

Beiträge zur Kenntnis des
Schleusenbetriebs
unter besonderer Berücksichtigung
der Verhältnisse am Rhein-
Herne-Kanal

Dissertation
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs.
Der Technischen Hochschule zu Berlin
vorgelegt am 25. Juni 1924

VON

Georg Mahr
Regierungsbaumeister
aus Düsseldorf,

genehmigt am 7. März 1925

Referent: Geh. Baurat Professor de Thierry
Korreferent: Professor Dr.-Ing Ludin

Die Arbeit erscheint außerdem als selbständiges Buch
im Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-27814-7 ISBN 978-3-662-29314-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-29314-0

Lebenslauf des Verfassers.

Georg Friedrich Wilhelm Mahr ist am 27. August 1896 zu Düsseldorf geboren und besuchte dort von Ostern 1903 ab Vorschule und Realgymnasium. Bei Kriegsausbruch legte er als Oberprimaner die Notreifepfung ab, konnte aber wegen Krankheit nicht gleich Soldat werden und studierte zunächst zwei Semester lang Baufach an der Technischen Hochschule zu Berlin. Von Juli 1915 ab war er im Heeresdienst und wurde bei Kriegsende als Leutnant der Reserve entlassen. Vom Januar 1919 an studierte Mahr weiter in Berlin, bestand im Oktober 1919 die Diplomvorprüfung und im Juli 1921 die Hauptprüfung und widmete sich dann der Ausbildung für den Staatsbaudienst. In diese Zeit seiner Tätigkeit bei der Kanalbaudirektion Essen fällt das Entstehen der vorliegenden Arbeit. Im November 1923 bestand Mahr seine Prüfung als Regierungsbaumeister und ist jetzt beim Ruhrverband (Verband zur Reinhaltung der Ruhr) in Essen tätig.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Entstehen der Arbeit	1
II. Geschichtliche Entwicklung des Schleusenbetriebs	2
a) Betrieb vor Aufkommen der Kammerschleuse (Schiffsdurchlässe und Stauschleusen)	2
b) Betriebsverhältnisse der älteren Kammerschleusen	5
c) Schleusenbetrieb seit Mitte des vorigen Jahrhunderts	8
III. Beobachtungen an einem modernen Schleusenbetrieb und Folgerungen daraus	14
a) Plan für die Messungen	15
b) Ein- und Ausfahrt mit Schleppwagen und Dampfer	22
c) Der „äußere Verlust“	24
d) Ein- und Ausfahrt mit Spill	27
e) Das Bewegen der Tore	28
f) Das Füllen und Leeren der Schleuse.	
1. Beobachtungen im wirklichen Betrieb	28
2. Theoretische Grundlagen und neue Vorschläge	29
3. Die Steuerung der Schützenwinde	34
4. Berechnung der Füll- und Leerzeit	35
α) beim bisherigen Zustand	35
β) beim Vorschlag für das Unterhaupt	38
γ) beim Vorschlag für das Oberhaupt	43
5. Die mittlere Hubgeschwindigkeit einer Schleuse	46
g) Gesamtdauer einer Schleusung	49
IV. Zusammenfassung	51
Anhang I. Über Schleusenfüllung bei gleichmäßig wachsendem Umlaufquerschnitt	53
II. Bestimmung der Durchflußbeiwerte μ für die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals	55
Tabelle 1. Aufnahmen der Schleusungen zu Berg	18
„ 2. Aufnahmen der Schleusungen zu Tal	20
„ 3. Berechnung der Durchflußbeiwerte μ	58

I. Entstehen der Arbeit.

Das Bestreben aller technischen Betriebe ist von jeher unter dem Zwang des Wettbewerbs darauf gerichtet gewesen, wirtschaftlich zu arbeiten. Wie kann man einen Arbeitsvorgang vereinfachen und dadurch Zeit und Kraft sparen, das ist immer wieder die Hauptfrage. Solche Verbesserungen sind bei einem jungen Betrieb am leichtesten und bedeutendsten, mit fortschreitender Entwicklung nimmt naturgemäß ihr äußerer Umfang ab. Trotzdem sind aber dann, wenn ein Betrieb im ganzen bereits weit vervollkommenet ist, auch kleine Ersparnisse recht wertvoll und durchaus lohnend, da sie in dem Zustand der Entwicklung meist schon genügen, um ein Übergewicht über andere Unternehmen zu bekommen.

Dieselben Forderungen nach restloser Ausnutzung des Betriebs gelten wie für die wertschaffenden und -vermittelnden freien Unternehmungen auch für die Verkehrsanstalten, die Eisenbahnen und Wasserstraßen, obwohl diese bei uns eine Monopolstellung genießen. Gerade in den Jahren nach dem Kriege konnte man immer wieder die Beobachtung machen, daß es selbst hier durchaus verfehlt ist, vermehrte Ausgaben im inneren Betrieb einfach nur durch einen höheren Preis für die Leistungen, höhere Tarife, wieder einbringen zu wollen. Geringere Umsätze und ein allgemeiner Rückgang der volkswirtschaftlichen Produktion waren die Folge. Diese Erfahrungen drängen also auch hier zu wirtschaftlicher Betriebsführung.

Bei den Wasserstraßen ist dabei noch etwas anderes zu beachten. Sie sollen im Gegensatz zu den Eisenbahnen keinen Reingewinn abwerfen (Art. 99 der Reichsverfassung, dessen Inhalt übrigens zum großen Teil aus früheren Gesetzen übernommen worden ist). Zu größeren Neubauten wird daher im allgemeinen das Reich zunächst das Geld vorschießen müssen. Daran ist aber bei der jetzigen Lage des Reiches auf lange Zeit hinaus nur in Aus-

nahmefällen zu denken. Zunächst wird vielmehr mit allen Mitteln erstrebt werden müssen, die vorhandenen Anlagen so auszunutzen, daß sie den Verkehr noch möglichst lange bewältigen können.

Diese Erwägungen veranlaßten die Kanalbaudirektion in Essen vor einiger Zeit, die Betriebsverhältnisse auf dem ihr unterstellten Rhein-Herne-Kanal näher zu untersuchen. Der Kanal führt auf seiner ganzen Länge durch das rheinisch-westfälische Industrie- und Bergbaugebiet und hat sich dadurch in kurzer Zeit zu einer der meist befahrenen künstlichen Wasserstraßen entwickelt. Die Schleusen, deren immer je zwei nebeneinander liegen, sind oft ununterbrochen 8—10 Stunden täglich im Betrieb. Ein weiteres Anwachsen des Verkehrs ist in normalen Zeiten mit Bestimmtheit zu erwarten. Die Beförderung der Kähne auf den Haltungen erfolgt durch Schlepper der Verwaltung, es ist hier somit Gewähr für einheitlichen und regelmäßigen Betrieb gegeben. Maßgebend für die Leistungsfähigkeit des Kanals bleiben darum wieder wie gewöhnlich die Schleusen. Der Auftrag der Kanalbaudirektion ging nun dahin, festzustellen, welche Erfahrungen beim praktischen Schleusenbetrieb gemacht würden, und welche Verbesserungen möglich wären. Die ersten Beobachtungen waren dem Regierungs- und Baurat Dr.-Ing. Stecher übertragen worden, in der Hauptsache wurden sie dann aber im Sommer 1922 vom Verfasser ausgeführt. Der Bericht darüber ist die Grundlage, aus der die vorliegende Arbeit entstanden ist¹⁾.

Als Einleitung werde ein kurzer geschichtlicher Rückblick über Schleusenbetrieb gegeben.

II. Geschichtliche Entwicklung des Schleusenbetriebs.

a) Betrieb vor Aufkommen der Kammerschleuse (Schiffsdurchlässe und Stauschleusen).

Bereits lange Zeit vor der Ausbildung der Kammerschleuse zu ihrer heutigen Gestalt gab es Bauwerke, die in bescheidenem Maße ähnlichen Zwecken dienten. Vor allem zwei Fälle waren es,

¹⁾ Durch Verfügung Nr. K 736 K vom 16. Februar 1924 hat der Chef der Dortmund-Ems-Kanalverwaltung, dem der Rhein-Herne-Kanal jetzt unterstellt ist, dem Verfasser die Benutzung dieses Berichts zu der vorliegenden Arbeit gestattet.

wo die natürliche Schifffahrt auf Hindernisse stieß, sobald sich ein Verkehr auf etwas größere Entfernungen entwickelte.

Auf vielen kleinen und mittleren Flüssen waren im Laufe der Zeit zahlreiche Mühlenwehre entstanden, die gewöhnlich den Fluß auf seine ganze Breite absperreten. Es blieb zunächst nichts anderes übrig, als die Waren vor dem Wehr auszuladen und auf der anderen Seite in anderen Schiffen weiterzubefördern. Aber allmählich gelang es doch, diese Hindernisse zu überwinden. Man ordnete an geeigneten Stellen des Wehrs Lücken von etwa doppelter Schiffsbreite an, indem man diesen Teil weniger hoch aufführte. Diese Lücken dienten in erster Linie für den Durchgang von Flößen, aber bei geeigneten Wasserständen fuhren auch kleine, flache, festgebaute Schiffe ohne große Gefahr hindurch. Man muß sich dabei vergegenwärtigen, daß die Binnenschiffe bis weit in die Neuzeit hinein gewöhnlich nur eine Tragfähigkeit von 10—20 t, sehr selten auf großen Strömen mehr als 50 t hatten. Bei Stauhöhen von über etwa 0,5 m waren aber auch für kleine Schiffe die einfachen Wehrlücken nicht mehr befahrbar. Man ordnete deshalb in solchen Fällen später im Unterwasser der Wehrlücke eine sanft geneigte „Flutrinne“ an, auf der die Schiffe gleichmäßig hinabgleiten konnten. Auf diese Weise hat man Gefälle bis zu 15 m überwunden (Traunfälle in Salzburg 1416). Die offenen Wehrlücken verbrauchten natürlich viel Wasser und wurden deshalb in trocknen Zeiten von den Müllern meist ganz zugesezt. Dann ruhte eben der durchgehende Betrieb. Später lernte man es, diese Öffnungen durch bewegliche hölzerne Schütze zu verschließen, die dann nur geöffnet zu werden brauchten, wenn ein Schiff hindurch wollte.

Bei Talfahrt verursachten diese Schiffsdurchlässe nur wenig Aufenthalt. Die Bergfahrt dagegen dauerte ziemlich lange und erforderte oft recht bedeutende Kraftanstrengungen. Gewöhnlich vereinigten sich dann die Besatzungen zweier Schiffe, um ihre Fahrzeuge nacheinander gemeinsam heraufzuschleppen. Oft wurde an solchen Stellen auch besonderer Vorspann von Menschen, Pferden oder Ochsen unterhalten. Bisweilen stellte man in späterer Zeit sogar starke Winden oberhalb des Wehres auf, um den Schiffern zu helfen.

Ganz ungefährlich war dieser Betrieb namentlich bei größerem Gefälle nicht, aber er bedeutete im allgemeinen doch einen großen

Fortschritt gegen früher, wo die Güter an jedem Wehr umgeladen werden mußten.

Waren natürliche und künstliche Wehre zunächst nur Hindernisse für die Schifffahrt gewesen, so lernte man sie allmählich doch auch zugunsten der Schifffahrt zu verwenden. Um seichte Flußstrecken befahren zu können, staute man eine gewisse Menge Wasser durch Wehre oder sog. „Stauschleusen“ auf. Wurde das angesammelte Wasser dann plötzlich abgelassen, so ergoß sich eine mächtige Welle zu Tal, auf der sämtliche Schiffe, die inzwischen zusammengekommen waren, verhältnismäßig bequem ihre Reise fortsetzen konnten. War die seichte Flußstrecke zu lang, so schaltete man mehrere derartige Wehranlagen ein, die dann nach und nach abgelassen wurden. Auf diese Weise ist auf französischen Flüssen lange Zeit eine rege Schifffahrt betrieben worden. Die bedeutendste Anlage dieser Art in Deutschland ist die im 14. Jahrhundert erbaute Stecknitzfahrt zwischen Lübeck und Lauenburg. Zwei kleine Flüsse sind in ihren Oberläufen durch eine künstlich gegrabene Scheitelhaltung verbunden, ein See liefert durch Anstau die nötigen Wassermengen. Die ganze Wasserstraße war 94 km lang und besaß 17 Staustufen. Das Gefälle von der Scheitelhaltung betrug nach der einen Seite 17 m, nach der anderen 12 m. Über den Betrieb sind wir ziemlich gut unterrichtet. An jedem zweiten Werktag, dem sog. „Zapfeltage“, wurde das angesammelte Stauwasser der Schleusen abgelassen und auf dieser Welle, die das Flußbett etwa 80 cm hoch füllte, fuhren die Schiffe bis zur nächsten Schleuse. Die Talfahrt war nicht schwierig, aber zur Bergfahrt waren 6—8 „Leinenzieher“ für jedes Schiff erforderlich. Die Fahrt von Lübeck bis Lauenburg dauerte gewöhnlich 2—3, zuweilen aber auch 5 Wochen. Trotz dieses mangelhaften Betriebs sollen in der Zeit der Blüte der Kanalschifffahrt (etwa 1500—1550) jährlich im Durchschnitt allein 12400 t Salz von Lauenburg nach Lübeck befördert worden sein (das sind etwa 1000—1200 Kähne).

Diese Anlagen für eine Schifffahrt auf Schwellungen führten in Deutschland bei weiterer Ausbildung zur Kammersehleuse. Zur Wasserersparnis und um bei größerem Gefälle die Gefahren der reißenden Strömung für die Schiffe zu vermindern, legte man zwei einfache Stauschleusen in kurzer Entfernung hintereinander. Die Tore der einfachen wie der doppelten Stau-

schleusen waren dabei zunächst zwei Klappen mit senkrechter Drehachse (ähnlich wie Stemmtore), die sich aber in der Mitte nicht ganz berührten. Unten lehnten sie sich gegen eine gerade Sohlschwelle, oben gegen einen herausnehmbaren oder festen Schlagbaum. Diese Tore waren nun aber nicht mit einem dichten Bohlenbelag bekleidet, sondern bestanden im wesentlichen nur aus dem Gebälk, während die Zwischenräume durch lose Schütztafeln geschlossen wurden. Wollte man die Stauschleuse öffnen, so hob man die Schütztafeln von Hand oder mit einfachen Winden heraus und konnte dann die beiden Tore gegen den Strom aufdrehen.

Wo man darauf nicht angewiesen war, wo also die Stauschleusen nicht mehr zum Durchfluß des Stromes, sondern nur noch zur Durchfahrt der Schiffe dienten, bildete man sehr bald schon die Schleusentore als regelrechte Stemmtore aus (Alsterfahrt 1325 ?). Zum Wasserausgleich waren sie nur mit kleinen, durch Getriebe und gezahnte Stangen zu öffnenden Zapfschützen versehen.

b) Betriebsverhältnisse der älteren Kammerschleusen.

Damit war in der Entwicklung des Schleusenwesens eine Stufe erreicht, die jahrhundertlang kaum wesentlich überschritten wurde.

