behindert ist. Hinzu kommt noch, daß der Sog durch den von ihm erzeugten Unterdruck am Hinterschiff eine steuerlastige Vertrimmung des Fahrzeuges hervorruft, die wiederum eine Widerstandserhöhung zur Folge hat; gleichzeitig wird die Gefahr für eine Grundberührung vergrößert.

Ein in den Jahren 1926 bis 1928 durchgeführtes größeres Versuchsprogramm der HSVA bestätigte diese Erkenntnisse, zeigte aber gleichzeitig, daß ein Vierschraubenschlepper mit Tunnelschrauben dem Seitenradschlepper hydraulisch nur noch um etwa 12% unterlegen ist, während der wirtschaftliche Vergleich zwischen Seitenradschlepper mit Dampftrieb und Vierschrauben-Tunnelschlepper mit Dieselmachine schon eine 5%ige Überlegenheit des Schraubenschleppers nachwies [7].

Eine beachtliche Verbesserung des Schraubenantriebes — vor allem beim Schleppen — stellte die Einführung von Schraubenummantelungen (Kort-Düsen) dar, die je nach der Schraubenbelastung im Bereich der üblichen Schleppgeschwindigkeiten zwischen 10 und 12 km/h Verbesserungen von 10 bis 20% bringen

können, wie durch Modellversuche einwandfrei nachgewiesen werden konnte. Man kann jetzt also Schraubenschlepper konstruieren, die einem Seitenradschlepper hydraulisch gleichwertig sind.

Auch der Seitenradantrieb könnte bei den hochbelasteten schweren Radschleppern noch um 10 bis 15 % verbessert werden durch die Verwendung von Süberkrüb-Leitflächen hinter den Rädern, doch konnten sich diese Leitflächen in der Praxis trotz ihrer nachweislichen Vorzüge bisher nicht durchsetzen, weil verstärkte Vibrationen auftraten.

Eine weitere Antriebsart, die sich in den letzten Jahrzehnten auch in der Binnenschifffahrt eingeführt hat, ist der Voith-Schneider-Propeller (VSP), bei dem wie beim Randantrieb eine rechteckige Strahlfläche die Möglichkeit bietet, auch bei kleinstem Tiefgang noch sehr günstige Strahlflächen unterzubringen. Außerdem ist der VSP ein Umsteuerpropeller, er kann also bei allen Belastungsfällen (Pfahlzug, Schleppfahrt und Freifahrt) die zur Verfügung stehende Motorleistung voll ausnutzen, und sämtliche Manöver können ohne Umsteuerung der Hauptmaschine durchgeführt werden.

Ganz besondere Vorteile bietet der VSP aber durch seine ausgezeichneten Manövrier- und Stoppeigenschaften, die diese Antriebsart besonders für Bugsierschlepper geeignet macht. Zu diesem Zweck wurde ein eigener Schiffstyp, der „VSP-Trecker“, entwickelt (z. B. Typ „Biene“ und „Hornisse“). Aber auch bei Fähren, Fahrgastschiffen und Streckenschleppern hat sich der VSP wegen seiner guten Manöviereigenschaften und der sehr geringen Vibrationen gut bewährt.

Mit der Einführung des Dieselmotors in der Binnenschifffahrt wurde ein neuer Schiffstyp — der sogenannte Selbstfahrer — ins Leben gerufen, der wie die Eildampfer zunächst nur im Stückgutverkehr eingesetzt wurde. Diese Selbstfahrer erhielten Antriebsleistungen, die sie befähigten, die unteren Stromgebiete mit höheren Geschwindigkeiten als ein Schleppzug zu befahren (etwa 15 km/h gegen Wasser). Auf den Kanalstrecken ist diese Leistung wegen der meist begrenzten Kanalgeschwindigkeit und des Überholungsverbotes schon nicht mehr voll ausnutzbar, während sie zur Überwindung von Stromhindernissen nicht ausreicht.

Dieser Schiffstyp bewährte sich jedoch sehr gut und wurde deshalb in immer größerer Anzahl gebaut, wobei vielfach vorhandene Kähne nachträglich motorisiert wurden. Da man bei der Motorisierung von Kähnen in den meisten Fällen das alte Kahnheck beibehielt und nur die Schraube durch einen zylindrischen Schirm abdeckte, um auch ein Fahren bei geringeren Tiefgängen zu ermöglichen (später wurden die Schirme nach vorn divergierend gebaut, um den Wasserzustrom zur Schraube zu verbessern), sind diese Fahrzeuge nicht so günstig wie die von vornherein als Selbstfahrer mit eingebautem Tunnel konstruierten Fahrzeuge.

Mit zunehmender Zahl wurden die Selbstfahrer später auch im Massengutverkehr eingesetzt und ihr Fahrgebiet immer mehr ausgeweitet. Hierdurch ergab sich die Notwendigkeit, die Antriebsleistungen zu erhöhen, um auch die oberen Stromgebiete mit ihren geringen Wassertiefen, höheren Stromgeschwindigkeiten und größeren Oberflächengefällen und Stromhindernissen mit eigener Kraft überwinden zu können.

Für Schleppzüge, die im Mittel etwa 12 km/h gegen Wasser zurücklegen, ist auf den unteren Stromgebieten ein Leistungsaufwand von etwa 0,2 PSe/Ladungstonne erforderlich. Zur Überwindung der kurzen Stromhindernisse auf dem Rhein (meist nur 1 Kahnlänge) können bei der dort üblichen Schleppmethode, bei der jeder Kahn seinen eigenen Strang hat, die Kähne durch Verlängerung der Schlepp-

trossen einzeln durch die Stromhindernisse befördert werden. Da sich der Schleppwiderstand innerhalb des Hindernisses bei der Überwindung der örtlich höheren Stromgeschwindigkeit und des sehr großen Gefälles etwa verdoppelt, beträgt der Leistungs-Mehraufwand z. B. bei einem 4-Kahn-Schleppzug etwa 25 %; im Mittel müssen ca. 0,25 bis 0,3 PSe/Ladungstonne aufgewendet werden. Ein Schleppzug kann also ein Stromhindernis ohne Leistungsreserve überwinden, wenn der Anhang um etwa 25 % vermindert wird oder aber ein Vorspannschlepper mit einer Antriebsleistung von ca. 250 bis 300 PSe verwendet wird. Zur Überwindung der ungünstigsten Durchfahrt auf der Donau, des Eisernen-Tor-Kanals, dessen ungünstige Stelle etwa 600 m lang ist (es liegt also für kurze Zeit der gesamte Schleppzug innerhalb der Stromschnelle), ist ein Leistungsaufwand von etwa 1,6 PSe/t erforderlich. Hierfür werden die sehr starken Kataraktenschlepper gebaut und außerdem auch eine Treidel-Lokomotive eingesetzt.

Für die mittleren Fahrgeschwindigkeiten der Selbstfahrer (ca. 15 km/h) ist auf den unteren Flußstrecken ein Leistungsaufwand von etwa 0,5 PSe/Ladungstonne erforderlich. Zur Überwindung des Binger Lochs und der Baselstrecke wird etwa 1,0 PSe/t und für die Kataraktenstrecke der Donau etwa 1,6 PSe/t erforderlich.

Die bei Selbstfahrern zur Überwindung der Stromhindernisse erforderliche Leistung kann aber auf dem größten Teil der Flußstrecken für Freifahrt nicht mehr wirtschaftlich voll ausgenutzt werden, und man kam gewissermaßen zwangsläufig auf den Gedanken, die überschüssige Leistung dazu zu verwenden, auf diesen Normalstrecken einen Anhang mitzunehmen, also zusätzlich zu schleppen. Diese Tendenz hat sich im Laufe der letzten Jahre immer weiter verstärkt, so daß die modernen Selbstfahrer im allgemeinen fast selbstverständlich zusätzlich Schleppanhang mitnehmen; ihre Leistungen wurden sogar wegen des Schleppens mehr erhöht, als zur Überwindung der Stromhindernisse notwendig wäre.

Es wurde eingangs schon darauf hingewiesen, daß die hydraulische Wirkung eines Antriebsmittels um so günstiger wird, je geringer die Flächenbelastung (PSe/m² Strahlfläche) gewählt werden kann. Bild 5 zeigt einen Vergleich zwischen Radschleppern, Tunnelschraubenschleppern und Düsenschraubenschleppern für eine mittlere Schleppgeschwindigkeit von 12 km/h, und zwar den spezifischen Trossenzug Z/WPS, aufgetragen über der Flächenbelastung WPS/m² Strahlfläche. Um die Sogvergrößerung der eingetunnelten Schrauben zu berücksichtigen, wurde bei den Propellern nur die Strahlfläche eingesetzt, die in Ruhelage eintaucht, beim Schaufelrad wurde die in Ruhe eintauchende projizierte Schaufelfläche gewählt. Dieses Diagramm entstand etwa 1947 durch systematische Auswertung von Modellversuchsergebnissen der HSVA, wobei jeweils die Optimalwerte zur Auftragung gelangten. Die Kurven stellen auch heute noch Optimalwerte dar.

Die schweren Radschlepper auf dem Rhein haben etwa eine Flächenbelastung von 100 WPS/m². Aus diesem Diagramm ist zu ersehen, daß der gleiche spezifische Trossenzug, also hydraulische Gleichwertigkeit, mit einem Tunnelschraubenschlepper dann erreicht werden kann, wenn die Flächenbelastung 175 WPS/m² beträgt, während bei Düsenschrauben noch eine Strahlflächenbelastung von 300 WPS/m² zulässig ist; oder, anders ausgedrückt, kann die Strahlfläche beim Tunnelschraubenschlepper auf 56 % und beim Düsenschraubenschlepper auf 26 % vermindert werden, um noch den gleichen spezifischen Trossenzug zu erreichen. Aus diesem Vergleich geht die große Überlegenheit von Düsenschrauben für das Schleppen eindeutig hervor. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, daß für die Schraubenfahrzeuge Drehzahlen gewählt werden können (ev. durch geeignete Untersetzungsgetriebe), die für den jeweiligen Propellerdurchmesser optimal sind.

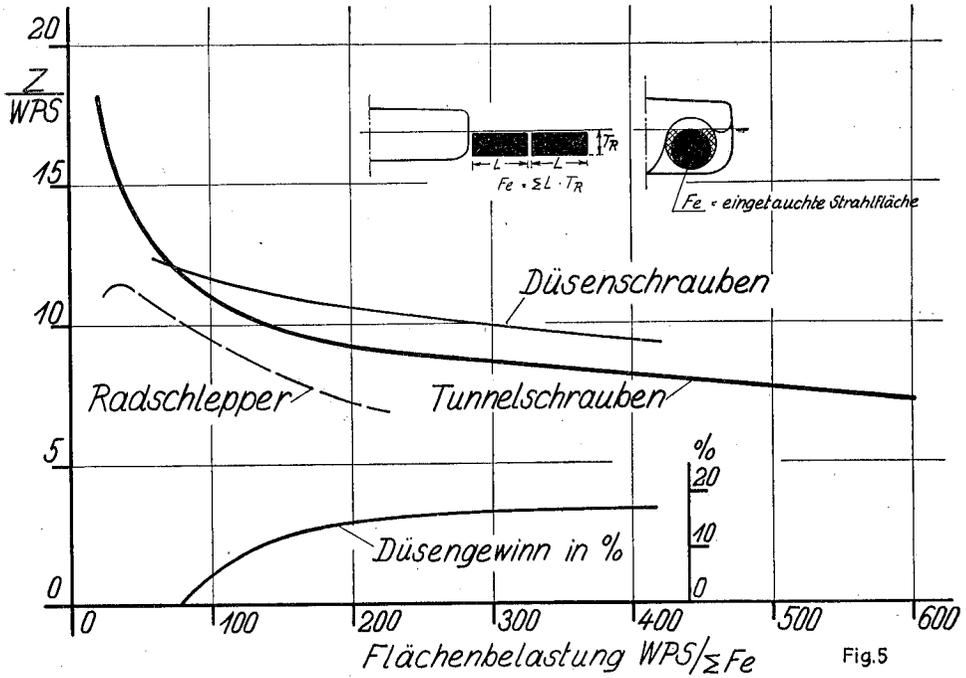


Bild 5 Maximale spezifische Trossenzüge von Flußschleppern bei einer Schleppgeschwindigkeit von 12 km/h.

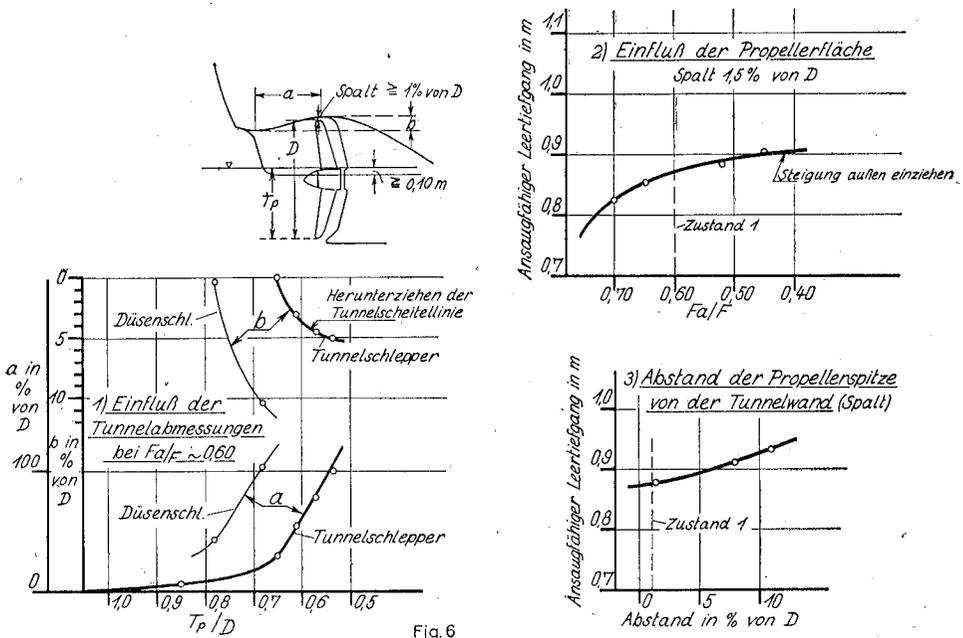


Bild 6 Konstruktionswerte für gutes Ansaugen von Propellern in Tunneln.

Bei stärkeren Schleppern müssen zur Unterbringung der erforderlichen Strahlflächen meist mehrere eingetunnelte Schrauben eingebaut werden, da der ausführbare Propellerdurchmesser durch die geringen Tiefgänge der Fußschlepper beschränkt ist. Das Maß der Propelleraustauchung in Ruhelage darf nicht übertrieben werden, weil sonst der Tunnel bzw. die Düse nicht mehr zuverlässig vollgesaugt werden können. Bild 6 zeigt (in Abhängigkeit vom Propellertiefgang) die möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Ansaugfähigkeit der Schrauben, wie Verlängerung des Tunnelüberstandes, Herunterziehen der Tunnelscheitellinie, Vergrößerung des Flächenverhältnisses (F_a/F) der Schrauben und Verminderung des Spaltes zwischen Propeller und Tunnel oder Düse. Diese Maßnahmen dürfen aber nicht übertrieben werden, da sonst die Wirkungsgradverbesserung durch den größeren Schraubendurchmesser durch Erhöhung des Schleppwiderstandes und des Schraubensogs nicht nur aufgehoben, sondern eventuell ins Gegenteil verkehrt wird, auch ist die Gefahr des Auftretens von Vibrationen bei zu geringem Spalt zwischen Tunnel und Propeller stärker.