Allmählich baute man Kammerschleusen auch in Stein (in Deutschland zuerst um 1550 auf der Saale). Ihre Grundform war lange die eines Kessels. Sie gestattete bei geringerer Gesamtlänge und damit geringeren Baukosten doch die gleiche Zahl Schiffe aufzunehmen. Das gleichzeitige Schleusen mehrerer der kleinen Schiffe war erforderlich bei der Gruppenfahrt, es mag aber auch sonst wünschenswert gewesen sein, um die beweglichen Teile der Schleuse, deren sichere Ausbildung zunächst natürlich Schwierigkeiten machte, etwas zu schonen. Später, als auch die Schiffsabmessungen bedeutend wuchsen, ordnete man höchstens noch zweischiffige Schleusen an. Die beiden Schiffe lagen dann nebeneinander, die Schleusenhäupter waren oft gegeneinander versetzt, damit das zuerst eingefahrene Schiff auch zuerst wieder ausfahren konnte. Meist aber wurden die Schleusen einschiffig angelegt.

Mehr und mehr ging das Bestreben dahin, bei den teuren Schleusenbauten zu sparen. Eytelwein, der Anfang des vorigen

Jahrhunderts lange Zeit das preußische Bauwesen an maßgebender Stelle leitete, gibt sehr eingehende Anweisungen, wie man beim Bau durch geschickte Arbeitseinteilung sparen kann. Gleichzeitig schränkt er aber auch die lichten Abmessungen der Schleusenbauwerke in einer Weise ein, die für den praktischen Betrieb sicher nicht von Vorteil war. Für einen Oderkahn von 132 Fuß Länge und 12 Fuß Breite sollte die Schleusenbreite 14—16 Fuß (Rücksicht auf Decklast), die Länge aber nur 134 Fuß betragen! Die Kähne durften also nur ganz langsam in die Schleuse einfahren. Vor allem aber mußte das Füllen der Kammer sehr vorsichtig geschehen, damit der Kahn sich nicht bewegte und an die Tore stieß. Dabei ist zu beachten, daß das Füllen nur in der Längsrichtung der Kammer erfolgte, durch Torschütze oder kurze Umläufe im Oberhaupt.

Trotz dieser peinlichen Sparsamkeit bauten übrigens Eytelwein und nach seinen Angaben die ganzen nächsten Jahrzehnte in Preußen vielfach mit so übertriebener Sicherheit, daß schon Zeitgenossen darauf aufmerksam machten, die preußischen Schleusen seien durchweg viel teurer als solche in Holland und Frankreich, obwohl dort die allgemeinen Verhältnisse keineswegs günstiger wären. Man sollte für dasselbe Geld lieber mehr Schleusen und Kanäle bauen, um den inneren Verkehr zu fördern [3¹], S. 59]. Auch Hagen weist auf diese Verschwendung hin [3¹], S. 58], er erklärt sie durch die Organisation des damaligen Bauwesens, wo jeder bemüht gewesen sei, möglichst wenig Verantwortung zu übernehmen.

Über die Entwicklung der Betriebseinrichtungen von Schleusen bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts findet sich bei Hagen mancherlei Anhalt.

Das Bewegen der Tore erfolgte zunächst mit Hilfe eines Drehbaums (gewöhnlich des über die Wendesäule nach rückwärts verlängerten Oberrahmstücks) oder durch eine Zugstange, die am Kopf der Schlagsäule angriff. Bei größeren Verhältnissen, wo Menschenkraft allein nicht ausreichte, nahm man noch Winden verschiedener Art zu Hilfe, wobei aber Eisen meist nur sparsam verwendet wurde. Für das Bewegen der Tore in großen Seeschleusen brachte man auf der Innen- und Außenseite der Tore Ketten an,

¹) Nummer des Literaturverzeichnisses.

die durch Winden gespannt wurden. So waren Druckglieder vermieden und man hatte doch jederzeit auch bei Wellengang eine sichere Führung des Tores. Im ganzen weist aber Hagen mit Recht darauf hin, daß es zweckmäßiger ist, durch geeignete Konstruktion und Unterhaltung der beweglichen Teile die Widerstände selbst zu verringern, statt sie durch möglichst verwickelte mechanische Hilfsmittel, die durch Reibung auch nur wieder Kraft verschlingen, überwinden zu wollen. Für das Öffnen der Tore gewöhnlicher Kanalschleusen (bis etwa 18 Fuß Breite) reichte meist ein Mann aus, bei großen Dockschleusen dagegen waren dazu 10—12 und noch mehr Arbeiter nötig.

Die Einrichtungen zum Füllen und Leeren der Schleusen haben sich dagegen in dem besprochenen Zeitraum grundsätzlich weiterentwickelt.

Öffnungen in den Toren waren das Nächstliegende und Einfachste und wurden noch bis zuletzt am häufigsten verwendet. Als Verschuß dienten Schütze und Klappen, sie wurden mit verschiedenen Windenanordnungen bewegt, oft aber auch, um Eisen zu sparen, nur mit Hebeln und Wuchtebäumen. Hagen erwähnt eine solche Einrichtung bei der Schleuse in Berlin, die noch um 1850 bestand und zu deren Bedienung 2—3 Mann erforderlich waren.

Da es aber namentlich bei den niedrigen Toren im Oberhaupt oft Mühe machte, genügend große Öffnungen für die Schütze auszusparen, kam man darauf, besondere Füllkanäle neben den Toren anzulegen, die Umläufe in den Häuptern. Dadurch erreichte man am Oberhaupt noch weitere Vorteile. Wenn das Schleusen-gefälle nicht zu gering war, lag der Oberdremmel bei entleerter Schleuse trocken. Beim Füllen durch Torschütze wurde darum nur die Druckhöhe vom Oberwasser bis Mitte der Schützöffnung ausgenutzt. Bei Umläufen dagegen war der ganze Unterschied zwischen Ober- und Unterwasser wirksam. Außerdem war es jetzt nicht mehr möglich, daß das vom Oberdremmel frei herabfallende Wasser in die Schiffe hineinstürzte. Die Anlage von Umläufen bot also für den Betrieb große Vorteile, wenn sie auch den Bau etwas verteuerte. Man legte deshalb auch oft nur im Oberhaupt Umläufe an. Die ersten Umläufe werden in Holland vor 1600 erwähnt [7, S. 135]. In Frankreich wurde der erste große Kanal von Briare (zwischen Seine und Loire, Bauzeit 1604—42) auch

mit Umläufen ausgerüstet [3, S. 235 und 6, S. 68]. Umläufe, die auf die ganze Schleusenlänge durchgehen, erwähnt Hagen 1852 in seinem sonst so ausführlichen Werk noch nicht.

Anlagen zum Einschleppen der Kähne in die Schleuse, wie wir sie heute kennen, waren in früheren Zeiten nicht nötig. Die Schiffe waren gewissermaßen Selbstfahrer, jedes hatte seine eigene Schlepplmannschaft oder seine Zugtiere. Dabei verkehrten auf den Kanälen nicht nur Güterschiffe, sondern vielfach auch Personenboote. Über ihre Geschwindigkeit wird uns z. B. von französischen Kanälen berichtet, daß die mit Pferden getreidelten, gewöhnlichen Postboote im Anfang des 19. Jahrhunderts stündlich etwa 11 km oder, mit Anrechnung des Aufenthaltes an Schleusen, im Durchschnitt 8,5 km zurücklegten. Auf dem Ourcq-Kanal bei Paris verkehrten sogar Boote, die über 15 km Geschwindigkeit erreichten, fast das Doppelte der üblichen Eilposten zu Lande. Diese Boote waren vornehm eingerichtet, hatten Platz für etwa 70 Personen und wurden von 3 Pferden im Galopp gezogen, die man alle 3—5 km wechselte. Die Lastkähne fuhren natürlich wesentlich langsamer. Für wertvolle Güter konnte man etwa mit einer Geschwindigkeit von 3 km/Std rechnen, das sind rund 40 km am Tage (1836, Südkanal von Cette nach Toulouse). Für gewöhnlich legten Lastkähne aber bei Menschenzug nur 7—15 km/Tag, bei Pferdezug 20—25 km/Tag zurück. Kohlenkähne von Mons nach Paris (376 km, 69 Schleusen) brauchten oft mehrere Monate!

e) Schleusenbetrieb seit Mitte des vorigen Jahrhunderts.

Ein vollständig neuer Abschnitt für die Entwicklung der Kanäle und ihren ganzen Betrieb begann um die Mitte des vorigen Jahrhunderts durch das Aufkommen der Eisenbahnen. Fast schlagartig nahm zunächst der Verkehr auf den meisten Wasserstraßen ab, in deren Nähe Eisenbahnen eröffnet wurden. Viele glaubten schon das Ende aller Binnenschifffahrt, wenigstens auf den Kanälen voraussagen zu können. Man muß es Hagen hoch anrechnen, daß er schon um 1850 klar darauf hingewiesen hat [3, S. 453], daß wohl die wertvollen Güter, die schnell und regelmäßig befördert werden sollen, auf die Eisenbahn übergehen könnten, daß aber die Massengüter, die keine hohen Frachten vertragen, nach wie vor den Kanälen verbleiben würden. Diese

Umstellung auf den reinen Massengüterverkehr ist das hervorsteckende Merkmal des Kanalbetriebs in der neueren Zeit.

In früheren Jahrhunderten hatte die Schifffahrt hauptsächlich der Beförderung wertvoller Kaufmannsgüter gedient, Bau- und Brennstoffe waren fast überall noch reichlich zu haben, Salz war das einzige Massengut. Unter diesen Verhältnissen konnten die Schiffe klein sein, sie mußten es sogar, wenn sie nicht übermäßig lange auf volle Ladung warten wollten. Erst etwa in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts begann sich neben dem Einzel- auch ein größerer Massenverkehr zu entwickeln. Vor allem der Kohlenversand gewann Bedeutung, daneben die Verfrachtung von Feldfrüchten, Holz, Steinen, Erz usw.

Die natürliche Folge dieser Entwicklung war das Bestreben, die Tragfähigkeit der Kähne zu vergrößern, um die Frachtkosten zu verringern. So betrug die durchschnittliche Tragfähigkeit der im Regierungsbezirk Potsdam einschließlich Berlin heimatberechtigten Schiffe in den Jahren 1816, 1846, 1858: 39,2 t, 52,6 t, 58,3 t. Besonders stark wuchsen die Schiffsgrößen weiter bei dem allgemeinen wirtschaftlichen Aufschwung nach der Reichsgründung: Der Oder-Spree-Kanal (1886—90) wurde für 400 t-Schiffe gebaut, der Dortmund-Ems-Kanal (1892—99) für 600 t-Schiffe, der Rhein-Herne-Kanal (1906—13) für 1000—1500 t-Schiffe. Und nicht nur die Tragfähigkeit der Kähne nahm sehr beträchtlich zu, auch ihre Zahl und ihre Ausnutzung wurde größer. Die Gesamtleistung der deutschen Binnenschifffahrt ist zwischen 1875 und 1903 von 2,8 auf 21 Milliarden Tonnenkilometer gestiegen. Diese Zahl gibt eine Vorstellung davon, in welchem Maße sich die Anforderungen an den Betrieb der Kanäle und ihrer Schleusen in den letzten Jahren gesteigert haben.

Es ist daher erklärlich, daß die Abmessungen der Schleusenbauwerke nicht nur im selben Verhältnis wie die Schiffsgrößen mitgewachsen sind, sondern darüber hinaus noch weitere Fortschritte gemacht haben. Man wollte nicht mehr bloß irgendwie den Höhenunterschied überwinden, sondern war mehr und mehr bestrebt, vor allem schnell zu schleusen, auch wenn die Baukosten dadurch stiegen. Drempe- und Schleusensole, die früher oft nur einen Fuß unter dem Schiffsboden lagen, wurden wesentlich vertieft, um den Widerstand beim Einfahren zu verringern [9]. In den mehrschiffigen Schleusen hatte man die Kähne bisher

nebeneinander gelegt, jetzt legte man sie hintereinander, trotzdem die Kosten eines solchen Bauwerks viel höher sind. Aber die Schleppzüge können dann schneller und bequemer ein- und ausfahren. Die neue Schleppzugsschleuse in Duisburg hat 350 m lichte Länge, die Schleusen für Finowkähne Mitte des vorigen Jahrhunderts hatten eine solche von 40,8 m. Um die Zeitverluste beim Kanalbetrieb weiter zu verringern, suchte man auch die Zahl der Schleusen überhaupt zu vermindern. Das Gefälle der einzelnen wurde dafür vergrößert. Dabei scheute man selbst vor großen Erdarbeiten und schwierigen Kunstbauten nicht zurück (Kanalüberführungen und hohe Kanaldämme).

Die Abmessungen der Schleusenkammern sind somit nach allen drei Richtungen hin beträchtlich gewachsen. Damit das Füllen und Leeren nun nicht zu lang dauerte, mußten in der Zeiteinheit gewaltige Wassermengen zugeführt werden, Höchstleistungen von 40 m³/sek sind heute keine Seltenheit mehr. Um trotzdem die Schiffe nicht zu gefährden, ließ man das Füllwasser nicht mehr ausschließlich von Oberhaupt her einströmen, sondern baute neben oder unter der Kammer besondere Kanäle, aus denen es sich durch Stichöffnungen gleichmäßig auf die ganze Länge verteilen konnte. — Bei großem Gefälle und lebhaftem Betrieb entstand in vielen Fällen Mangel an Schleusungswasser, durch den Bau von Sparschleusen und mechanischen Hebewerken suchte man ihm abzuhelfen. (Die erste Sparschleuse ist übrigens schon 1643 in Flandern erbaut worden [3, S. 33].)

Diese ganze Entwicklung des Schiffsverkehrs und des Schleusenbaues wäre sicher sehr erschwert gewesen, wenn uns nicht auf allen Gebieten in zunehmendem Maße das Eisen als billiger und fester Baustoff zur Verfügung gestanden hätte. Sie wäre unmöglich gewesen, wenn uns für den Betrieb derartig großer Massen die Dampfmaschine nicht auch die nötigen Kraftquellen geliefert hätte.

Über die ersten eisernen Schleusentore wird uns aus England um 1800 berichtet [3, S. 128]. Sie bestanden aus Gußeisen und bewährten sich wegen ihrer Empfindlichkeit gegen Stöße so schlecht, daß man bald wieder zum Holzbau zurückkehrte, auch wenn die langen Balken nur mit großen Kosten zu beschaffen waren. 1843 wurden dann gleichfalls in England Schleusentore gebaut, die einen Rahmen aus Gußeisen und eine Bekleidung

von gewalztem Kesselblech hatten. Ja, Hagen erwähnt schon Vorschläge, kleinere Schleusentore ganz aus Walzeisen herzustellen. Als besonderer Vorteil der beiden letzten Konstruktionen wird bezeichnet, daß man beliebig große Luftkästen im Tor anbringen kann. Das Tor kann also nicht mehr versacken, die Reibung wird daher vermindert und die Bewegung erleichtert. Als die Schleusenbauten immer weiter wuchsen, wurden Stemmtore im Oberhaupt wegen zu geringer Höhe oft konstruktiv ungünstig. Man verwendete statt ihrer Klapptore, die allerdings viele bewegliche Teile unter Wasser haben und während des Betriebs nur schlecht nachgesehen werden können, Schiebetore oder vereinzelt auch Hubtore.

Die Verschlüsse für die Umläufe sind ebenfalls allmählich verwickelte Eisenkonstruktionen geworden. Bei den großen Querschnitten und Gefällsunterschieden erleiden Schütztafeln beträchtliche Drucke, man ersetzte darum gleitende Reibung durch rollende (Rollschützen) und bildete schließlich ganz neue Formen aus, bei denen keine oder fast keine Reibung infolge Wasserdruck zu überwinden ist (Zylinder- und Segment-schützen).