Nach Erfahrungswerten aus Modell- und Großversuchen sollte bei Tunnel-schleppern der Propellertiefgang nicht kleiner als $0,6 D$ und bei Düsen-schleppern nicht geringer als $0,75 D$ sein, das Flächenverhältnis der Schrauben nicht über $0,6$ betragen und der Spalt zwischen Propellerflügelspitzen und Tunnel bzw. Düse nicht kleiner als $0,015 D$ gewählt werden.

Bei Selbstfahrern, die nur gelegentlich auf Leertiefgang fahren, kann der Propellertiefgang noch auf etwa $0,55 D$ bei Tunnelschrauben und auf $0,7 D$ bei Düsen-schrauben vermindert werden.

Der Propellerdurchmesser von Düsen-schrauben muß also stets etwas geringer gewählt werden als bei gleichen Fahrtverhältnissen für Tunnelschrauben; zusätzlich vermindert sich der Schraubendurchmesser bei Düsen-schiffen noch dadurch, daß die Unterkante Düse im allgemeinen nicht unter den Kiel hinausragen darf (Gefahr der Grundberührung). Im allgemeinen ist bei gleichwertigen Ansaug-Verhältnissen der Durchmesser von Düsen-schrauben etwa 150 mm kleiner als bei Tunnelschrauben, wodurch natürlich ein Teil der oben angegebenen Überlegenheit der Düsen verloren geht.

Auf die gegenseitige Beeinflussung der Kähne im Schleppverband wurde bereits im ersten Abschnitt hingewiesen. Darüber hinaus wird aber der erste dem Schlepper folgende Kahn noch vom Abstrom der Antriebsmittel beeinflusst, vor allem, wenn er im Kielwasser des Schleppers liegt. Wie Modellversuche von Gebers [8] gezeigt haben, ist dieser Einfluß bei Radschleppern wegen der geringeren Strahlbeschleunigung kleiner als bei Schraubenschleppern. Ähnliche Versuche, die in der HSVA mit Kanal- und Flußschleppern durchgeführt wurden, zeigten, wie dieser Einfluß mit zunehmender Schlepptrossenlänge zurückgeht. Neuere Versuche in der VBD mit schleppenden Selbstfahrern zeigten weiter, daß dieser Einfluß mit der Wassertiefe abnimmt, da die Strahlenergie um so früher vernichtet wird, je näher der Flußboden ist.

Aus all diesen Ergebnissen wurde Bild 7 zusammengestellt. Aufgetragen wurde hier die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit des am ersten Kahn vorbeiströmenden Wassers abhängig von der Schlepptrossenlänge für verschiedene Wassertiefen-Tiefgangsverhältnisse. Für die Praxis ergibt sich aus dieser Darstellung, daß die üblichen Schlepptrossenlängen von 120 m bis 150 m für den Unterlauf der Ströme mit ihren großen Wassertiefen unbedingt erforderlich sind. Dagegen kann auf dem Oberlauf, wo wegen der geringen Wasserbreiten und Krümmungsradien und der dadurch bedingten Unübersichtlichkeit lange Schleppzüge unerwünscht sind,

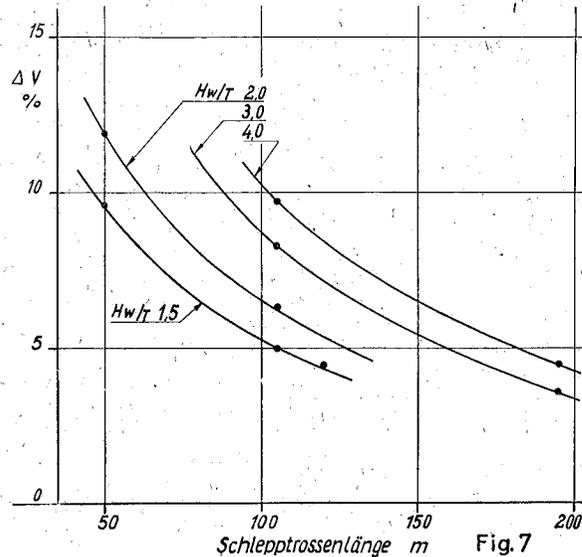


Bild 7 Erhöhung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit am ersten Schleppkahn durch den Propellerstrahl des schleppenden Fahrzeuges (Schleppgeschwindigkeit ca. 12,5 km/h).

die Trosse vom schleppenden Fahrzeug zum ersten Kahn unbedenklich kürzer gewählt werden. Hinzu kommt noch, daß in der Praxis die Kähne etwas seitlich versetzt dem Schleppfahrzeug folgen, dem Strahleinfluß also nicht so stark ausgesetzt sind wie beim Modellversuch, bei dem die Kähne in der Kiellinie des Schleppers liegen. Andererseits wird der Widerstand seitlich versetzt geschleppter Kähne wieder erhöht durch das dauernd gelegte Ruder und die Schräglage der Kähne zur Fahrtrichtung.

Bei den bisherigen Betrachtungen blieb ein letzter Einfluß außer Ansatz, der für die Flußschifffahrt von Bedeutung ist: der Einfluß des strömenden Wassers, also Stromgeschwindigkeit und Stromgefälle.

Modellversuche in strömendem Wasser wurden erstmalig 1934 in dem 3 m breiten Strömungsgerinne der alten HSVA-Gebäude unternommen, bei denen ein Selbstfahrer gegen einen und mit einem Strom von 7 km/h (Großausführung) und in stehendem Wasser, bei gleicher Fahrwassertiefe fahrend, untersucht wurde (Bild 8) [9]. Auch wurden Untersuchungen über die Durchfahrtverhältnisse bei engen Brücken angestellt, die ergaben, daß durch Regulierung des Oberflächengefälles (durch Veränderung der Form der Brückenpfeiler) mehr an Antriebsleistung erspart werden kann als durch Veränderung der Schiffsformen [10]. In den letzten Jahren wurde ein größeres Versuchsprogramm für einen Selbstfahrer vom Typ „Gustav Koenigs“ (Frei- und Schleppfahrt bei zwei Tiefgängen auf verschiedenen Wassertiefen und bei verschiedenen Stromgeschwindigkeiten) in dem etwa 10 m breiten Strömungskanal der VBD durchgeführt. Als Stromgeschwindigkeit wurde bei allen Versuchen die Höchstgeschwindigkeit im Stromstrich, also die Wassergeschwindigkeit angenommen, die etwa 20 % der Wassertiefe unterhalb der Wasseroberfläche in Kanalmitte auftrat.