Die größte Änderung im Schleusenbetrieb ist aber zweifellos durch die Einführung der Kraftmaschinen bewirkt worden. Maschinen haben jetzt das Bewegen der Tore und Umlaufschützen übernommen, Maschinen schleppen die Schiffe ein und aus und befördern sie auf dem Kanal weiter.

Als Kraftquelle stand zunächst nur die Dampfmaschine in noch ziemlich einfacher Form zur Verfügung. Da man nun bei den Schleusen nicht an jedem der weit entfernten Angriffspunkte eine Dampfmaschine aufstellen konnte, schaltete man ein Zwischenglied ein, das Druckwasser. Schon in den fünfziger Jahren wurden bei englischen Seeschleusen Versuche mit Druckwasserantrieb gemacht. Der dadurch erreichte Zeitgewinn war sehr bedeutend, selbst große Seeschleusentore waren in 2—3 Minuten zu öffnen, während es mit Menschenkraft vielleicht fünf bis sechsmal so lange dauerte. Und für eine verkehrsreiche französische Binnenschleuse errechnet Quinette de Rochemont [8], daß sich die Mehrkosten für Verbesserungen (vor allem Maschinenantrieb der Tore und Schützen) durch den Zeitgewinn der Schiffe mit fast 6% verzinsen. Aber im ganzen blieb die Druckwasseranlage immer

recht verwickelt und kostspielig, man verwendete sie daher nur bei sehr lebhaftem Betrieb und möglichst nur da, wo man Druckwasser ohnehin brauchte zum Antrieb von Hafenkranen, Drehbrücken oder dgl.

Viel bequemer als der Druckwasserbetrieb war der elektrische Antrieb, der Ende der neunziger Jahre im Schleusenbau aufkam. Da waren keine Rohrleitungen, die undicht werden oder einfrieren konnten. Die Maschine selbst war überaus anspruchslos, sie bedurfte keiner Wartung und war doch jederzeit betriebsbereit. Dicht an jede Kraftangriffsstelle konnte man einen eigenen kleinen Motor setzen und lange Zwischenglieder vermeiden. Der Druckwasserantrieb wurde daher sehr bald durch den elektrischen vollständig verdrängt. Die Maschinenausrüstung von Schleusen ist jetzt so weit vervollkommen worden, daß große Binnenschleusen selbst beim lebhaftesten Verkehr bequem von einem einzigen Mann bedient werden können.

Gehörten früher zur Maschinenausrüstung von Binnenschleusen hauptsächlich nur Einrichtungen zum Bewegen der Tore und Umlaufschützen, so wurden jetzt mit wachsender Größe der Schiffe auch Anlagen zum Ein- und Ausschleppen erforderlich. Bei Seeschleusen wurden schon früher zu diesem Zweck kräftige Erdwinden angeordnet [3, S. 274], die von Menschen bewegt wurden. In ähnlicher Weise hat man nach dem Aufkommen von Kraftmaschinen die Spills ausgebildet, die sich jetzt auch bei vielen Binnenschleusen finden. Wie wertvoll eine solche Anlage bei starkem Verkehr sein kann, beweist eine Mitteilung vom Oder-Spree-Kanal [10]. An der Schleuse Wernsdorf war der Verkehr zwischen 1890 und 1896 von 7400 auf 20200 Schiffe im Jahr gestiegen, außerdem war der Verkehr sehr ungleichmäßig. Um den Betrieb zu verbessern, wurde ein Spillanlage eingebaut, die 600 t-Kähnen nach 30 Sekunden eine Geschwindigkeit von 0,5 m/sek erteilen konnte. Es zeigte sich, daß dadurch schon für 400 t-Kähne, die den Hauptteil der Schiffe ausmachen, die Schleusungszeit um 40% verringert worden ist. Bei 600 t-Kähnen war die Ersparnis noch größer.

Vorteilhafter als Spills sind in manchen Fällen, besonders bei sehr langen Schleusen, elektrische Treidelmaschinen, weil sie mit den Kähnen mitgehen und das Aufnehmen und Wechseln der Trossen wesentlich erleichtern.

Die Wahl von Schleppanlagen an den Schleusen richtet sich natürlich auch danach, wie die Kähne zwischen den einzelnen Schleusen auf den Kanalhaltungen befördert werden. Auch hierfür kommt heute fast nur noch Maschinenkraft in Frage. Die ersten Versuche mit Dampfschleppbooten auf Kanälen wurden um 1800 in England gemacht. Sie befriedigten aber wenig, da die heftigen Wellen die Kanalufer stark beschädigten. Man gab daher den Betrieb immer wieder auf. Erst als die Kanalquerschnitte wesentlich größer geworden waren, gegen Ausgang des Jahrhunderts, und zugleich die zunehmende Größe der Schiffe dringend nach stärkeren Zugmitteln verlangte, vermochte sich der Dampfschleppbetrieb auch auf den Kanälen endgültig durchzusetzen. Man befördert dabei jetzt beliebig große Kähne doppelt so schnell wie früher, trotzdem aber sind die Schleppkosten für 1 tkm noch geringer geworden¹⁾.

Wirtschaftlich zu ähnlichen Ergebnissen kommt man auf verkehrsreichen Kanälen auch bei elektrischer Treidelei vom Lande aus. Im Betrieb dagegen ist diese Antriebsart in manchen Beziehungen weniger bequem als der Zug durch Schleppdampfer, sie hat darum vorläufig wenig Anwendung gefunden. Der Gedanke, jeden Kahn mit einer eigenen Antriebsmaschine auszurüsten, wäre für den Schleusenbetrieb sicher das einfachste. Trotzdem ist man davon wieder abgekommen, da im allgemeinen bei den langen Liegezeiten der Kähne eine solche Anlage zu schlecht ausgenutzt wird. (Ein anderer Fall ist z. B. [19, S. 592] erwähnt, Ziegeltransport auf Selbstfahrern von Zehdenick nach Berlin.)

¹⁾ In der Zeitschrift für Bauwesen 1907, S. 570, ermittelt Sympher die Schleppkosten bei Dampferbetrieb, 5 km Stundengeschwindigkeit, voller Hin- und $\frac{1}{5}$ Rückfracht zu etwa 0,2 Pf./tkm. Für Pferdetreidelei erhält man überschläglich: Ein Mann mit 2 Pferden kostet 15 M. den Tag. Er möge in demselben Kanalquerschnitt, der erheblich größer ist als die in Frankreich bei Pferdebetrieb früher üblichen, einen 300 t-Kahn 30 km am Tag (statt 25 km) befördern.

$$\text{Bei } \frac{1}{5} \text{ Rückfracht kostet das Schleppen von 1 tkm: } \frac{2 \cdot 15 \cdot 100}{(300 + 60) \cdot 30} = 0,28 \text{ Pf./tkm.}$$

III. Beobachtungen an einem modernen Schleusenbetrieb und Folgerungen daraus.

Im vorstehenden ist in großen Zügen geschildert worden, in welcher gewaltiger Weise sich der Schleusenbetrieb bis heute entwickelt hat. Das Schleusen ist allmählich von einer Anzahl ganz unregelmäßiger Einzelvorgänge zu einem zusammenhängenden, kunstvollen, fast gesetzmäßig festgelegten „Betrieb“ geworden. Eine Prüfung und Beobachtung des Schleusungsgeschäftes war natürlich auch früher schon üblich und notwendig, aber eine rechnerische und wissenschaftliche Behandlung ist doch erst jetzt möglich geworden, wo durch Maschinen wenigstens ein großer Teil der stark veränderlichen und schwer zu fassenden menschlichen Einflüsse beseitigt ist. So sind in neuerer Zeit verschiedentlich Beobachtungen über den Schleusenbetrieb angestellt worden, aber teils sind ihre Ergebnisse veraltet [8, 9,], teils nur auf einen einzigen, eng begrenzten Fall beschränkt. Auch theoretische Berechnungen der Schleusungsdauer, wie sie Prüssmann, Sympher u. a. für Wirtschaftlichkeitsermittlungen von Kanälen vorgenommen haben, sind für die Kenntnis des eigentlichen Schleusenbetriebs ohne Wert. Es erscheint darum nicht unzweckmäßig, die neuen, von der Kanalbaudirektion Essen am Rhein-Herne-Kanal veranlaßten Messungen darzustellen und auszuwerten. Sie sind dazu um so eher geeignet, als dort je nach den äußeren Umständen andere Betriebsmittel verwendet werden, ein Vergleich verschiedener Einrichtungen miteinander also an Ort und Stelle möglich ist. Auch findet dort ein durchgehender, lebhafter Verkehr statt ohne Pausen, in denen man Fehler bei der vorhergehenden Schleusung ausgleichen oder schon Vorbereitungen für die nächste treffen könnte. Die Messungen wurden ohne vorherige Ankündigung ausgeführt und stets über einen großen Teil des Tages ausgedehnt, es sind also keine Paradeleistungen. Die dabei erhaltenen Werte sind natürlich nicht besonders gleichmäßig, aber sie geben ein zutreffendes Bild des wirklichen Betriebs. Sache der näheren Prüfung muß es dann sein, einzelne Sonderfälle aus dem allgemeinen Durchschnitt auszuscheiden.

Wenn man aus den hier gewonnenen Erfahrungen allgemeine Schlüsse ziehen will, muß man sich allerdings darüber klar sein,

daß gerade beim Schleusen die besonderen örtlichen Umstände eine große Rolle spielen. Die an einer Stelle gemachten Beobachtungen darf man also nur nach entsprechender Prüfung auf andere Verhältnisse übertragen. Diese Einschränkung ist daher bei den folgenden Untersuchungen stets stillschweigend vorausgesetzt.

Die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals sind Schleppzugschleusen von 165 m lichter Länge, 10 m Breite und durchschnittlich 5 m Gefälle. Es liegen immer zwei Schleusen nebeneinander. Die Kähne werden auf den Haltungen in Zügen zu vier von Dampfern der Verwaltung geschleppt. Durch jede der beiden Schleusen geht gewöhnlich eine Hälfte des Zuges, der Dampfer wird nicht mitgeschleust. Während der Schleusung werden die Kähne durch eine elektrische Treidemaschine gezogen, die auf einem Leitwerke nach jeder Seite etwa 120 m über die Schleuse hinausfahren kann, bisweilen auch durch besondere kleine Bugsierdampfer. Der ganze Betrieb wird von einem Mann erledigt, der zugleich auch den Schleppwagen fährt.

a) Plan für die Messungen.

Die Messungen zerfallen in zwei Abteilungen. Die der ersten (Nr. 1—21 in Tabelle 1 und 2) dienten zunächst dazu, den Betrieb an den Schleusen genau kennenzulernen. Erst nach einiger Übung kann man damit rechnen, gleichwertige, brauchbare Beobachtungen zu bekommen. Vor allem aber wurden die Messungen der ersten Abteilung dazu benutzt, die Zweckmäßigkeit des Beobachtungsplanes praktisch zu erproben. Auf Grund der dabei gewonnenen Erfahrungen wurden dann die weiteren Messungen (Nr. 22—52) ausgeführt. Wenn so auch die ersten Beobachtungen nicht in jeder Weise voll befriedigen, so wurden sie doch hier mit aufgeführt, da sie für einige Vergleiche nicht entbehrt werden können.

Der ursprünglich vorgesehene Plan für die Messungen zerlegte den Schleusungsvorgang in fünf Gruppen: Einfahrt der Schiffe, Schließen des Tores, Füllen oder Leeren der Kammer, Öffnen des anderen Tores, Ausfahrt der Schiffe. Anfang und Ende jeder Gruppe wurden besonders festgestellt, so daß auch dazwischen liegende Verluste hervortraten. Es zeigte sich nun während der ersten Messungen, daß die erste und die letzte Gruppe noch weiter

zerlegt werden mußten. Dafür waren vor allem zwei Gründe maßgebend.

Der eigentliche Schleusungsvorgang vom Schließen des einen Tores bis nach dem Öffnen des anderen liegt durch die Maschineneinrichtungen, örtliche Verhältnisse (Wege für den Schleusenwärter) und praktische Rücksichten (Füllen und Leeren der Kammer) in ziemlich engen Grenzen fest. Die meisten Unregelmäßigkeiten ergeben sich beim Ein- und Ausfahren der Schleppzüge. Die Störungen zerfallen in zwei voneinander unabhängige Gruppen: 1. innerhalb der Schleuse, z. B. Schwierigkeiten beim Festmachen, Einbringen von mehr als zwei Schiffen auf einmal; 2. außerhalb der Schleuse, z. B. Störungen durch Wind, ungeschicktes Steuern usw. Um diese Einflüsse getrennt verfolgen zu können, empfiehlt es sich, die Aufnahme von Ein- und Ausfahrt auch in zwei Teile zu zerlegen:

Einfahrt

a) außerhalb der Schleuse (vom Beginn des Anfahrens bis zu dem Augenblick, wo die Spitze des Schleppzuges die Schleuse erreicht);

b) innerhalb der Schleuse (vom Erreichen der Schleuse bis zu dem Augenblick, wo das Tor geschlossen werden kann).

Ausfahrt

a) innerhalb der Schleuse (vom Anfahren bis zu dem Augenblick, wo der letzte Kahn die Schleuse verläßt);

b) außerhalb der Schleuse (vom Verlassen der Schleuse bis zu dem Augenblick, wo das Ende des Schleppzuges den äußersten Punkt des Leitwerks erreicht).

Man erreicht durch diese Teilung somit einen besseren Überblick über den Einfluß der einzelnen Störungen.

So lehrreich es an sich nun ist, die Dauer der einzelnen Vorgänge genau zu kennen, praktischen Wert erhalten diese Feststellungen erst, wenn man auch überblicken kann, wie sie sich aneinanderreihen. Erst ihre Gesamtheit macht den Betrieb aus, und auf dessen Kenntnis kommt es an. Dazu ist es aber auch erforderlich, daß die Beziehungen einer Schleusung zu der vorhergehenden und der nachfolgenden dargestellt werden können. Das war bei dem ursprünglich vorgesehenen Plan nicht einwand-

frei möglich. Denn praktisch fährt gewöhnlich der neue Schleppzug schon an, ehe das Ende des vorhergehenden den äußersten Punkt des Leitwerks erreicht, der Schleppzug also seine Ausfahrt beendet hat. In Wirklichkeit entsteht aber zwischen zwei Schleusungen ein Zeitverlust, der „äußere Verlust“. Er rechnet von dem Augenblick, wo das Ende des einen Schleppzuges die Schleuse verläßt, bis zu dem Augenblick, wo die Spitze des nächsten Zuges in die Schleuse einfährt. Um die Größe dieses äußeren Verlustes zwischen zwei Schleusungen festzustellen, ist es ebenfalls nötig, die Aufnahme von Ein- und Ausfahrt, wie oben vorgeschlagen, zu trennen.

In den Tabellen 1 und 2 sind die Ergebnisse der Messungen, getrennt nach Berg- und Talschleusungen, zusammengestellt und ausgewertet. Für die Rechnung war dabei folgendes zu beachten.

Sämtliche Zeiten wurden bei der Aufnahme auf halbe Minuten abgerundet. Das reicht völlig aus, da die einzelnen Vorgänge bei einer Schleusung meist doch nicht scharf abgegrenzt sind und ihre Summe dadurch nicht geändert wird. Nur das Öffnen und Schließen der Tore wurde verschiedentlich genau gemessen und richtig eingetragen. Die Füllzeit der Kammer wurde in den meisten Fällen bis zum Öffnen des Obertores gerechnet, da es sich beim Klapptor nicht sicher feststellen läßt, wann sich beide Wasserspiegel ausgeglichen haben. Sie wird also etwas zu reichlich sein, immerhin wurden aber keine merkbaren Verzögerungen beobachtet. Beim Leeren dagegen wird der Zeitpunkt der Ausspiegelung durch das Abheben des Schiebetores im Unterhaupt genau angezeigt.

Jede Zeitangabe der Zusammenstellung ist nach zwei Gesichtspunkten hin bewertet worden.

Die senkrechte Richtung gibt Aufschluß über die Dauer ein und desselben Vorgangs unter verschiedenen Verhältnissen. Von Wert ist es hier zu wissen, wie lange der Vorgang unter normalen, ungestörten Verhältnissen dauert. Bei der Durchschnittsbildung sind also hier alle ungewöhnlichen Werte auszuschalten. Sie wurden unterstrichen.

Die wagerechte Richtung gibt einen Überblick über alle Vorgänge während ein und derselben Schleusung. Auch hier will man das Bild einer „normalen“ Schleusung haben. Im praktischen Betrieb kommt aber nun bei fast jeder Schleusung

Tabelle 1. Schleusungen

Nr. der Messung	Schleppzug besteht aus		Äußerer Verlust vor der Einfahrt	Einfahrt mit Wagen		Dampfer		Verlust	Schließen des Untertores	Verlust	Füllen der Kammer
	Dampfer	Kähnen		1. Abschn.	2. Abschn.	1. Abschn.	2. Abschn.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	—	LL			420			—	50	170	330
3	—	LL			450			—	50	160	330
5	—	563 t 735 t			<u>720</u>			—	50	90	630*
7	—	612 t 692 t			<u>960²⁾</u>			30	50	100	630*
9	—	1347 t L			570			—	50	130	450*
11	—	486 t 235 t			360			—	50	130	570*
13	—	729 t 950 t			600			—	50	160	390*
15	—	235 t 486 t		3150 : 7 = 450	300			<u>380⁴⁾</u>	50	120	<u>900⁵⁾</u>
16	(M mit P)	738 t			390			—	50	130	<u>900⁵⁾</u>
18	—	763 t 601 t			630			—	<u>120⁶⁾</u>	120	630*
20	—	1140 t			330			—	50	160	420
21	—	719 t 545 t			360			60	50	110	450*
23	D	LL (P)	<u>420⁷⁾</u> ⁸⁾				180 90	<u>370⁷⁾</u>	50	150	*400
25	(M) D	LL	<u>360⁸⁾</u>				120 300	—	50	130	*425
27	—	592 t 557 t	270	180	240			—	50	<u>40</u>	450*
29	D	P	210		<u>150</u>			—	50	<u>400⁹⁾</u>	*420
31	—	L 1086 t	330	180	270			40	50	<u>30</u>	*420
33	—	LL	<u>540¹⁰⁾</u>	240	120			30	50	100	*420
35	—	LL	<u>510¹⁰⁾</u>	150	120			—	50	130	*480
40	—	LL	180	120	210			—	50	100	*450
42	—	LL	240	150	180			—	50	130	*510
44	—	LL	180	120	180			—	50	130	<u>600</u>
46	—	LL	150	120	210			—	50	130	*450
48	—	LL	180	120	240			30	50	160	*480
50	—	750 t L	300	180	240			30	50	100	540*
52	—	LLL	210	120	<u>330¹⁴⁾</u>			30	50	100	<u>540¹⁴⁾</u>
			2250 : 10 = 225	1680 : 11 = 155	2010 : 10 = 200			10	50	3020 : 23 = 130	*4450 : 10 = *445 ¹⁵⁾ 4740* : 9 = 525* ¹⁵⁾
				355				60			

Bemerkungen.

In Spalte 2 bedeutet D einen Dampfer, der die Kähne ein- und ausschleppt und mitgeschleust wird; (M) ist ein selbständiges Motorboot ohne Verbindung mit dem Schleppzug.

In Spalte 3 ist die Tragfähigkeit der beladenen Kähne in Tonnen angegeben.

L = Leerkahn. P = Prahm.

Spalte 4 bis 23: Zeitangaben in Sekunden.

¹⁾ Ausfahrt verzögert, da Vorhafen überfüllt.

²⁾ Behinderung durch Wind.

³⁾ Ausschleppen durch starken Schleppdampfer (man vgl. dagegen Tab. 2 Spalte 18/19).

⁴⁾ Strom ausgeschaltet wegen Arbeiten (vgl. 5).

⁵⁾ Ein Schütz am Oberhaupt ist außer Betrieb.

zu Berg.

Verlust	Öffnen des Obertores	Verlust	Ausfahrt mit				Äußerer Verlust nach der Ausfahrt	Summe der Spalten 6 bzw. 8 bis 16 bzw. 18	Mittel von Spalte 4 und 20	Gesamte Schleusungs-dauer (Sp. 21 + 22)	
			Wagen		Dampfer						
13	14	15	1. Ab-schn.	2. Ab-schn.	1. Abschn.	2. Abschn.	20	21	22	23	
30	140	320 ¹⁾	300	} 315				1760	} Summen aus Spalte 5 bis 19		
-	140	160	330					1620			
30	140	90	600				2350				
10	140	180			480		2580				
20	140	80			480	} 1830 : 4 = 460 ²⁾	1920				
-	140	70			360		1680				
-	140	70			510		1920				
70	140	90	300				-				
-	140	100		360			-				
-	140	40	510				2190				
-	140	40	360				1500				
30	140	70	390				1740				
-	140	30 ⁸⁾			300 ⁸⁾	30	480 ⁷⁾	1530		450	1980
-	140	-25 ⁸⁾			180 ⁸⁾	90	240	1200		300	1500
40	140	210	210	120			270	1380		270	1650
-	140	-20			90	30	210	-	-	-	
-	140	130*			330	120	300	1410	315	1725	
90	140	160*			300	90	210	1410	375	1785	
90	140	100*			150	60	210	1260	360	1620	
30	140	640 ¹¹⁾			210	60	120	1830	150	1980	
-	140	100*			150	90	90	1260	165	1425	
30	140	310 ¹¹⁾			210	90	150	1650	165	1815	
-	140	190*			300	90	750 ¹²⁾	1470	$\frac{150 + 200}{2} = 175$	1645	
-	140	100*			180	90	180	1380	180	1560	
-	140	-50	240	90			360 ¹³⁾	1290	330	1620	
-	140	160*			270	90	200	1620	205	1825	
15	140	970 : 7* = 135			2100 : 9 = 235	930 : 12 = 80	1980 : 10 = 200	18690 : 13 = 1440		22130 : 13 = 1705 Sek. = 28 1/2 Min.	

315
Bemerkungen.

- ⁶⁾ Das Tor geht das erste Mal nicht ganz zu.
- ⁷⁾ Prahm wird besonders von Hand rein- und rausgezogen.
- ⁸⁾ Ein- und Ausfahrt durch mitgeschleusten Dampfer.
- ⁹⁾ Taucher arbeitet am Schütz.
- ¹⁰⁾ Kähne durch Wind abgetrieben.
- ¹¹⁾ Kein Dampfer da zum Ausschleppen der leeren Kähne.
- ¹²⁾ Der zweite Kahn für die nächste Schleusung kommt später.
- ¹³⁾ Kähne für die nächste Schleusung liegen weit ab.
- ¹⁴⁾ Drei Kähne auf einmal schleusen.
- ¹⁵⁾ Füllzeit bei leeren Kähnen.
- ¹⁶⁾ Füllzeit bei beladenen Kähnen.

Tabelle 2. Schleusungen

Nr. der Messung	Schleppzug besteht aus		Äußerer Verlust vor der Einfahrt	Einfahrt mit Wagen		Dampfer		Verlust	Schließen des Obertores	Verlust	Leeren der Kammer
	Dampfer	Kähnen		1. Abschn.	2. Abschn.	1. Abschn.	2. Abschn.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	—	1359 t 924 t			660 ¹⁾			—	140	150	720 ¹⁾
4	—	981 t 755 t			510			—	140	130	420
6	(M)	1273 t 658 t			810 ²⁾			10	140	450	960 ²⁾
8	—	736 t 337 t			510			—	140	100	360
10	—	779 t 439 t			480			—	140	160	300
12	(M) (D)	807 t 548 t			1200 ²⁾			—	140	100	300
14	—	630 t L			360			—	140	100	510
17	—	1329 t 312 t			510			—	140	100	510
19	—	729 t 999 t			480			—	140	100	420
22	D (D)	851 t 698 t					660 ⁴⁾	—	270 ⁵⁾	120	390
24	D	883 t 746 t	480 ⁴⁾				240 510	20	140	140	390
26	—	480 t 606 t	240	180	210			—	140	130	300
28	—	428 t 795 t	270	240	180			30	140	100	360
30	—	975 t 1330 t	210	180	630 ⁶⁾			—	140	160	360
32	—	885 t 841 t	300	300	510			—15	140	115	420
34	—	1053 t 699 t	210	210	300			50	140	110	420
36	(M) (M)	902 t 334 t	210	180	240			—	140	130	390
37	—	525 t 200 t P 211 t		150	480 ³⁾			15	140	135	300
39	—	1352 t 412 t		240	1620 ⁷⁾			—	140	130	330
41	—	300 t 999 t	120	120	1020 ⁷⁾			—	140	130	300
43	—	586 t 847 t	90	120	330			—	140	130	390
45	—	661 t 311 t	150	180	150			30	140	100	300
47	—	867 t 875 t	750 ⁸⁾	150	330			—	140	130	330
49	—	512 t 734 t	180	210	240			—	140	130	360
51	—	737 t 1364 t	360 ¹¹⁾	240	360			10	140	120	330
			1980 : 10 = 200	2700 : 14 = 195	2340 : 9 = 260	1410 : 2 = 705			140	2950 : 24 = 125	7440 : 21 = 355

455

Bemerkungen.

In Spalte 2 bedeutet D einen Dampfer, der die Kähne ein- und ausschleppt und mitgeschleust wird; (D) bzw. (M) ist ein selbständiger Dampfer bzw. Motorboot ohne Verbindung mit dem Schleppzug. In Spalte 3 ist die Tragfähigkeit der beladenen Kähne in Tonnen angegeben. L = Leerkahn. P = Prahn.

Spalte 4 bis 23: Zeitangaben in Sekunden.

¹⁾ Zusammenstoß der Kähne in der Schleuse bei der Einfahrt.

²⁾ Drei Schiffe auf einmal schleusen.

³⁾ Vier Schiffe auf einmal schleusen.

zu Tal.

Verlust	Öffnen des Untertores	Verlust	Ausfahrt mit				Äußerer Verlust nach der Ausfahrt	Summe der Spalten 6 bzw. 8 bis 16 bzw. 18	Mittel von Spalte 4 und 20	Gesamte Schleusungs-dauer (Sp. 21 + 22)
			Wagen		Dampfer					
13	14	15	1. Abschn. 16	2. Abschn. 17	1. Ab-schn. 18	2. Ab-schn. 19	20	21	22	23
-	50	40	600 ¹⁾					2360 ¹⁾		
-	50	70	540					1860		
-	50	100	480					3000		
360	50	10	450					1980		
10	50	30	450					1620	} Summen aus Spalten 5 bis 17	
10	50	-	450		} 3660 : 8 = 430			2250		
10	50	90	300					1560		
10	50	120	450					1890		
10	50	60	540					1800		
10	50	30 ⁴⁾				450	180	420 ⁴⁾		2160
15	50	25 ⁴⁾				540	180	360 ⁴⁾	1830	420
15	50	55	270	120			270	1170	255	1425
10	50	60	270	120			210	1200	240	1440
10	50	30	360	150			330	1740	270	2010
10	50	60	390	150			540 ⁷⁾	1680	420	2100
5	50	35	330	150			510 ⁷⁾	1440	360	1800
10	50	30	360	150			(225)	1350	220	1570
10	50	70	420 ⁸⁾	150				1620		
10	50	30	270	90			180	2580		
10	50	30	510 ¹⁰⁾	60 ¹⁰⁾			240	2250	180	
10	50	30	570 ¹⁰⁾	60 ¹⁰⁾			180	1650	135	1785
10	50	-	210	90			150	990	150	1140
10	50	30	330	120			180	1350	200 + 180 2 = 190	1540
10	50	60	270	120			300	1260	240	1500
10	50	90	660 ¹⁰⁾	60 ¹⁰⁾			210	1770	285	2055
10	50	610 : 14 = 45	3060 : 10 = 305	1410 : 11 = 130	990 : 2 = 495	180	2250 : 10 = 225	17220 : 12 = 1435		18365 : 11 = 1670 Sek. = 28 Min.
			435		675					

Bemerkungen.

- ⁴⁾ Trosse des Schleppwagens gerissen. Ein- und Ausfahrt durch mitgeschleusten Dampfer.
- ⁵⁾ Strom wegen Arbeiten ausgeschaltet.
- ⁶⁾ Der zweite Kahn kommt später.
- ⁷⁾ Kähne der folgenden Schleusung durch Wind abgetrieben.
- ⁸⁾ Kähne in zwei Gruppen herausgezogen.
- ⁹⁾ Vergeblicher Versuch, drei Kähne auf einmal zu schleusen.
- ¹⁰⁾ Kähne einzeln herausziehen, damit sie trotz des starken Gegenwindes die nötige Fahrt bekommen.
- ¹¹⁾ Kähne liegen weit ab.

eine kleine Unregelmäßigkeit vor. Hier dürfen daher bei der Durchschnittsbildung (Spalte 23) nur solche Werte unberücksichtigt bleiben, deren Störungsursache außerhalb des gewöhnlichen Betriebs liegt. Sie wurden angestrichen.

So sind manche Zeitangaben wohl in der einen Richtung verwertbar, nicht aber in der anderen.

b) Ein- und Ausfahrt mit Schleppwagen und Dampfer.

Die Einfahrt erfolgte in den weitaus meisten Fällen durch den Schleppwagen. Sie dauert dann (Spalte 5 u. 6 der Tabellen 1 und 2) für beladene Kähne 455 Sek., für leere 355 Sek., für jene also 28% mehr. Vergleicht man in den beiden Abschnitten der Einfahrt (außerhalb und innerhalb der Schleuse) die Werte für beladene und leere Kähne miteinander, so ergibt sich, daß die beladenen im ersten Abschnitt 26%, im zweiten aber 30% mehr Zeit brauchen als leere. Die Größe dieses Unterschieds kann zufällig sein, bedingt durch die Auswahl der Messungen, er selbst besteht aber sicher aus einem rein praktischen Grund. Die Schiffer halten ihre schwer zu bremsenden beladenen Kähne lieber zu früh an und lassen sie dann ganz langsam vorlaufen, als daß sie sich der Gefahr aussetzen, die Herrschaft über den Kahn zu verlieren und irgendwo anzurennen. Eine reichliche Kammerlänge wird also den Betrieb erleichtern und die Schleusungszeit verkürzen.

In Ausnahmefällen werden die Kähne auch durch einen kleinen Bugsierdampfer eingeschleppt (Spalte 7 u. 8, Messung 22 bis 25), der Dampfer wird mitgeschleust. Bei leeren Kähnen dauert die Einfahrt dann etwa ebenso lang wie mit Wagenbetrieb, bei beladenen dagegen gut die Hälfte länger (705 gegen 455 Sek.). Da aber auch noch andere Gründe gegen diese Betriebsweise sprechen, wird sie nur als Notbehelf verwendet.