Bei Fahrt gegen strömendes Wasser muß zunächst der Gefälleeinfluß überwunden werden, der sich dadurch ergibt, daß das zu Berg fahrende Schiff bildlich

gesprochen eine schiefe Ebene hinauffahren muß. Dieser Widerstand kann rechnerisch erfaßt werden; er ist gleich dem Schiffsgewicht, multipliziert mit dem Tangens des Neigungswinkels der Wasseroberfläche gegen die Horizontale. In Gebieten

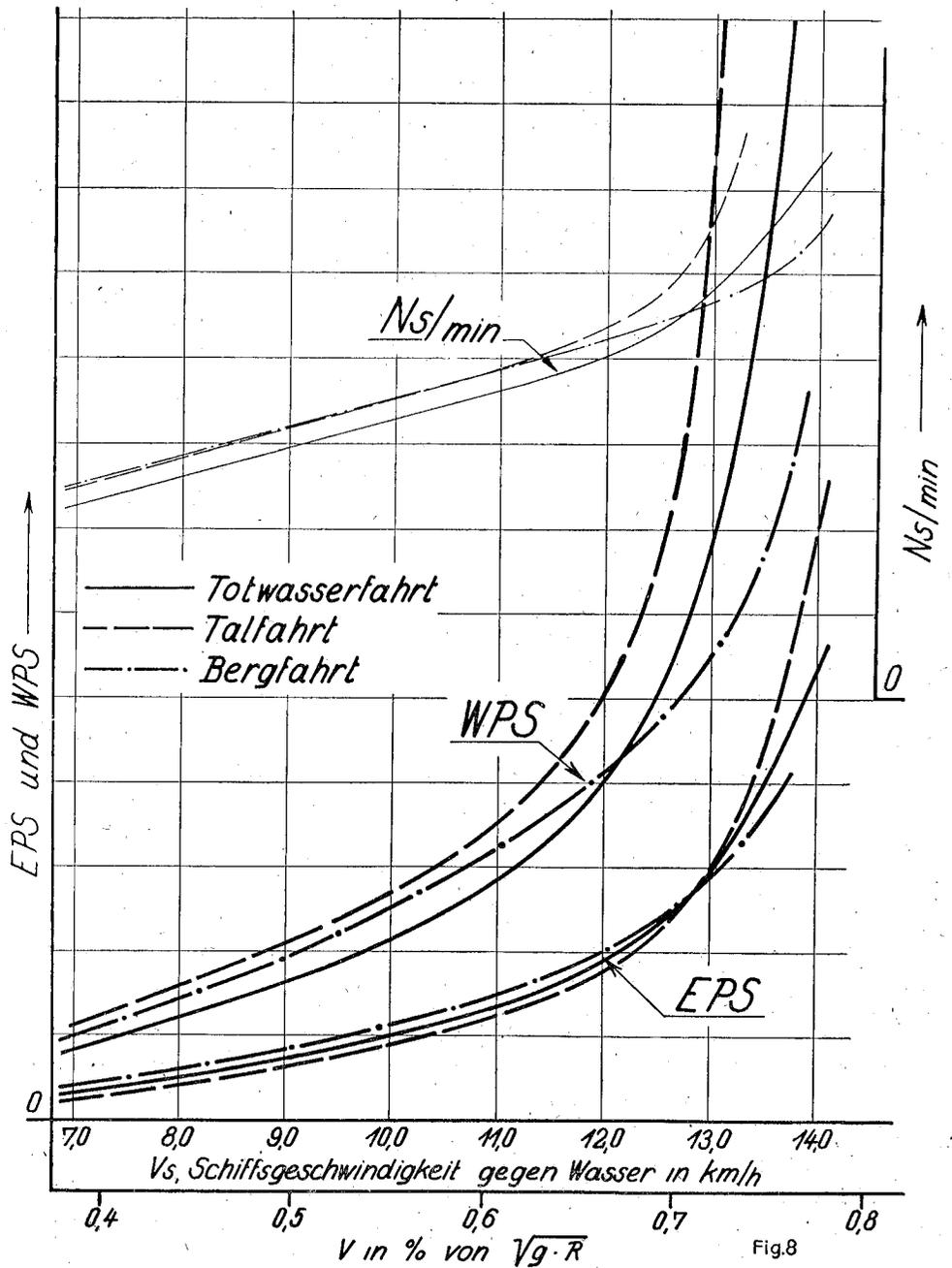


Bild 8 Einfluß der Stromgeschwindigkeit und des Oberflächengefälles auf den Leistungsbedarf eines Selbstfahrers.

mit hoher Stromgeschwindigkeit kann dieser Zusatzwiderstand mehr als 1/1000 des Gewichts betragen, also bei einem Schiff mit 1000 t Wasserverdrängung mehr als 1000 kg. Bei der Talfahrt wirkt der Gefälleeinfluß in gleicher Größe als Schubkraft, wodurch ein zu Tal treibendes Schiff eine größere Geschwindigkeit erreicht als der Strom.

Neben diesem statischen Einfluß ist noch ein dynamischer Einfluß wirksam, nämlich eine Veränderung der Strömung am Schiff durch die Einwirkung der Flußströmung. Diese Veränderung wird erst bei höheren Stromgeschwindigkeiten und geringen Wassertiefen und in verstärktem Maße bei größerer Schiffsgeschwindigkeit wirksam. In extremen Fällen, z. B. beim Durchfahren von Stromhindernissen, kann dieser Einfluß die Schiffsgeschwindigkeit bis zu etwa 0,75 km/h einschließlich der Überwindung des Gefälles erhöhen. Auf den normalen Stromstrecken dagegen kommt der dynamische Einfluß noch nicht zu Auswirkung, und für die Überwindung des Gefälles ist eine entsprechend größere Leistung nötig.

Die Strömungsversuche sind so ausgewertet worden, daß für jede gewünschte Schiffsgeschwindigkeit, Wassertiefe und Stromgeschwindigkeit der erforderliche Korrekturfaktor aus einem Diagramm abgegriffen werden kann, so daß, ausgehend von Modellversuchen in stehendem Wasser, die Geschwindigkeit ermittelt werden kann, die sich für freifahrende Selbstfahrer durch den Einfluß von Stromgeschwindigkeit und Oberlächengefälle in der Praxis ergeben würde.

Unter Verwendung aller in der vorliegenden Arbeit angegebenen Unterlagen und Korrekturen sind Vergleichsrechnungen zwischen Schlepper, freifahrenden und schleppenden Selbstfahrern unternommen worden, deren Ergebnisse im folgenden mitgeteilt werden.

Bild 9 zeigt eine solche Rechnung aus dem Jahre 1950 für einen Seitenradschlepper von 1350 PSi (entspr. 1200 PS_e) für die übliche Probefahrtstrecke auf dem Rhein zwischen Ruhrort und Köln bei 3 verschiedenen Wasserständen. Dabei wurden für zwei verschiedene Kahntypen (Rheinkahn und Kanalkahn) abhängig von der Anzahl der voll abgeladenen Kähne die Schleppgeschwindigkeit zu Berg gegenüber Land, die je PSi geschleppten Ladungstonnen und der zugehörige Transportgütegrad (tkm/PSi · h) aufgetragen. Da die Einnahmen eines Schleppers von den stündlich geleisteten tkm abhängig sind, gibt der Transportgütegrad nicht nur einen Bezugswert für die hydraulische Güte des Schleppers, sondern er läßt auch den wirtschaftlichsten Schleppzug und den wirtschaftlichsten Wasserstand der zu befahrenden Strecke erkennen.

Die Ergebnisse auf Bild 9 zeigen:

1. Der in der Schifffahrt für den Streckenabschnitt zwischen Ruhrort und Köln übliche Schleppanhang von etwa 4,1 t/PSi liegt für Mittelwasser nahezu am ermittelten Optimum. Die empirisch von der Praxis ermittelten Anhangstärken kommen also dem möglichen Bestwert sehr nahe.
2. Je höher der Wasserstand für ein bestimmtes Gebiet, um so kürzer muß der Schleppzug gewählt werden, weil der Widerstandsgewinn auf größerer Wassertiefe geringer ist als der Geschwindigkeitsverlust durch die höhere Stromgeschwindigkeit. (Das Gefälle wird nur so wenig erhöht, daß es auf die Fahrtresultate keinen merklichen Einfluß ausübt.)
3. Der Transportgütegrad steigt bei gleichwertigen Kahnformen mit der Tragfähigkeit der Schleppkähne.

4. Der höchste Transportgütegrad wird bei dem kleinsten untersuchten Wasserstand erreicht, woraus gefolgert werden kann, daß der für die Schifffahrt wirtschaftlichste Wasserstand derjenige ist, bei dem noch eben vollschiffig gefahren werden kann.

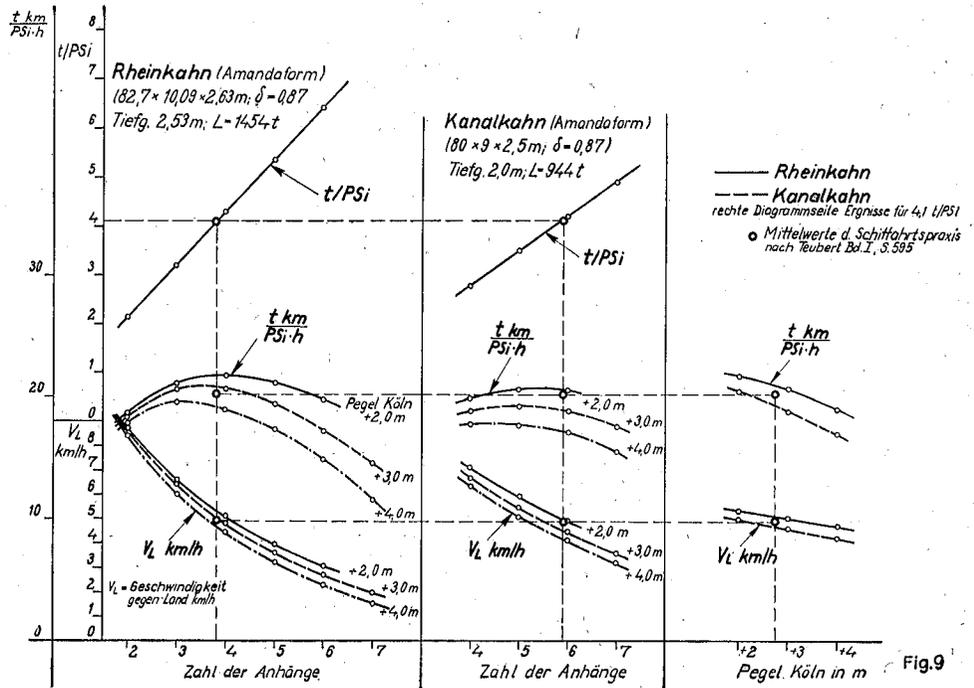


Bild 9 Bergfahrt auf der Rheinstrecke Duisburg—Köln mit einem Seitenradschlepper von 1350 PSi.
(Trossenlänge zwischen Schlepper und erstem Kahn ca. 120 m, Abstand zwischen den Kähnen ca. 80 m).

Der Vergleich zwischen einem Seitenradschlepper von 1350 PSi (1200 PSe) und einem gleichstarken modernen Zweischraubendüschlepper (Leistung 1200 PSe) ergibt bei Wahl eines Schleppzuges von 5660 t folgende Transportgütegrade:

- a) Streckenabschnitt Ruhrort—Köln, Wasserstand Pegel Köln (MW + 0,35 m)
 - Radschlepper 18,8 tkm/PSih, bzw. 21,2 km/PSeh
 - Düschlepper 22,0 km/PSeh
- b) Streckenabschnitt Ruhrort—Mannheim bei MW
 - Radschlepper 21,5 tkm/PSih, bzw. 24,2 km/PSeh
 - Düschlepper 25,2 km/PSeh

Für beide Reisestrecken ist also der Düschlepper dem Radschlepper bereits hydraulisch um etwa 4% überlegen, was, wie schon früher ausgeführt, durch den Düseneffekt bedingt ist. (Flächenbelastung bei dem Radschiff ca. 100 WPS/m² Fe, beim Düschiff ca. 300 WPS/m² Fe, Fe = eingetauchte Strahlfläche; vgl. auch Bild 5).

Da sich die Neubauwerte beider Fahrzeuge etwa wie 1,7 (Radschiff) zu 1 (Düsen-schiff) verhalten und auch die Besatzungskosten beim Radschiff höher sind, ist das Düsen-schiff dem Radschiff wirtschaftlich beachtlich überlegen. Als Vorteil für das Radschiff verbleibt nur die wesentlich stärkere Überlastbarkeit der Dampfmaschine, die diesen Schleppertyp für das Durchfahren von Stromengen geeigneter macht.

Aus den bereits erwähnten Modellversuchen der VBD für einen Düsen-selbst-fahrer vom Typ „Gustav Koenigs“ (Frei- und Schleppfahrt) sind für den Strecken-abschnitt Ruhrort—Mannheim die Werte für Leistung/Ladungstonne, der Trans- portgütegrad und, als angenähertes Maß für die Wirtschaftlichkeit, die Einnahmen (aus Eigenfracht und Schlepplohn) errechnet worden. Als Frachtrate wurde hierbei 7,75 DM/Eigenladungstonne und als Schlepplohn 3,50 DM/geschleppte Tonne ein- gesetzt. Um den Einfluß durch die höhere Motorleistung nach Möglichkeit auszu- gleichen, wurden von den Gesamteinnahmen (Frachtrate + Schlepplohn) die Brennstoffkosten (0,055 DM/PSe · h für Brennstoff und Schmierölverbrauch) abge- setzt („Netto“-Einnahmen) und außerdem berücksichtigt, daß die Tragfähigkeit entsprechend dem höheren Maschinengewicht und dem größeren Brennstoffver- brauch mit steigender Antriebsleistung zurückgeht.

Einfluß der Leistung auf die Wirtschaftlichkeit bei Frei- und Schleppfahrt für einen Selbstfahrer vom Typ „Gustav Koenigs“

I Streckenabschnitt Ruhrort—Mannheim bei MW (Mittelwasser)

Tiefgang von Selbstfahrer und Kähnen 2,0 m

- a) Freifahrt,
- b) Schleppfahrt mit 1 Dortmund—Ems—Kanal-Kahn im Anhang,
- c) Schleppfahrt mit 2 Dortmund—Ems—Kanal-Kähnen im Anhang

Fahrt- zu- stand	Leistung 300 PSe			Leistung 500 PSe			Leistung 700 PSe		
	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h
a)	0,438	18,5	104,00	0,742	13,3	116,50	1,050	10,6	122,00
b)	0,208	21,8	85,50	0,349	19,0	118,00	0,500	16,0	134,50
c)	0,136	20,9	68,50	0,228	21,9	118,00	0,330	19,6	146,00

II. Streckenabschnitt Ruhrort—Mannheim bei NW (Niedrigwasser)

Tiefgang von Selbstfahrer und Kähnen 1,6 m

a)	0,640	15,8	85,50	1,080	10,6	87,00	1,530	7,8	80,50
b)	0,290	23,7	92,00	0,490	18,2	111,00	0,690	14,5	115,50
c)	0,190	27,7	95,00	0,320	22,6	122,00	0,450	18,9	137,00

Der für MW angestellte Vergleich zeigt:

1. Bei Freifahrt bringt die Leistungssteigerung von 300 PSe auf 700 PSe noch eine klare Zunahme der Nettoeinnahmen (Gesamteinnahmen — Brennstoffkosten).
2. Bei 300 PSe Antriebsleistung ist die Freifahrt günstiger als die Schleppfahrt,

bei 500 PSe Antriebsleistung sind Frei- und Schleppfahrt nahezu gleichwertig,
 bei 700 PSe Antriebsleistung ist das Schleppen eindeutig günstiger.