Der erste Teil der Einfahrt ist im allgemeinen recht gleichmäßig und nur dann mal etwas verzögert, wenn der Wagen vier besonders schwere Kähne vorzuziehen hat oder leere Kähne durch den Wind abgetrieben worden sind. Der zweite Teil dagegen erleidet öfter Störungen, vor allem, wenn mehr als zwei Schiffe auf einmal durchgeschleust werden sollen. Das macht sich schon bemerkbar, wenn ein Schleppdampfer mitgeht. Bisweilen liegen

auch gerade drei kleine Kähne hintereinander und sollen dann auf einmal geschleust werden. Das gibt immer unliebsamen Aufenthalt, namentlich, wenn es sich dann herausstellt, daß alles Zusammenschachteln nichts hilft und schließlich der dritte Kahn wieder herausgezogen werden muß (Messung 39 u. 41, Tabelle 2). Das darf nicht vorkommen.

Erfahrungsgemäß geben viele Schiffer die Länge ihrer Kähne ohne Ruder an, auch wenn sie es nicht ganz beidrehen können. Der Schleusenwärter dürfte sich also nur dann auf gleichzeitiges Durchschleusen von mehr als zwei Kähnen einlassen, wenn sie schmal genug sind, um wenigstens teilweise nebeneinander zu liegen, oder ihre Gesamtlänge rund 10 m unter der Schleusenlänge bleibt.

Eine Vergrößerung der Schleusenlänge um 10 oder 20 m wird in dieser Beziehung für den Betrieb nichts nützen, da die Kahn-längen ganz unregelmäßig sind und dann nur um so öfter der Versuch gemacht werden wird, durch Zusammenschachteln noch einen Kahn mehr durchzuschleusen.

Die Ausfahrt geschieht bei beladenen Kähnen meist mit dem Schleppwagen. Die Kähne werden etwa 150 m weit an-gezogen und fahren dann allein ohne Schwierigkeit auf ihren Platz im Vorhafen. Leere Kähne dagegen haben nur geringe Steuerfähigkeit und werden leicht vom Wind abgetrieben. Bei leeren Kähnen und nicht sehr ruhigem Wetter fährt deshalb nach dem Öffnen des Tores ein besonderer Bugsierdampfer rück-wärts in die Schleuse ein und zieht die Kähne heraus.

Um die beiden Betriebsmittel miteinander vergleichen zu können, muß man auch ihre besonderen Verluste in Rechnung stellen. Der Wagen kann 45 Sek. nach dem Öffnen des Tores mit dem Schleppzug anfahren (Tabelle 2, Spalte 15), der Dampfer erst nach 135 Sek. (Tabelle 1, Spalte 15). Für leere Kähne ergibt sich dann eine Ausschleppzeit:

1. bei Wagenbetrieb (Messung 1 und 3): $45 + 315 = 360$ Sek.
2. bei Dampferbetrieb (das Übliche): $135 + \underbrace{235 + 80}_{315} = 450$ Sek.

Hinsichtlich der eigentlichen Schleppeistung sind also auch hier bei leeren Kähnen wieder Dampfer und Wagenbetrieb gleich-

wertig, wegen der geringeren Verluste ist aber im ganzen der Wagenbetrieb dem Dampferbetrieb um 25% überlegen.

Bei beladenen Kähnen sind die Verluste dieselben, außerdem verschiebt sich aber auch noch die für die Anfahrt nötige Zeit sehr zu Ungunsten des Dampferbetriebs. Das läßt sich jetzt bei der Teilung der fraglichen Messungen besonders deutlich erkennen. Für den ersten Abschnitt, das eigentliche Anfahren, braucht der Wagen 305 Sek., der Dampfer 495 Sek. (Tabelle 2, Spalte 16, 18). Auch nach dieser Zeit ist die Geschwindigkeit des Dampfers nur etwa zwei Drittel von der des Wagens: Jener braucht 180 Sek. bis zur Beendigung der Ausfahrt, dieser 130 Sek. Im ganzen ergibt sich also für beladene Kähne eine Ausschleppzeit:

1. bei Wagenbetrieb (das Übliche): $45 + 305 + 130 = 480$ Sek.
2. bei Dampferbetrieb: $135 + 495 + 180 = 810$ Sek.

Der Wagenbetrieb ist also fast um 70% überlegen.

Wird ausnahmsweise der Bugsierdampfer mitgeschleust, so kann er natürlich sofort nach dem Öffnen des Tores anfahren, der Verlust (135 bzw. 45 Sek.) fällt dann ganz fort.

Aus allem geht die große Überlegenheit des Schleppwagenbetriebs klar hervor. Besondere Bugsierdampfer sind bei ungünstigem Wetter zum Ausschleppen der leeren Kähne nicht zu entbehren. Gibt man ihnen dazu wirtschaftlich gerechtfertigte Abmessungen, so arbeiten sie, wenn sie ausnahmsweise beladene Kähne schleppen müssen, sehr ungünstig. Die starken, eigentlich für den Verkehr auf den Kanalhaltungen bestimmten Schleppdampfer sind an reiner Zugkraft selbst bei beladenen Kähnen dem Wagen etwa gleich (Tabelle 1, Spalte 18/19, Messung 7—13), wegen anderer Verluste sind aber auch sie beim Ausschleppen ungünstiger als der Wagen. — Das Mitschleusen von Dampfern ist beim Rhein-Herne-Kanal im Entwurf nicht vorgesehen (Schleusenlänge = 2 Kahnlängen und 5 m), bei kleineren Kähnen ist es natürlich möglich, bewirkt aber eine Vergrößerung der Schleusungszeit. Für das gleichzeitige Schleusen mehrerer Schiffe ist eine reichliche Kammerlänge wünschenswert.

c) Der „äußere Verlust“.

Zwischen der Ausfahrt des einen und der Einfahrt des nächsten Schleppezuges entsteht ein Zeitverlust, der äußere Verlust. Er

rechnet, wie oben dargelegt, von dem Augenblick, wo die Schleuse frei wird, bis zu dem Augenblick, wo die Spitze des nächsten Schleppzuges einfährt. Er hängt ab von dem geschickten Steuern des Schiffers, von der Windrichtung und -stärke und von der Geschicklichkeit des Schleusenwärters.

Der Einfluß der Windes ist besonders dann recht störend, wenn er leere, ausfahrende Kähne gegen die zur nächsten Einfahrt bereitstehenden Kähne treibt. In solchem Fall ist der an sich ungünstigere Dampferbetrieb nicht zu entbehren.

Die beiden anderen Faktoren unterliegen menschlichen Einflüssen, sie können darum recht schwankend sein. Zu besonderen Ausstellungen gaben sie im allgemeinen keinen Anlaß. Verkennen ließ es sich aber trotzdem nicht, daß die mehr oder weniger große Geschicklichkeit der Schleusenwärter auf die Dauer doch eine recht bedeutende Rolle spielt. Soweit dagegen Maßnahmen der Schiffsbesetzungen in Frage kommen, wird es bei den vielen beteiligten Köpfen wohl kaum möglich sein, den Durchschnitt der äußeren Verluste noch wesentlich herabzudrücken.

Die Dauer der äußeren Verluste beträgt bei gemischtem Betrieb (Ausfahrt mit Dampfer, Einfahrt mit Wagen) 200 Sek., bei reinem Wagenbetrieb 225 Sek. Im ersten Fall ist der Wagen eher wieder bereit, den neuen Schleppzug anzuziehen, als im zweiten. Daß der Unterschied so gering ist, erklärt sich daraus: Der ausfahrende Schleppzug gibt die Fahrstraße nicht eher wieder frei. Man muß also bestrebt sein, die ausfahrenden Kähne möglichst schnell beiseite zu schaffen, um Platz für den neuen Schleppzug zu bekommen.

Die Dauer des äußeren Verlustes hängt davon ab, wie die Kähne der beiden Schleppzüge im Augenblick des Schleusenwechsels zueinander liegen. Um eine günstige Lage für den wartenden Schleppzug sichtbar festzulegen, ordnet man Leitwerke an, auf denen sich oft auch Anlagen zum Bewegen der Schiffe befinden. Welcher Grundriß für die Leitwerke ist nun der zweckmäßigste?

Engels schlägt in seinem Handbuch vor, die Leitwerke genau in Verlängerung der einen Kammermauer zu erbauen, weil dann die Schiffe am bequemsten in gerader Linie in die Schleuse einfahren könnten. Das letzte Schiff des ausfahrenden Schleppzuges steht in dem Augenblick, wo sein Heck die Schleuse

verläßt, noch fast genau in Schleusenachse. Erst von da ab kann es merkbar drehen, um die Fahrstraße frei zu machen. Es hat eine Längsgeschwindigkeit von etwa 1 m/sek (Tabelle 2, Spalte 17), wird also, bis es genügend zur Seite gewichen ist, noch mindestens $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$ Schiffslängen zurückgelegt haben. Aus Sicherheitsgründen muß demnach die Spitze des einfahrenden Schleppzuges etwa $1 + 1 = 2$ Schiffslängen von der Schleuse abbleiben. Bei einer mittleren Einfahrtsgeschwindigkeit von 0,6 m/sek (Tabelle 2, Spalte 5) und einer Schiffslänge von 80 m beträgt dann die Dauer des äußeren Verlustes:

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{80}{1,0} + \frac{2 \cdot 80}{0,6} = 53 + 267 = 320 \text{ Sek.}$$

Die Leitwerke an den Schleusen des Rhein-Herne-Kanals sind nicht gerade, sondern weichen zunächst von der Schleuse an auf eine Schiffslänge um eine Schiffsbreite zurück und verlaufen dann noch etwa 40 m weiter parallel zur Schleusenachse. Hier kann also die Spitze des wartenden Schleppzuges unbedenklich bis auf eine Schiffslänge an die Schleuse heranrücken. Bei der kürzeren Einfahrtstrecke sei die mittlere Geschwindigkeit 0,5 m/sek. Dann ist die Dauer des äußeren Verlustes: $\frac{2}{3} \cdot \frac{80}{1,0} + \frac{80}{0,5} = 53 + 160 = 213$ Sek., wie auch in Wirklichkeit gemessen wurde. Der sanfte Knick zwischen Leitwerk und Schleuse hat, entgegen den Befürchtungen von Engels, im wirklichen Betrieb keinerlei Schwierigkeiten bereitet, wohl aber ist dadurch eine beträchtliche Zeitersparnis erreicht worden. Die Anlagen am Rhein-Herne-Kanal müssen deshalb als die zweckmäßigeren bezeichnet werden.

Aus der eben angestellten Rechnung läßt sich übrigens auch erkennen, daß eine wesentliche Ersparnis beim äußeren Verlust nicht mehr zu erreichen ist. Selbst wenn man die Richtung des Leitwerks stärker knicken wollte, um die wartenden Schiffe dichter an die Schleuse heranzubringen, wird das Gesamtergebnis nicht viel günstiger, da dann die mittlere Einfahrtsgeschwindigkeit immer mehr abnimmt.

Die Dauer der äußeren Verluste wird sinngemäß je zur Hälfte der vorhergehenden und der nachfolgenden Schleusung zugerechnet. Eine Schleusung rechnet somit von der Mitte eines äußeren Verlustabschnitts bis zur Mitte des nächsten. Bei dieser Dar-

stellungsweise ist man unabhängig von dem Begriff der „Doppelschleusung“ und kann Schleusungen zu Berg und zu Tal besonders betrachten.

d) Ein- und Ausfahrt mit Spill.

Unmittelbare Vergleiche zwischen den bisher besprochenen Einrichtungen zur Schiffsbewegung und einer Spillanlage waren leider nicht möglich.

In der Zeitschrift für Bauwesen 1921, S. 248 wird über Schleusungszeiten einer einschiffigen Schleuse mit Spillausrüstung, der Schachtschleuse bei Minden, berichtet. Sie ist 85 m im Lichten lang und 10 m breit. Auf der Schleusenplattform stehen zwei Spills, je eines am Ober- und Unterhaupt, ein drittes befindet sich am Unterhaupt außerhalb des Tores in Höhe des unteren Leitwerks. Die Messungen sind nur getrennt nach den fünf Hauptabschnitten einer Schleusung (vgl. S. 15) ohne Angabe von dazwischenliegenden Verlusten. Es wurden dabei für Ausfahrt und Einfahrt folgende Mittelwerte gemessen: Im Oberwasser $198 + 288 = 486$ Sek., im Unterwasser $230 + 307 = 537$ Sek. Der Unterschied beider Werte erklärt sich wohl durch den etwas erschwerten Betrieb am Unterhaupt einer Schachtschleuse. Für einen Vergleich mit den offenen Schleusen des Rhein-Herne-Kanals wird deshalb der erste Wert richtiger sein. Dort wurde für die gleichen Vorgänge (vom Öffnen des Tores bis zum Schließen einschließlich aller Verluste) gemessen:

$$45 + 305 + 225 + 260 = 835 \text{ Sek.}$$

In den $835 - 486 = 349$ Sek. Mehrverbrauch muß der zweite Kahn der Schleppzüge aus- und vorsichtig wieder einfahren (einschließlich Spielraum je etwa 85 m). Das ergibt eine mittlere

Geschwindigkeit von $\frac{2 \cdot 85}{349} = 0,5$ m/sek, was wohl der Wirklichkeit entspricht.

Nach dieser rohen Schätzung sind Spill und Schleppwagen bei einschiffigen Schleusen ungefähr gleichwertig; ob sie es auch bei langen Schleppzugsschleusen sind, erscheint zweifelhaft. Die Trossen müßten bei Spillbetrieb auf weite Entfernungen von Hand ausgebracht werden, was sicher Verzögerungen verursacht, wenn nicht natürliche Pausen dazu ausgenutzt werden. Außerdem wird die Anzugsstrecke zu kurz.

e) Das Bewegen der Tore.

Das Bewegen der Tore liegt durch die Maschineneinrichtung in engen Grenzen fest. Trotzdem ist aber die Dauer dieses Vorgangs bei den beiden Häuptern sehr verschieden. Im Unterhaupt sind Schiebetore angeordnet, die an einer besonderen Brücke aufgehängt sind. Öffnen und Schließen dauert je 50 Sek. Das Oberhaupt wird durch Klapptore verschlossen. Öffnen und Schließen dauert je 140 Sek., also 90 Sek. länger als am Unterhaupt. Bei der im Bau befindlichen Schleuse bei Duisburg (zweite Mündung des Rhein-Herne-Kanals) erhalten sämtliche Häupter Schiebetore, die 90 Sek. werden also gespart.

f) Das Füllen und Leeren der Schleuse.

1. Beobachtungen im wirklichen Betrieb.

Die Zeit für das Füllen und Leeren einer Schleusenkammer hängt zunächst vom Gefälle ab. Das schwankt aber bei den Schleusen des Rhein-Herne-Kanals, an denen Messungen vorgenommen wurden, in so engen Grenzen, daß sich daraus nicht die großen Unterschiede bei den einzelnen Aufnahmen erklären lassen. Sie rühren vielmehr aus praktischen Ursachen her. Beim Leeren der Schleuse liegen die Fahrzeuge verhältnismäßig ruhig. Die Betriebsgeschwindigkeit kann also groß sein. Das Leeren der Schleuse dauert 355 Sek. (Tabelle 2, Spalte 12). Beim Füllen dagegen werden selbst große Kähne stark hin und her geworfen, beladene, die tiefer tauchen, mehr als leere. Das Füllen der Schleuse dauert bei leeren Kähnen 445 Sek., bei beladenen sogar 525 Sek. (Tabelle 1, Spalte 12). Besonders störend ist es, wenn ein leichtes Motorboot zunächst am Oberhaupt liegt. Solch kleine Fahrzeuge sollten grundsätzlich erst am Schluß eines Schleppzuges einfahren.