Bei Niedrigwasser muß wegen der Tiefgangsbeschränkung mit verminderter Ladung gefahren werden, und die Ergebnisse verändern sich grundlegend:

1. Für die Freifahrt sind Leistungen über 500 PSe unwirtschaftlich.
2. Das Schleppen ist jetzt schon bei 300 PSe etwas günstiger, während es bei 500 PSe und 700 PSe eindeutig besser ist.
3. Bei Freifahrt werden bei NW wesentlich geringere Nettoeinnahmen erzielt als bei Fahrt auf MW mit voller Abladung; die prozentuale Unterlegenheit nimmt mit steigender Leistung zu.
4. Bei Schleppfahrt mit 300 PSe sind die Nettoeinnahmen bei Fahrt auf NW etwas größer als bei Fahrt auf MW,
 bei Schleppfahrt mit 500 PSe sind die Nettoeinnahmen bei beiden Wasserständen fast gleichwertig,
 bei Schleppfahrt mit 700 PSe werden auf MW etwas (ca. 6 bis 15%) geringere Nettoeinnahmen erzielt als bei MW, wobei die Unterlegenheit beim 2-Kahn-Schleppzug am geringsten ist.

Unberücksichtigt blieb bei diesen Vergleichen, daß die Liegezeiten für das Löschen und Laden des Selbstfahrers prozentual zur Fahrzeit beim freifahrenden Schiff höher sind als beim schleppenden Schiff. Außerdem nehmen auch die Gesteigungskosten und die laufenden Unkosten mit der Größe der Antriebsleistung zu. Die in der Tabelle angegebenen Nettoeinnahmen stellen also keine absoluten Vergleichswerte für die Wirtschaftlichkeit dar.

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich zwischen drei Selbstfahrern, und zwar werden verglichen ein Einschrauber vom Typ „Gustav Koenigs“ mit einer Nennleistung von 500 PSe mit dem größten Selbstfahrertyp „Johann Welker“ einmal als Einschrauber mit einer Nennleistung von 700 PSe und einmal als Zweischauber mit einer Nennleistung von 2×500 PSe; alle 3 Schiffe sind mit Kort-Düsen ausgerüstet.

Vergleich verschiedener Selbstfahrer bei Freifahrt und Schleppfahrt auf dem Streckenabschnitt Ruhrort—Mannheim bei MW

- a) „Gustav Koenigs“ — Einschrauber mit Kortdüse, Leistung 500 PSe,
 Anhang Dortmund-Ems-Kanalkähne;
- b) „Johann Welker“ — Einschrauber mit Kortdüse, Leistung 700 PSe,
 Anhang Rhein-Herne-Kanalkähne;
- c) „Johann Welker“ — Zweischauber mit Kortdüse, Leistung 2 × 500 PSe,
 Anhang Rhein-Herne-Kanalkähne.

	Freifahrt			Schleppf. mit 1 Kahn			Schleppf. mit 2 Kähen		
	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h	PSe/t	t km PSeh	Netto- einn. DM/h
a)	0,742	13,30	116,50	0,349	19,00	118,00	0,228	21,90	119
b)	0,750	15,05	191,50 (151,5)	0,354	21,85	198,00 (153,3)	0,232	24,35	191 (155)
c)	1,120	11,72	173,00 (175,0)	0,515	18,15	222,00 (177,0)	0,335	22,60	247 (179)

Aus dem Vergleich der Netto-Einnahmen ergibt sich:

1. Sowohl bei Freifahrt als auch bei Schleppfahrt sind die größeren Selbstfahrer dem kleineren überlegen.
2. Bei Freifahrt ist von den großen Selbstfahrern der Einschrauber am günstigsten.
3. Bei Schleppfahrt erzielt der Zweischrauber „Johann Welker“ die höchsten Einnahmen.

Bei diesem Vergleich ist nicht berücksichtigt, daß die Baukosten und damit die Tageskosten der Fahrzeuge mit der Schiffsgröße und der Stärke und Antriebsleistung ansteigen. Setzt man voraus, daß die Tageskosten etwa proportional mit den Baukosten ansteigen, sich also wie 1 („Gustav Koenigs“) zu 1,3 (Einschrauber „Johann Welker“) zu 1,5 (Zweischrauber „Johann Welker“) verhalten, so müßten zur Erreichung gleichen Nutzens die stündlichen Nettoeinnahmen sich ebenfalls wie 1:1,3:1,5 verhalten (vgl. eingeklammerte Zahlen der Tabelle). Unter dieser Voraussetzung ergibt sich dann folgender Vergleich:

1. Bei Freifahrt sind der Einschrauber „Gustav Koenigs“ und der Zweischrauber „Johann Welker“ nahezu gleichwertig, während der Einschrauber „Johann Welker“ ca. 30 % wirtschaftlicher ist.
2. Beim Schleppen ist der Zweischrauber „Johann Welker“ um 25 % bis 38 % und der Einschrauber „Johann Welker“ um 29 % bis 23 % wirtschaftlicher als „Gustav Koenigs“, wobei die zweitgenannten Prozentzahlen für den Zweikahn-Schleppzug gültig sind.
3. Für Freifahrt und Schleppfahrt mit einem Kahn ist also der Einschrauber „Johann Welker“ der bisher wirtschaftlichste Selbstfahrer.
4. Bei starken Schleppanhängen ist der Zweischrauber vom Typ „Johann Welker“ überlegen.

Daß diese an Hand von Modellversuchsergebnissen und einigen Angaben aus der Schiffspraxis entwickelten Erkenntnisse durch die Tatsachen bestätigt werden, zeigt die ständig wachsende Anzahl der Selbstfahrer vom Typ „Johann Welker“.

Unter den gleichen Annahmen wie bei den vorhergehenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Selbstfahrer soll jetzt ein Vergleich zwischen dem früher behandelten Zweischrauben-Düsen Schlepper von 1200 PSe mit dem besten Selbstfahrertyp „Johann Welker“ mit 700 PSe angestellt werden.

Bei etwa gleichwertigem Schleppanhang (0,21 PSe/t beim Schlepper und 0,23 PSe/t beim Selbstfahrer) erzielt der Schlepper Nettoeinnahmen von 230 DM/Fahrtstunde gegenüber 232 DM/h beim Selbstfahrer. Da sich die Baukosten etwa wie 1,3 für den Schlepper zu 1 beim Selbstfahrer verhalten, müßte der Schlepper 1,3mal 232 DM/h = 300 DM/h einbringen, um mit dem Selbstfahrer gleichwertig zu sein. Dieser Vergleich ist aber für den Schlepper etwas zu ungünstig angestellt, weil bei ihm die Liegezeiten für Laden und Löschen wegfällen. Er kann also im Vergleich zum Selbstfahrer höhere Reisezeiten erreichen, wodurch die Wirtschaftlichkeit entsprechend zunimmt. Je kürzer die Reisedrecken sind, um so günstiger wird der Vergleich für den Schlepper, da die Liegezeiten je Reise gleich bleiben. Andererseits wird der Selbstfahrer um so günstiger, je längere Reisen vorgesehen sind. Dieses Ergebnis entspricht durchaus den Erfahrungen der Binnenschiffspraxis.

Abschließend soll noch ein Vergleich der in Amerika üblichen Schubschleppmethode mit dem auf dem Rhein üblichen Schleppen angestellt werden. Wie schon im ersten Abschnitt dieser Arbeit mitgeteilt, ist der Gesamtwiderstand eng hinter-

einandergesperrter Fahrzeuge geringer als die Summe der Einzelwiderstände, wobei der Widerstandsgewinn mit der Anzahl der Einzelfahrzeuge zunimmt. Außerdem vermindert sich der Widerstand des Schleppers hinter dem Schleppzug erheblich, weil er im Nachstrom der von ihm gestoßenen Fahrzeuge liegt.

Andererseits ist der Schleppgütegrad bei Schubschleppern ungünstiger als bei Zugschleppern, und zwar aus zwei Gründen: Erstens liegt, wie schon erwähnt, der Schubschlepper im Nachstromfeld der gestoßenen Einheit, wodurch die Propeller bei einem ungünstigeren Fortschrittsgrad arbeiten; ihr Propellerwirkungsgrad ist kleiner. Zweitens müssen bei Schubschleppern wegen der größeren Anforderungen an ihr Rückwärts-Manövriervermögen die Schraubentunnel hinter den Propellern bis etwas unter die Schwimmlinie heruntermgezogen und außerdem zusätzliche Rückwärtsrudder eingebaut werden; durch diese Maßnahmen geht der Schleppgütegrad weiter zurück.

Nach Modellversuchen mit 2 verschieden langen Schubschleppzügen vor einem Zweischauben-Düsen-schubschlepper von 2×500 PSe ergeben sich für den Streckenabschnitt Ruhrort—Mannheim bei MW folgende Werte:

a) Schubschlepper mit 2mal 2 Einheiten:

Gesamt-Schleppzuglänge	PSe/t	$\frac{t}{\text{km}}$ PSeh	Nettoeinnahmen DM/h
ca. 135 m	0,43	16,3	104,00

b) Schubschlepper mit 3mal 2 Einheiten:

ca. 185 m	0,29	19,6	137,00
-----------	------	------	--------

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, daß die Schubschleppmethode sowohl hydraulisch als auch wirtschaftlich mit der Gesamtlänge des Schleppzuges zunimmt. Der Transportgütegrad beträgt $19,6 \text{ t km/PSeh}$ bei dem günstigsten angegebenen Schubschleppzug, während mit einem Normalschleppzug aus sechs 80 m langen Kähnen hinter einem 1200 PSe-Düsen-schlepper ein Gütegrad von 25,2 erreicht wird. Dieser Schubschleppzug ist also einem auf dem Rhein üblichen Schleppzug aus 6 großen Kähnen um ca. 20 % unterlegen.

Nun ist aber aus einem umfangreichen Vergleichsprogramm mit gestoßenen und geschleppten Fahrzeugen bekannt, daß bei Zugrundelegung gleich großer Transportfahrzeuge (Länge und Tragfähigkeit) das Stoßen hydraulisch bis zu 50 % günstiger sein kann als das Schleppen. Da außerdem die beim Stoßen üblichen Transportfahrzeuge einfacher gebaut und deshalb billiger sind als die bei uns üblichen Kähne gleicher Tragfähigkeit, und man noch dazu mit weniger Personal auskommt, wäre das Stoßen schon dann günstiger, wenn der Schubschleppzug mit dem üblichen Zugschleppzug hydraulisch gleichwertig wäre. Das wäre aber auf dem Rhein etwa dann der Fall, wenn die Länge der einzelnen gestoßenen Einheiten ungefähr 60 m betragen würde. Ein Stoßschleppzug aus 6 dieser Einheiten hätte dann zusammen mit dem Schubschlepper eine Länge von

$$3 \text{ Fahrzeugpaaren von } 60 \text{ m} + \text{Schubschlepper von } 40 \text{ m} = 220 \text{ m.}$$

Bei diesem Vergleich sind für das Stoßen Leichter mit parabolisch hochgezogenen Enden zugrundegelegt worden. Wählt man dagegen Schleppzüge, bei denen nur das Bug- und Heckstück parabolisch aufgedrückt sind, die aber sonst aus kastenförmigen Einheiten bestehen (integrated towboat), so daß die Übergangswiderstände zwischen den Leichtern vermieden werden, dann kann die Schubmethode noch etwas günstiger sein.

Ob sich die Schubmethode für europäische Verhältnisse einführen läßt, hängt im wesentlichen davon ab, ob Schubschleppzüge der erforderlichen Längen bei der sehr großen Verkehrsdichte, z. B. auf dem Rhein, noch eine ausreichende Manövrierfähigkeit besitzen.

Die Manövrierfähigkeit könnte durch einen kombinierten Bug- und Heckantrieb beachtlich verbessert werden (Westphal-Floß). Der Nachteil dieser Antriebsart besteht neben den höheren Baukosten darin, daß er in seinen Propulsionseigenschaften ungünstiger ist als ein reiner Heckantrieb. Immerhin haben die mit dieser Antriebsart durchgeführten Modellversuche und die mit der Großausführung gemachten Erfahrungen für ein Floß von 120 m Länge und einem L/B von ca. 23 gezeigt, daß eine vorzügliche Manövrierfähigkeit auch auf Kanalstrecken erreicht wurde. Im Modell war sogar eine Konstruktion geprüft worden, die den Kanalschleppzug hydraulisch um fast 20 % übertraf. Da diese Konstruktion jedoch schlechter manövrierte als die Ausführungsform und man gerade in bezug auf Manövrierfähigkeit absolut sicher gehen wollte, wurden für die Erstausführung die ungünstigeren hydraulischen Eigenschaften in Kauf genommen.

Aus den angestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen folgt als grundsätzliche Erkenntnis für den Wasserbau, daß für die Durchführung einer wirtschaftlichen Binnenschiffahrt die Wasserstraßen weitgehend für die größten Binnenschiffstypen ausgebaut werden müßten, wobei ein möglichst unveränderter Wasserstand für die einzelnen Fahrgebiete anzustreben ist, da nicht nur die niedrigen, sondern auch zu hohe Wasserstände ungünstig sind. Das Optimum liegt etwa bei einem Wasserstand, der gerade eben ausreicht, um eine volle Abladung der Fahrzeuge für die gesamte Fahrstrecke zu gewährleisten. Diese Idealforderung wird sich zwar nie in vollem Umfange befriedigen lassen, man sieht aber, daß der in den letzten Jahrzehnten auch mit Rücksicht auf andere wasserbauliche Gesichtspunkte beschrittene Weg für Flußregulierungen, wie Anlage von Staustufen und künstlichen Stauseen, durchaus auch im Interesse der Binnenschiffahrt liegt.

Steuerorgane

Bei den kleineren Kähnen waren Fahnenruder üblich, die mit einem Drehzapfen am Deck gelagert waren und mit einer Ruderpinne betätigt wurden (Hackebeilruder) (vgl. auch Bild 1, Ruderanordnung für „Berta“ und „Olga“). Mit zunehmender Kahngröße mußten die Ruder wegen der Tiefgangsbeschränkung immer länger ausgeführt werden, so daß die zum Legen der Ruder erforderlichen Kräfte so groß wurden, daß sie nicht mehr direkt mit einer Ruderpinne beherrscht werden konnten. Deshalb wurden die Ruderkräfte mit einer Untersezung auf ein Steuerrad übertragen. Um diese Untersezung in vernünftigen Grenzen halten zu können, wurden die Ruder balanciert und später, bei weiter anwachsenden Schiffgrößen und Geschwindigkeiten von Kähnen und Motorschiffen auf 2, 3 und mehr Ruderflächen aufgeteilt. Für die Balancierung der Ruder hat sich als günstigstes Verhältnis eine Balancierung von etwa 20 % der Fläche erwiesen. Bei höheren Balancierungen ergibt sich der Nachteil, daß das gelegte Ruder nicht selbsttätig in die Nulllage zurückläuft, also vom Rudergänger zurückgedreht werden muß. Gerade bei Einfahrten in Schleusen haben sich die Mehrflächenruder bei Schraubenschiffen als sehr günstig erwiesen, weil bei stillstehender Schraube das Mittelruder wirkungslos wird und nur noch die seitlichen, in gesunder Strömung liegenden Ruder, wirken.