Die Schleusungszeit kann also abgekürzt werden durch eine mäßige Vergrößerung der Schleusenlänge, denn dann haben die Schiffe bei Schwankungen mehr Spielraum und können weiter vom Oberhaupt abbleiben. Ebenso kann sie abgekürzt werden durch Vergrößerung der Schleusentiefe, denn dann können sich die Wassermassen in einem größeren Querschnitt ungestörter austoben.

2. Theoretische Grundlagen und neue Vorschläge.

Die Verhältnisse für Füllen und Leeren liegen bei den Schleusen des Rhein-Herne-Kanals insofern besonders ungünstig, als nur kurze Umläufe in den Häuptern vorhanden sind. Der Kanal führt durch ein Gebiet, unter dem ein lebhafter Bergbau umgeht. Auf Grund der früheren Erfahrungen mußte mit starken und recht ungleichmäßigen Senkungen gerechnet werden. Die fast 200 m langen Schleusen wurden daher in mehrere, ganz unabhängig bewegliche Teile zerlegt. Wegen der Gefahr von Hinterspülungen erschien es dabei nicht angängig, die Umlaufkanäle auf die ganze Länge des Bauwerks durchzuführen, es sollten vielmehr nur kurze Umläufe in den Häuptern angeordnet werden. Sie mußten, wenn die Zeit für das Füllen und Leeren nicht zu groß werden sollte, recht beträchtliche Querschnitte erhalten. Um dabei vor unliebsamen Überraschungen geschützt zu sein, erhielt daher vor Aufstellung des endgültigen Entwurfs die Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau in Charlottenburg den Auftrag, die Vorgänge, die beim Füllen und Leeren von Schleusen auftreten, näher zu erforschen. Es wurden sehr eingehende Untersuchungen angestellt, deren Ergebnisse in mancher Weise grundlegend für unsere heutige Erkenntnis waren [13]. Sie müssen daher hier kurz erwähnt werden. Es ergab sich, daß in Schleusen von der geplanten Form die Bewegungen der Schiffe im wesentlichen drei Einflüssen zuzuschreiben sind.

Beim Füllen entsteht in der Nähe des Oberhauptes eine Sogkraft. Das aus den Umläufen ausströmende Wasser trifft den unteren Teil des Kammerquerschnitts und erzeugt, bis es sich auf die ganze Fläche verteilt hat, im oberen Teil eine entgegengerichtete Wasserbewegung, die durch ihr Spiegelgefälle die Schiffe gegen das Oberhaupt zieht. Durch eine geeignete Form der Auslaufmündung (Trompetenform) lassen sich die Sogkräfte wesentlich vermindern. Immerhin sind sie aber auch beim wirklichen Betrieb noch deutlich zu beobachten.

In einiger Entfernung vom Oberhaupt hat sich die Wasserbewegung dann auf den ganzen Querschnitt verteilt, es entsteht damit eine nach dem Unterhaupt hin gerichtete Strömung, der die Schiffe ebenfalls standhalten müssen. Die dadurch entstehenden Kräfte kann man als Strömungswiderstand bezeichnen.

Es leuchtet ein, daß diese Kräfte um so geringer sind, je größer die Wassertiefe in der Kammer ist.

Die Strömung nach dem Unterhaupt behält aber nun nicht dauernd ihren vollen Wert, sondern nimmt zeitweise bis auf Null ab. Der Wasserspiegel in der Kammer erhöht sich nämlich nicht gleichmäßig, sondern mehr oder weniger stoßweise in Wellen, die vom Oberhaupt zum Unterhaupt und wieder zurücklaufen. Bei diesen Schwingungserscheinungen entstehen Kräfte, die den Schiffen recht gefährlich werden können, vor allem, weil sie ständig ihre Richtung wechseln.

Aus diesen drei Einflüssen setzen sich am Rhein-Herne-Kanal im wesentlichen die Bewegungen der geschleusten Schiffe zusammen. Verschiedene Form und Lage der Kähne können namentlich bei den Schwingungserscheinungen manche Abweichungen von dem allgemeinen Bild erzeugen, die Grundlagen bleiben aber allemal unverändert. Sie müssen daher bekämpft werden, wenn man Erfolg haben will.

Bei weitem am stärksten sind die Kräfte, die infolge der wellenartigen Spiegelschwankungen auftreten. Es hat sich nun durch Rechnung und Versuch ergeben, daß gerade diese Kräfte nicht von der Menge q des sekundlich zugeführten Wassers abhängen, sondern nur von der Veränderung der Wasserzufuhr $\frac{\Delta q}{\Delta t}$.

Je langsamer die Wassermengen zunehmen, desto länger und flacher werden die Wellen in der Kammer, und um so geringer sind die Druckunterschiede, die die Schiffe hin und her werfen. Am Rhein-Herne-Kanal hat man deshalb die Schützenwinden so eingerichtet, daß es über zwei Minuten dauert, bis der ganze Umlaufquerschnitt freigegeben ist. Dadurch sind die Wirkungen der wellenartigen Spiegelschwankungen auf ein ziemlich ungefährliches Maß eingeschränkt, sie sind jetzt kaum mehr so groß wie die der beiden anderen Kräfte, die zunächst viel unbedeutender waren. Neben der Hauptforderung: Langsames Öffnen der Schützen, hat man jetzt also auch auf Maßnahmen zu sinnen, um die Wirkungen der beiden anderen Kräfte abzuschwächen.

Im Gegensatz zu den Schwingungsbewegungen hängen die Sogkraft und der Strömungswiderstand bei sonst gleichen Verhältnissen von den Wassermengen ab, die sekundlich zugeführt werden. Die Schleusenwärter sind deshalb angewiesen, die Um-

läufe nicht gleich ganz freizugeben, sondern sie je nach der Druckhöhe in der Schleuse nacheinander $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ und voll zu öffnen. Verfolgt man diese Vorgänge rechnerisch, so ergeben sich recht ungleiche Werte.

$$q^{\text{cm}^3/\text{sek}} = f(y) = \mu u \sqrt{2gy}.$$

Dabei ist y die Druckhöhe, beim Füllen vom Oberwasser aus gemessen, beim Leeren vom Unterwasser aus. μ ist ein Durchflußbeiwert, der die Gesamtheit aller Reibungs- und Strömungsverluste berücksichtigt. Über seine Größe finden sich eingehende Untersuchungen im Anhang II auf

S. 55ff. Es ist zunächst zulässig, μ als unveränderlich zu betrachten. u ist ein beliebiger Teil des ganzen Umlaufquerschnitts U . Setzt man nun nacheinander $u = \frac{1}{3}U$; $= \frac{2}{3}U$; $= \frac{3}{3}U$, so erhält man für q nebenstehende drei Kurven (Abb. 1). Wenn sich die Schützen nicht plötzlich öffnen, verläuft der Übergang von einer Parabel zur nächsten nicht waagrecht, sondern etwa nach der punktierten Linie.

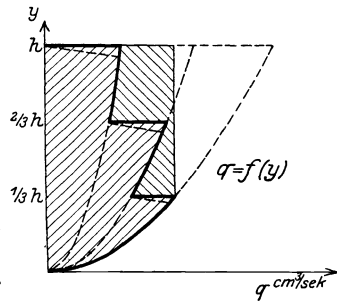


Abb. 1.

Die Abszissen des links schraffierten Teiles geben dann die Wassermengen an, die jeweils durch den Umlauf fließen.

Sie schwanken recht ungleichmäßig, woraus zu schließen ist, daß sicher nicht zu allen Zeiten mit der größten, praktisch möglichen Leistung gearbeitet wird.

Eine Ersparnis an Schleusungszeit läßt sich also erreichen, indem man beim Füllen und Leeren der Kammer dauernd, solange die Druckhöhe ausreicht, die größte zulässige Wassermenge anwendet.

Es entsteht nun die Frage: Wie hoch sind diese Wassermengen, und wie weit kann man eine Wassermenge, die man in einem Augenblick für unschädlich hält, dauernd zulassen?

Maßgebend ist zunächst die Größe der Absenkung, die man während des Füllens im anschließenden Oberwasserkanal der Schleuse für statthaft hält, oder die Anschwellung im Unterwasser. In beiden Fällen gibt es eine gewisse höchste Wassermenge q , deren Größe man in der Zeiteinheit nicht überschreiten, die man aber beliebig lange ab- oder zuführen darf. Dieser Wert

liegt bei neueren Binnenkanälen etwa bei $50 \text{ m}^3/\text{sek}$. Beim Füllen und Leeren von Schleusen wird man also versuchen, diesen Wert möglichst lange auszunutzen.

Nicht ganz so einfach zu beantworten ist die Frage nach der Größe der zulässigen Füllwassermenge, wenn man die Wirkung innerhalb der Schleuse betrachtet.

In den Schleusen des Rhein-Herne-Kanals hängen die Bewegungen der Schiffe von der Sogkraft, dem Strömungswiderstand und den Schwingungserscheinungen ab. Die Größe der beiden ersten Kräfte schwankt mit der Menge q des in der Zeiteinheit zugeführten Wassers, die der dritten Kraft mit der Veränderung $\frac{\Delta q}{\Delta t}$ der jeweils zugeführten Wassermengen. Außerdem hat sich bei den obenerwähnten Charlottenburger Versuchen durch Beobachtung und Rechnung gezeigt, daß alle drei Kräfte am größten sind bei großem Druckgefälle und ebenso bei geringer Wassertiefe in der Kammer. Beim Füllen der Schleusen fallen beide Wirkungen mit ihren Höchstwerten zeitlich zusammen, beim Entleeren dagegen auseinander. Man hat darum zwei Fälle zu unterscheiden.

Beim Entleeren der Schleuse liegen die Schiffe ziemlich ruhig. Die Betriebsgeschwindigkeit kann so weit gesteigert werden, wie es die Rücksicht auf das Unterwassersturzbett und ähnliche Bauteile zuläßt. Die abgelassenen Wassermengen müssen sich also so ändern, daß die an der Umlaufmündung frei werdende lebendige Kraft dauernd die gleiche Größe behält. Es läßt sich nun leicht zeigen, daß diese lebendige Kraft ziemlich unabhängig vom Druckgefälle ist und nur von der Wassermenge abhängt.

Die beim Schleusen abgeführte Wassermenge schwankt je nach dem Druckgefälle und der Schützöffnung. Nimmt man nun während eines Versuches gleiche Wassermengen q in der Zeiteinheit an, so ist bei dem Anfangsgefälle nur eine geringe Schützöffnung nötig. Dafür herrscht unter dem Schütz eine große Wassergeschwindigkeit. Diese große Geschwindigkeit wird sich aber kaum weit halten, sondern sich bei den mehrfachen Krümmungen der Umlaufkanäle sehr bald auf deren ganzen Querschnitt verteilen (wenn auch natürlich nicht gleichmäßig!). Man wird daher auch am Ende kurzer Umläufe für gleiche Wassermengen bei allen Gefällen mit ziemlich gleicher Austrittsgeschwindigkeit rechnen

können, d. h. also, die Austrittsgeschwindigkeit und damit auch die frei werdende lebendige Kraft ist nur von den zugeführten Wassermengen abhängig, nicht aber vom Druckgefälle.

Im Unterwasser herrscht dauernd (annähernd) die gleiche Wassertiefe. Wenn also in einem Augenblick eine Ausflußmenge als unschädlich anzusehen ist, so ist sie es immer.

Beim Entleeren einer Schleuse hat man also dauernd die gleiche Wassermenge abzuführen. Man gewinnt dadurch zu dem bisherigen Teil der Leistungskurve (Abb. 1) noch das rechts schraffierte Stück hinzu.

Beim Füllen einer Schleuse dagegen ist das Ausschlaggebende die Rücksicht auf die Schiffe. Die Wassertiefe an der Umlaufmündung wird immer größer, bei gleichen Zuflußmengen werden also die Wirkungen aller drei störenden Kräfte allmählich abnehmen. Da die Sogkraft und der Strömungswiderstand von den zugeführten Wassermengen abhängen und ständig in derselben Richtung wirken, kann man unbedenklich beim Füllen einer Schleuse die Zuflußmengen allmählich so anwachsen lassen, daß diese beiden Kräfte dauernd ihren gleichen größten Wert behalten. Da die Wasserzunahme jetzt wesentlich langsamer geschehen wird als zu Beginn der Schleusung, braucht man nicht zu befürchten, daß schädliche neue Schwingungen in der Kammer, die sich zu den bereits vorhandenen addieren könnten, entstehen werden. Ganz allgemein wird man diese Forderung so fassen: Beim Füllen der Kammer sollen die zugeführten Wassermengen sich so ändern, daß die Schiffe möglichst dauernd gleich große Angriffe erfahren. Dies Bestreben, beim Füllen der Schleuse mit wachsenden Zuflußmengen zu arbeiten, kommt, wenn auch unvollkommen, bereits in der jetzt am Rhein-Herne-Kanal üblichen Staffelvorschrift zum Ausdruck.

Nach welchem Gesetz die Wassermengen beim Füllen nun zunehmen sollen, läßt sich theoretisch wohl kaum ermitteln, denn neben den hier erwähnten Einflüssen treten noch mancherlei Wirbelerscheinungen und andere Störungen auf. Um Versuche wird man doch nicht herumkommen. Das Nächstliegende ist es wohl, die Füllwassermengen im selben Verhältnis zunehmen zu lassen wie die Wassertiefe in der Kammer. An Hand von Zahlenbeispielen wird weiter unten dargelegt werden, was mit den hier gemachten Vorschlägen zu erreichen ist.

3. Die Steuerung der Schützenwinde.

Wenn man nun, um den Betrieb zu verbessern, derartige Anforderungen an die Steuerung der Schützenwinde stellt, kann man sich nicht mehr auf die Willkür und Geschicklichkeit eines Wärters verlassen. Der Steuervorgang muß vielmehr maschinenmäßig festgelegt werden. Nur dann hat man die Gewißheit, daß die theoretisch mögliche Leistung auch wirklich voll ausgenutzt wird. Außerdem kann man jetzt dauernd bis dicht an eine Gefahrgrenze herangehen, da keine Möglichkeit besteht, sie zu überschreiten. Man mag nun zwar einwenden, daß auch die feinste Maschine nicht für alle Fälle in der Praxis genügen kann, ein Mensch ist immer anpassungsfähiger und weniger starr. Aber sicher wird man trotzdem bei genügender Erfahrung eine Anlage schaffen können, deren Vorteile im allgemeinen bei einem so großen Betrieb die Nachteile in einzelnen wenigen Fällen bei weitem überwiegen.

Eine maschinenmäßig festgelegte Steuerung der Schützenwinde ist aber noch aus einem anderen Grunde wünschenswert.