In neuerer Zeit sind auch verschiedene sogenannte Strahlruder entwickelt worden. Hierzu gehören die Kort-Drehdüse und das „Pleuger-Aktiv-Ruder“. Die

extremsten Lösungen stellen die Kort-Steuerdüse und der Voith-Schneider-Propeller dar, bei denen der Propellerstrahl in jede beliebige Richtung gelenkt und zum Steuern verwendet werden kann.

Für die Binnenschifffahrt kommt hier als beste Lösung der VSP in Frage, in zweiter Linie (wegen der geringeren Propellerstrahlfläche) die Kort-Steuer- oder Drehdüse.

Die von einem normalen Ruder ausgeübten Steuerkräfte und die zum Legen des Ruders erforderlichen Ruderdrehmomente steigen mit zunehmendem Ruderwinkel und daneben noch mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit an. Bei völligen Hinterschiffen, die einen großen Nachstrom haben, ist daher die Steuerkraft kleiner als bei schärferen Hinterschiffen. Am größten sind diese Kräfte bei selbstangetriebenen Fahrzeugen, bei denen das Ruder zum überwiegenden Teil im austretenden Propellerstrahl liegt.

Bei Fahrt auf beschränkter Wassertiefe wird die Ruderkraft außerdem durch die Stauwelle beeinflusst. Die Geschwindigkeit der Stauwelle beträgt bei Flußfahrt, wo mit praktisch unbeschränkter Wasserbreite gerechnet werden kann, $v_{kr} = \sqrt{g \cdot H}$, worin $g =$ Erdbeschleunigung in m/sec^2 und $H =$ Wassertiefe in m . (Bei Kanälen tritt neben der Wassertiefenbeschränkung auch die zusätzliche Breitenbeschränkung auf, und statt der Wassertiefe muß bei der Errechnung der Stauwellengeschwindigkeit der sogenannte hydraulische Radius eingesetzt werden, wodurch die Stauwellengeschwindigkeit entsprechend kleiner wird.)

Bei einem selbstangetriebenen Fahrzeug, bei dem das Ruder hauptsächlich durch den Propellerstrahl beaufschlagt wird, kann sich dieser Stauwelleneinfluß zwar nicht so stark auswirken, bei einem Schleppkahn dagegen kann er dazu führen, daß die Steuerfähigkeit zunächst stark nachläßt, während bei noch höheren Geschwindigkeiten das Fahrzeug dem Ruder gar nicht mehr gehorcht, das Schiff also nicht mehr zu steuern ist.

Wie Modellversuche der VBD gezeigt haben, kann der Beginn dieses physikalisch bedingten Einflusses durch Wahl eines Hitzler-Ruders (Dreiflächen-Ruder) etwas hinausgezögert werden; völlig ausschalten läßt er sich durch keine der üblichen Ruderkonstruktionen (Bild 10). Die einzige Möglichkeit hierzu würde ein Strahlruder bieten, doch müßte die für den Strahlantrieb (Propeller oder Voith-Schneider-Propeller) erforderliche Motorleistung so stark bemessen werden, daß der Kahn praktisch zum Selbstfahrer würde.

Die Wirksamkeit des Hitzler-Ruders in dieser Beziehung ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß die beiden seitlich angeordneten Ruder außerhalb der Nachstromschleppe des Kahnies liegen. Sie werden also mit höherer Geschwindigkeit angeströmt, wodurch die Steuerkräfte erhöht werden.

Der größte Vorteil dieser Ruder liegt aber darin, daß die drei kurzen, gut ausbalancierten Ruder wesentlich geringere Drehmomente benötigen, der Steuermann also in der Lage ist, mit kleinstem Kraftaufwand schnelle und deshalb besonders wirksame Rudermanöver auszuführen, was mit einem normalen Kahnruder wegen des hier erforderlichen großen Kraftaufwandes oft nur unzureichend möglich ist.

Durch den Einfluß der Stauwelle ist der Schleppschifffahrt eine Geschwindigkeitsgrenze gesetzt, die mit Rücksicht auf ausreichende Steuerfähigkeit der Schleppkähne nicht überschritten werden kann. Nimmt man hierfür

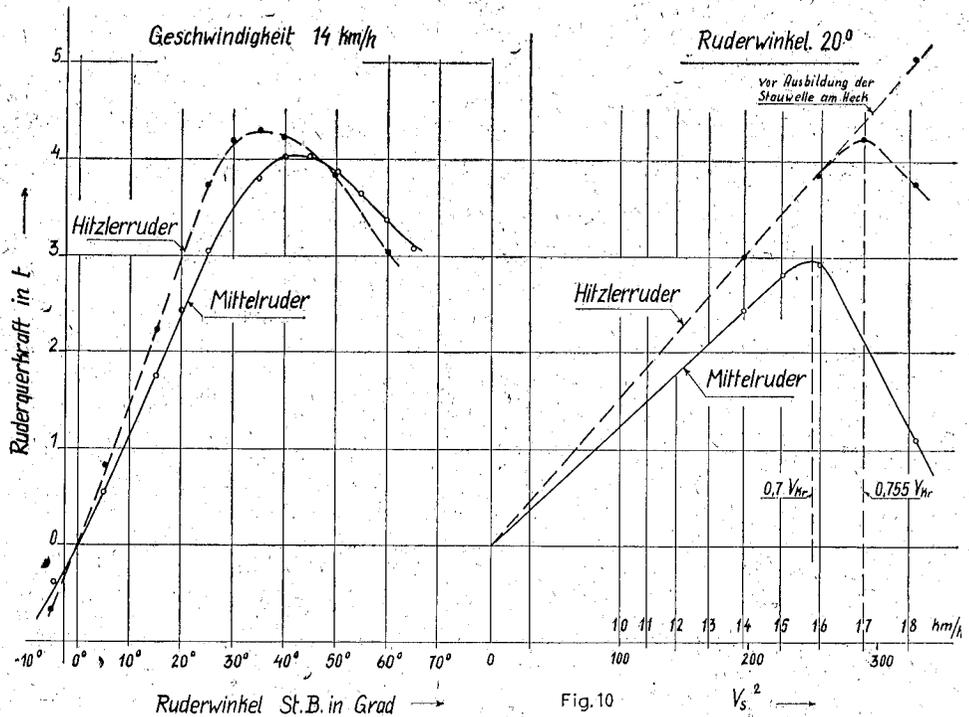


Bild 10 Ruderquerkraftmessungen an einem Schleppkahn (Wassertiefe 4,0 m; Tiefgang 1,75 m; $\delta = 0,835$).

als höchstzulässigen Grenzwert etwa 70% der Stauwellengeschwindigkeit an, so ergeben sich für die Flußfahrt die folgenden, von der Fahrwassertiefe abhängigen Geschwindigkeiten:

Fahrwassertiefe	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0
Grenzgeschwindigkeit km/h	17,7	15,8	13,7	12,5	11,1

Hieraus folgt, daß es nicht ratsam ist, bei Kähnen die Schleppgeschwindigkeit von 13 km/h zu überschreiten, da schon bei dieser Geschwindigkeit bei kurzfristigem Überfahren von seichten Stellen mit Wassertiefen unter 2,5 m die Gefahr besteht, daß der Kahn seinem Ruder nicht mehr gehorcht.

Zur Untersuchung der näheren Zusammenhänge zwischen Schiff, Ruder und beschränktem Fahrwasser ist in der VBD eine umfangreiche Untersuchung begonnen worden, die jedoch zur Zeit noch nicht abgeschlossen ist. Diese Untersuchung wird alle in der Binnenschifffahrt üblichen Ruderkonstruktionen erfassen.