Nach dem Schließen eines Tores muß der Schleusenwärter zum anderen Haupt gehen, um dort die Schützen der Umläufe zu öffnen. Dadurch entsteht bei jeder Schleusung ein Verlust von rund 2 Minuten (Spalte 11 in Tabelle 1 u. 2). Er läßt sich vermeiden, wenn die Maschinenanlage in geeigneter Weise abgeändert wird. Es bieten sich dazu mehrere Wege.

Eine Steuerung aller Teile von einer gemeinsamen Stelle aus, etwa der Mitte der Schleuse, empfiehlt sich am Rhein-Herne-Kanal nicht, da stets mehrere, ganz verschieden lange Schiffe auf einmal geschleust werden müssen. Der Wärter kann also in den meisten Fällen nur durch eigenen Augenschein an Ort feststellen, ob er das Tor schließen kann oder nicht. Es wäre nun aber möglich, einen zweiten Wärter am andern Tor aufzustellen, der dort sofort auf ein Zeichen hin die Umläufe öffnet. Eine Sicherung, daß die Umläufe im Ober- und Unterhaupt nicht gleichzeitig geöffnet werden können, ließe sich wohl unschwer treffen. Solch doppelte Besetzung ist grundsätzlich aber unwirtschaftlich, selbst wenn, wie am Rhein-Herne-Kanal, ein zweiter Wärter (zur Ablösung an Tagen starken Betriebes) zur Stelle ist.

Es muß vielmehr eine Einrichtung getroffen werden, daß der Wärter die Umlaufschützen auch schon vom anderen Haupt aus

durch Fernschaltung in Gang setzen kann, ehe er zum Ausfahrthaupt geht. Nun darf es aber nicht mehr möglich sein, daß die Schützenwinde, wenn sie sich selbst überlassen bleibt, weiterläuft, bis der Umlauf ganz freigegeben ist. Der Wärter kann unterwegs aufgehalten werden, die Steuerung der Schützenwinde muß also auch aus diesem Grunde maschinenmäßig so festgelegt sein, daß in keinem Augenblick der Umlauf übermäßig weit geöffnet werden kann.

4. Berechnung der Füll- und Leerzeit.

Damit sind die Anforderungen an die Bewegung der Umlaufschützen festgelegt. Es ist nun zu untersuchen, nach welchen Gesetzen dementsprechend die Steuerung zu erfolgen hat, und was gegenüber dem bisherigen Zustand gewonnen wird.

α) **Füll- und Leerzeit beim bisherigen Zustand.** Das Bild der bisher üblichen staffelförmigen Entleerung der Schleuse ist bereits in Abb. 1 gegeben worden. Um die Dauer der einzelnen Vorgänge zu bestimmen, geht man von der Grundgleichung für den Schleusenbetrieb aus:

$$dQ = \mu u \sqrt{2gy} \cdot dt = -F dy,$$

wo F die Grundfläche der Schleusenkammer bedeutet. Aus der zweiten Gleichung wird durch Integration $y = f(t)$ ermittelt und in die erste eingesetzt:

$$\begin{aligned} \frac{\mu u \sqrt{2g}}{F} dt &= -\frac{dy}{\sqrt{y}} \\ \sqrt{y} &= \frac{\mu u \sqrt{2g}}{2F} t + \sqrt{h} \\ dQ &= \left[-\mu^2 g \frac{u^2}{F} t + \mu u \sqrt{2gh} \right] dt \\ Q &= -\frac{\mu^2 g}{2F} u^2 t^2 + \mu \sqrt{2gh} ut \end{aligned}$$

Daraus nach einigen Umformungen:

$$ut = \frac{F}{\mu} \sqrt{\frac{2h}{g}} \left[1 \stackrel{(+)}{\sqrt{1 - \frac{Q}{hF}}} \right] \quad (1)$$

$Q^{[m^3]}$ ist die Menge des abgelaufenen Wassers. Also nacheinander $= \frac{1}{3} Fh$; $\frac{2}{3} Fh$; $\frac{3}{3} Fh$ zu setzen. In jedem Fall erhält man einen

bestimmten festen Wert für den Ausdruck ut (unveränderliches μ vorausgesetzt). Durch beliebige Wahl von $u = \frac{1}{3}U; \frac{2}{3}U; \frac{3}{3}U$ findet man daraus die Werte t', t'', t''' . Die Zeiger 1, 2, 3 mögen andeuten, daß der Wert t vom Beginn der Schleusung bis zum Ende des I., II., III. Abschnitts rechnet, die Zeiger I, II, III die Dauer dieser Abschnitte angeben.

Für die Verhältnisse am Rhein-Herne-Kanal wurde angenommen:

Kammerfläche $F = 1780 \text{ m}^2$,

Gesamtgefälle $h = 5 \text{ m}$,

Umlaufquerschnitt U im Unterhaupt = $8,28 \text{ m}^2$, im Oberhaupt $7,60 \text{ m}^2$.

Für die Durchflußbeiwerte μ ist im I., II. und III. Abschnitt zu setzen (vgl. S. 62 u. 66):

im Unterhaupt $\mu = 0,90; 0,82; 0,82$,

im Oberhaupt $\mu = 1,00; 0,85; 0,70$.

Dann findet man

im Unterhaupt:		im Oberhaupt:	
$t_1' = 133 \text{ Sek.}$	$t_I = 133 \text{ Sek.}$	$t_1' = 131 \text{ Sek.}$	$t_I = 131 \text{ Sek.}$
$t_1'' = 73 \text{ ,,}$	}	$t_1'' = 77 \text{ ,,}$	}
$t_2'' = 168 \text{ ,,}$		$t_2'' = 176 \text{ ,,}$	
$t_2''' = 112 \text{ ,,}$	}	$t_2''' = 142 \text{ ,,}$	}
$t_3''' = 265 \text{ ,,}$		$t_3''' = 338 \text{ ,,}$	
	$t_{II} = 95 \text{ ,,}$	$t_{II} = 99 \text{ ,,}$	
	$t_{III} = 153 \text{ ,,}$	$t_{III} = 196 \text{ ,,}$	

Bisher war angenommen worden, daß die Umläufe immer gleich ganz bis auf den gewünschten Teil ihres Querschnitts geöffnet werden. In Wirklichkeit dauert aber das Bewegen der Schützen geraume Weile. Wegen des kleineren mittleren Querschnitts läuft in dieser Zeit weniger Wasser ab, als bisher angenommen. z sei die Dauer der Schützbewegung. Die während dieser Zeit abgelaufene Wassermenge wird bei voll geöffneten Schützen in einer kürzeren Zeit s ablaufen. Dann müssen die bisher gefundenen Werte von t_I, t_{II}, t_{III} für die Füllzeit in den einzelnen Staffeln um die Maße $z - s$ vergrößert werden, wenn man die langsame Schützbewegung berücksichtigen will.

Zwischen den Größen s und z läßt sich nun, wenn man die Durchflußbeiwerte μ als unveränderlich betrachtet, eine einfache

Beziehung aufstellen. Der Umlaufquerschnitt u nehme von einem Wert u_1 zur Zeit t_1 auf u_2 zur Zeit t_2 zu. Dann ist:

$$\frac{u - u_1}{u_2 - u} = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}$$

$$u = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} t + \frac{u_1 t_2 - u_2 t_1}{t_2 - t_1} = at + b. \quad (2)$$

Diesen Ausdruck führt man in die Grundgleichung ein an Stelle des bisher unveränderlichen Wertes u :

$$\mu u \sqrt{2gy} dt = -F dy$$

$$(at + b) dt = -\frac{F}{\mu \sqrt{2g}} \frac{dy}{\sqrt{y}}$$

$$\frac{a}{2} (t^2 - t_1^2) + b(t - t_1) = \frac{2F}{\mu \sqrt{2g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{y}) \quad (3)$$

Für $t = t_2$ werde $y = h_2$:

$$\frac{a}{2} (t_2^2 - t_1^2) + b(t_2 - t_1) = \frac{2F}{\mu \sqrt{2g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}).$$

Setzt man für a und b die richtigen Werte ein, so ergibt sich:

$$\frac{1}{2}(u_2 - u_1)(t_2 + t_1) + u_1 t_2 - u_2 t_1 = \frac{2F}{\mu \sqrt{2g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}).$$

Für unveränderliches u hatte man oben bei gleicher Absenkung $h_1 - h_2$ gefunden [Gl. (1), S. 35]:

$$ut = \frac{F}{\mu} \sqrt{\frac{2h_1}{g}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(h_1 - h_2)F}{h_1 F}} \right] = \frac{2F}{\mu \sqrt{2g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}).$$

Es ist also:

$$\frac{1}{2}(u_2 - u_1)(t_2 + t_1) + u_1 t_2 - u_2 t_1 = ut$$

$$\frac{u_1 + u_2}{2} (t_2 - t_1) = ut. \quad (4)$$

Die Füllzeiten gleicher Kammerabschnitte verhalten sich also bei unveränderlichem und bei geradlinig veränderlichem Umlaufquerschnitt wie die mittleren Querschnitte. Voraussetzung dabei

ist, daß sich die Durchflußbeiwerte μ in den Vergleichszeiten nicht oder nur wenig ändern¹⁾.

Im vorliegenden Fall dauert es im Unterhaupt $z = 110$ Sek., im Oberhaupt $z = 144$ Sek., bis der ganze Umlauf freigegeben ist. Auf jeden der drei Bewegungsabschnitte entfalle davon ein Drittel. Der mittlere Querschnitt während der drei Abschnitte ist $\frac{1}{6} U$; $\frac{3}{6} U$; $\frac{5}{6} U$. Dann erhält man:

$$s_I = \frac{z}{3} \frac{\frac{1}{6} U}{\frac{1}{3} U} = \frac{z}{6}; \quad s_{II} = \frac{z}{3} \frac{\frac{3}{6} U}{\frac{2}{3} U} = \frac{z}{4}; \quad s_{III} = \frac{\frac{5}{6} U}{\frac{3}{3} U} = \frac{5}{18} z.$$

Die Füllzeit der einzelnen Abschnitte ist also zu vergrößern um:

$$\frac{z}{3} - \frac{z}{6} = \frac{z}{6}; \quad \frac{z}{3} - \frac{z}{4} = \frac{z}{12}; \quad \frac{z}{3} - \frac{5}{18} z = \frac{z}{18};$$

und man erhält:

Leeren:	Füllen:
$133 + \frac{110}{6} = 151 \text{ Sek.}$	$131 + \frac{144}{6} = 155 \text{ Sek.}$
$95 + \frac{110}{12} = 104 \text{ ,,}$	$99 + \frac{144}{12} = 111 \text{ ,,}$
$153 + \frac{110}{18} = 159 \text{ ,,}$	$196 + \frac{144}{18} = 204 \text{ ,,}$

Im ganzen wird also bei vorschrittmäßigem Staffelnbetrieb das Leeren der Kammer 414 Sek., das Füllen 470 Sek. dauern.

β) Leerzeit beim Vorschlag für das Unterhaupt. Für das Unterhaupt soll nun eine Anlage gewählt werden, die dauernd gleiche Wassermengen abfließen läßt. Das Bewegungsgesetz lautet also: $Q = f(u) = \text{const}$.

$$\mu_1 u_1 \sqrt{2gy_1} = \mu_2 u_2 \sqrt{2gy_2} = \mu u \sqrt{2gy}.$$

¹⁾ Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß sich in dem Bericht über die bereits mehrfach erwähnten Versuche in der Charlottenburger Versuchsanstalt [13] ein Irrtum findet. Auf S. 339 wird die Füllzeit von Schleusen in Abhängigkeit von der Schleusenfüllung zeichnerisch dargestellt [$Q = f(t)$]. Bei gleichbleibendem Umlaufquerschnitt ist diese Kurve wohl eine Parabel, bei veränderlichem dagegen nicht eine Gerade, sondern eine Kurve vierter Ordnung. Näheres darüber findet sich im Anhang I (S. 53).

Gemäß der Schlußbemerkung auf S. 62 darf man setzen:

$\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Es ist also: $\frac{u}{u_1} = \sqrt{\frac{y_1}{y}}$ oder $u^2 y = u_1^2 y_1$. Der Wert Q soll dauernd etwa so groß sein wie bisher der größte Wert. Der ergab sich (Abb. 1), wenn man die Umlaufschützen ganz öffnete, nachdem die Druckhöhe bereits auf ein Drittel gefallen war.

$$Q_{\max} = \mu U \sqrt{2g \frac{h}{3}} = \mu \frac{U}{\sqrt{3}} \sqrt{2gh}.$$

Denselben Wert Q_{\max} erhält man also, wenn zu Beginn der Schleusung die Schützöffnung $\frac{U}{\sqrt{3}}$ beträgt. Die Bewegungsgleichung für die Unterhauptschützen würde also lauten:

$$u^2 y = \frac{U^2 h}{3}. \quad (5)$$

Das ist die Gleichung einer Hyperbel (Abb. 2). Entwickelt man daraus mit Hilfe der Grundgleichung die Beziehung $u = f(t)$, auf die es ja bei Konstruktion der Schützenwinde ankommt, so erhält man ebenfalls eine hyperbolische Linie $u^2 t = \text{const.}$ Das Stück, das von dieser Kurve benutzt wird, ist indes so kurz, daß man es ohne großen Fehler durch eine Gerade ersetzen kann. Für eine einfache Ausbildung des Triebwerks ist dieser Umstand natürlich von großer Bedeutung.

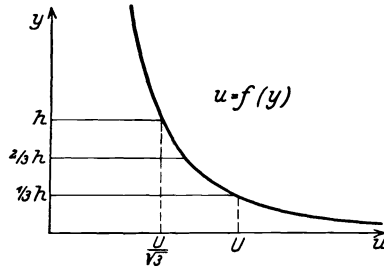


Abb. 2.

Der zu Beginn der Schleusung erforderliche Umlaufquerschnitt $\frac{U}{\sqrt{3}}$ kann natürlich auch nicht mit einem Schlage hergestellt werden, die Schützen müssen vielmehr, um Schwankungen in der Kammer zu vermeiden, ganz allmählich bis auf diesen Wert geöffnet werden. Auch diese Bewegung kann nach einer Geraden erfolgen,

deren Steigung etwa so beibehalten wird, wie man sie bisher als zweckmäßig erprobt hat¹⁾.

Die Schützbewegung setzt sich demnach aus zwei geradlinigen Abschnitten zusammen (Abb. 3): Zunächst die Schützen

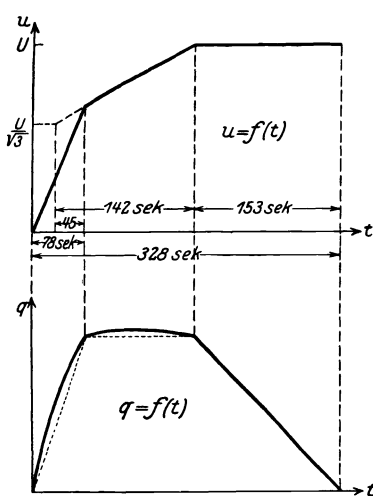


Abb. 3.

etwa bis auf $\frac{U}{\sqrt{3}}$ geöffnet werden, von da ab gleichmäßig weiter, bis bei einer Druckhöhe $y = \frac{h}{3}$ der ganze Umlauf freigegeben ist.

Abb. 3 gibt weiter, daraus abgeleitet, ein Bild des Wasserabflusses $q^{[m^3/sek]} = f(t)$.

Im ersten und zweiten Teil (u ist geradlinig veränderlich) besteht die q -Linie aus zwei schwach gekrümmten kubischen Parabeln. Die Ableitung kann hier unterbleiben, sie läßt sich mit den bereits bekannten Beziehungen führen, wenn man nur überall berücksichtigt, daß u jetzt ver-

änderlich $= at + b$ ist. Wichtig dagegen ist die Frage nach der Zeit, die während des Leerens der beiden ersten Abschnitte vergeht.

¹⁾ Es sei dabei auf einen Vorschlag von Dr.-Ing. Winkel [17] hingewiesen, durch den man gerade zu Beginn der Schleusung eine besonders geringe Zunahme des Wasserzuflusses erreichen kann. Er bildete den Umlaufquerschnitt $ABCDE$ an der

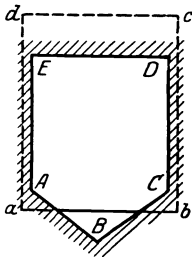


Abb. 4.

Verschlußstelle so aus, daß der untere Teil dreieckig ist (Abb. 4). Die Schütztafel $abcd$ bewege sich gleichmäßig, dann nehmen die freigegebenen Querschnitte zunächst nicht gleichmäßig zu, sondern nach einer Parabel. Der Übergang von Null auf eine bestimmte Wassermenge q , die dem Querschnitt ABC entspricht, ist also augenscheinlich viel sanfter, als es bisher bei rechteckiger Begrenzung der Fall war. In der Tat sind bei Versuchen mit dieser Anordnung günstige Erfahrungen gemacht worden. Zweckmäßig erscheint der Vorschlag vor allem für das Oberhaupt beim Füllen, wo er außerdem bei Zylinderschützen ohne Änderung der Betonkonstruktion auch nachträglich ausgeführt werden kann.

Für dauernd voll geöffneten Umlauf war bereits auf S. 36 gefunden worden: $t_2''' = 112$ Sek. Daraus läßt sich zunächst ein Zwischenwert z_2 ableiten unter der Annahme, daß der Umlaufquerschnitt sich ändert und zwar von $\frac{U}{\sqrt{3}}$ bis U . Der mittlere Querschnitt ist dann:

$$\frac{U}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + 1 \right) = 0,789 U$$

$$z_2 = t_2''' \cdot \frac{U}{0,789 U} = \frac{112}{0,789} = 142 \text{ Sek.}$$

(Würde man nicht, wie es hier als praktisch zweckmäßig angenommen wurde, die Schützbewegung zeitlich gleichmäßig erfolgen lassen, sondern nach dem Gesetz $u^2 y = \frac{U^2 h}{3}$, um genau gleichmäßige Wassermengen zu erhalten, so ergäbe sich $z_2 = 152$ Sek. Der Unterschied ist also gering.)

Der endgültige Wert T_2 , der auch noch das langsame Öffnen des Schützes zu Anfang berücksichtigt, kann nun allein mit Hilfe der Verhältnisbeziehung nicht gefunden werden, weil jetzt zwei Unbekannte auftreten. Die Bewegung erfolgt zunächst nach der Geraden $u = \frac{U}{z} t$ (dabei ist $U = 8,28 \text{ m}^2$; $z = 110$ Sek.), sodann nach der Geraden

$$\frac{u - \frac{U}{\sqrt{3}}}{U - u} = \frac{t}{z_2 - t}, \quad \text{d. h. } u = \frac{U}{z_2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) t + \frac{U}{\sqrt{3}}$$

($z_2 = 142$ Sek.)

Dabei zählt t bei den beiden Geraden von verschiedenen Nullpunkten! s_1 und s_2 mögen solche Werte von t sein, wo bei beiden Geraden gleich viel Wasser abgelaufen ist. Dann ist zunächst $s_1 : s_2 = u_{2m} : u_{1m}$, wo sich die mittleren Querschnitte u_m aus den Gleichungen der beiden Geraden einsetzen lassen. Außerdem müssen an dem Brechpunkt der Schützbewegung, wo also die beiden Geraden zusammenstoßen, die Querschnitte u in beiden Fällen gleich groß sein. (Diese letzte Bedingung wurde bisher unbewußt erfüllt, weil die eine Gerade allemal eine Parallele zur

t -Achse war: $u = \text{const.}$) Aus diesen beiden Bedingungen findet man dann s_1 und s_2 :

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 t & u_{1m} &= \frac{a_1}{2} s_1 \\ u_2 &= a_2 t + b & u_{2m} &= \frac{a_2}{2} s_2 + b \\ 1. \quad u_{1m} s_1 &= u_{2m} s_2 & \frac{a_1 s_1^2}{2} &= \frac{a_2 s_2^2}{2} + b s_2 \\ 2. & & a_1 s_1 &= a_2 s_2 + b \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich für s_2 die Gleichung:

$$s_2^2 \left(\frac{a_2^2}{2 a_1} - \frac{a_2}{2} \right) + s_2 \left(\frac{a_2 b}{a_1} - b \right) = \frac{b^2}{2 a_1}. \quad (6)$$

Setzt man hier die für das Unterhaupt gültigen Werte ein

$$\left[a_1 = \frac{U}{z} = \frac{8,28}{110} = 0,0752; \quad a_2 = \frac{U}{z_2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0,0247; \right. \\ \left. b = \frac{U}{\sqrt{3}} = 4,78 \right],$$

so erhält man $s_2 = 45$ Sek. und weiter $s_1 = 78$ Sek. Es ist also $T_2 = 142 + (78 - 45) = 175$ Sek.

Der dritte Abschnitt der q -Linie (u ist unveränderlich) besteht aus einer Geraden. Das ergibt sich ohne weiteres, wenn man den früher (S. 35) gefundenen Wert $\sqrt{y} = at + b$ in die Gleichung $q = \mu u \sqrt{2gy}$ einsetzt. Die Zeit für das Leeren im dritten Abschnitt bei unveränderlichem u ist bereits oben (S. 36) gefunden worden: $t_{III} = 153$ Sek. Das Leeren des dritten Abschnitts allein dauert also fast ebenso lange wie das der beiden ersten zusammen. Abhelfen kann man diesem Mißverhältnis durch Vergrößern des Umlaufquerschnitts, was namentlich bei kurzen Umläufen wohl noch möglich ist. Erstrebenswert wird es sein, daß erst kurz vor dem Ausspiegeln der volle Umlaufquerschnitt freigegeben wird. Bei so großen Querschnitten bietet die Maschinensteuerung die beste Sicherheit, daß trotzdem kein Schaden angerichtet werden kann.

Im ganzen dauert das Leeren der Schleuse bei Annahme gleicher Wassermengen also $175 + 153 = 328$ Sek. gegenüber 414 Sek. bei dem bisherigen Verfahren. Das bedeutet eine Ersparnis von 21%, und zwar, ohne daß die Schiffe oder irgendein Bauwerksteil mehr beansprucht werden, als es bisher der Fall war.

γ) **Füllzeit beim Vorschlag für das Oberhaupt.** In ähnlicher Weise wie für das Unterhaupt lassen sich auch Gesetze aufstellen für die Schützbewegung im Oberhaupt. Es soll zunächst der oben gemachte Vorschlag untersucht werden, die Wassermengen beim Füllen einer Schleuse im selben Maße anwachsen zu lassen, wie die Wassertiefe in der Kammer zunimmt.

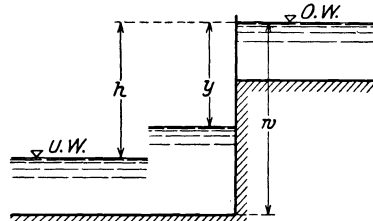


Abb. 5.

$$q^{[m^3/sek]} = f(\mu u) = C(w - y)$$

$$\frac{\mu u \sqrt{2gy}}{\mu_1 u_1 \sqrt{2gy_1}} = \frac{w - y}{w - y_1}.$$

Nach den Darlegungen auf S. 66 ist beim Oberhaupt zu setzen :

$$\mu = 1,15 - \frac{0,45}{U} u = a - bu.$$

Die allgemeine Gleichung geht dann über in

$$\frac{(au - bu^2)\sqrt{y}}{w - y} = \frac{\mu_1 u_1 \sqrt{y_1}}{w - y_1}.$$

Für den Festwert der rechten Seite werde eine Annahme gemacht, die einen Vergleich mit den wirklichen Verhältnissen ermöglicht:

Zu Beginn der Schleusung ($y_1 = h$) sei $u_1 = \frac{U}{3}$. Dazu gehört ein Wert $\mu = 1,0$. Es ist also:

$$\frac{(au - bu^2)\sqrt{y}}{w - y} = \frac{\frac{U}{3} \sqrt{h}}{w - h} = C.$$

Hieraus eine Beziehung $u = f(t)$ abzuleiten, macht Schwierigkeiten. Man kann sich außerdem leicht überzeugen, daß diese Gleichung als Grundlage für die Schützenbewegung kaum zu

brauchen ist. Für $u = U$ werde $y = Y$. Das Schleusungsgefälle h sei wieder 5 m, die Drenpeltiefe am Unterhaupt $w - h = 4,5$ m. Dann erhält man $Y = 2,66$ m. Also noch ehe die Druckhöhe auf die Hälfte gefallen ist (2,5 m), ist der Umlauf bereits voll geöffnet. Das wird man bei ähnlichen Verhältnissen wie am Rhein-Herne-Kanal als regelmäßige Betriebsgeschwindigkeit kaum zulassen.

Dies Ergebnis führt zu einem anderen Vorschlag. Die Schützen sollen wie beim Staffeltbetrieb zu Beginn der Schleusung ein Drittel, und wenn die Druckhöhe auf ein Drittel gesunken ist, voll geöffnet sein. Sie sollen sich nun aber nicht stoßweise, sondern gleichmäßig bewegen. Es wird sich zeigen, daß man dabei eine wesentlich kürzere Füllzeit als bisher erreicht. Zur Berechnung dienen die drei Gleichungen:

$$\mu u \sqrt{2gy} \cdot dt = -F dy$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu = 1,15 - \frac{0,45}{U} u \\ u = \frac{U}{3} + \frac{2}{3} \frac{U}{T} t \end{array} \right\} \mu u = a + bt + ct^2.$$

Dabei ist T die Füllzeit von $y = h$ bis $y = \frac{h}{3}$

$$(a + bt + ct^2) dt = -\frac{F}{\sqrt{2g}} \frac{dy}{\sqrt{y}}$$

$$at + \frac{bt^2}{2} + \frac{ct^3}{3} = \frac{2F}{\sqrt{2g}} (\sqrt{h} - \sqrt{y}).$$

Löst man diese Gleichung auf für $t = T\left(y = \frac{h}{3}\right)$, so ergibt sich $T = 182$ Sek. Beim staffelförmigen Betrieb dagegen dauerte das Füllen der gleichen Abschnitte $131 + 111 = 242$ Sek., also gerade ein Drittel mehr. Der Wert T muß noch verbessert werden, da sich die Schützen zu Beginn der Schleusung langsam bis auf $\frac{U}{3}$ öffnen. Es wird dazu der auf S. 41 abgeleitete Rechnungsgang benutzt. Die Abweichung, daß μ jetzt veränderlich ist, hat auf das

Ergebnis keinen großen Einfluß. Mit denselben Bezeichnungen wie oben hat man dann:

$$a_1 = \frac{7,60}{144} = 0,0528; \quad a_2 = \frac{2}{3} \frac{7,60}{182} = 0,0278; \quad b = \frac{7,60}{3} = 2,533,$$

und es ergibt sich

$$s_2 = 40 \text{ Sek. und } s_1 = 69 \text{ Sek.}$$

Zählt man nun gleich noch die Fülldauer des dritten Abschnittes hinzu $t_{0 III} = 196$ Sek. (S. 36), so erhält man als gesamte Füllzeit der Kammer bei gleichmäßig zunehmendem Zufluß: $T_{\text{Füllen}} = 182 + (69 - 40) + 196 = 407$ Sek. gegenüber 470 Sek. beim Staffelbetrieb. Also auch beim Füllen einer Schleuse lassen sich noch wesentliche Zeitersparnisse machen, ohne daß der Betrieb mehr gefährdet wird als bisher.

Für die im wirklichen Betrieb gemessenen Füllzeiten ergeben sich zwei verschiedene Werte, je nachdem ob ein beladener oder leerer Kahn dem Oberhaupt zunächst liegt. Diesen Unterschied kann man auch bei Maschinensteuerung nicht ganz vermeiden, wenn man nicht von vornherein auf den Vorteil verzichten will, daß man bei leeren Kähnen die Kammer schneller füllen kann als bei vollen. Die Steuerung im Oberhaupt sollte also, wenigstens im Bereich der Geraden 2, mit doppelter Übersetzung ausgerüstet sein.

Die bisher gewonnenen Ergebnisse seien noch einmal kurz zusammengestellt. Die Messungen im wirklichen Betrieb hatten ergeben für das Leeren einer Schleuse 355 Sek., für das Füllen bei beladenen Kähnen 525 Sek., bei leeren Kähnen 445 Sek. Bei vorschriftsmäßigem Staffelbetrieb dauert das Leeren 414 Sek., das Füllen 470 Sek. Vorgeschlagen wird für das Unterhaupt eine Anlage für unveränderliche Wasserführung, für das Oberhaupt eine Anlage für gleichmäßig zunehmende Wasserführung. Das Leeren dauert dann 328 Sek., das Füllen 407 Sek.

Die neu aufgestellten Vorschläge sind so gewählt worden, daß die Leistungen, die bisher nach der Vorschrift zulässig waren, restlos ausgenutzt, aber ihre Höchstwerte in keinem Augenblick überschritten werden. Dadurch sind Zeitersparnisse von etwa 20% möglich, ohne daß die Schiffe unruhiger liegen werden, als es bisher der Fall war.

Im wirklichen Betrieb wird in manchen Fällen schneller geschleust, als es nach der Vorschrift möglich ist. Der Gewinn, den man dann noch durch Maschinensteuerung erzielen kann, ist natürlich nicht mehr so groß, aber doch immer noch lohnend.

Der Staffelbetrieb, der jetzt der einzig mögliche ist, bleibt immer stoßartig. Die für die Schiffe noch erträglichen Höchstwassermengen können immer nur für Augenblicke erreicht werden. Um diese Höchstwerte möglichst oft zu erhalten, braucht man also eine starke Zunahme der Zuflußmengen, d. h. eine große Schützgeschwindigkeit. Das ist aber durchaus unerwünscht, weil dadurch die für die Schiffe so gefährlichen Schwingungserscheinungen in der Kammer entstehen. Jeder gleichmäßige Betrieb ist daher grundsätzlich dem staffelförmigen überlegen.

Hat man sich nun entschlossen, die Handsteuerung durch die Maschinensteuerung zu ersetzen, so wird man diese natürlich nicht auf den allgemeinen Vorschriften aufbauen, wie es hier geschehen ist, um zunächst einmal einen brauchbaren Vergleich zu haben, sondern auf den im wirklichen Betrieb erreichten Leistungen, denn bei denen haben sich ja keinerlei Anstände ergeben. Man wird sogar noch weitergehen. Durch die zwangsläufige Bewegung der Schützenwinde ist man vor willkürlichen Unvorsichtigkeiten des Schleusenwärters geschützt. Man wird daher durch Versuche im Großen, die ohnehin für jede Schleusenform und die dort verkehrenden Schiffe besonders gemacht werden müssen, feststellen, welche Größtwerte von q bei den verschiedenen Druckhöhen für Schiffe und Bauwerk noch zulässig sind. Die Schützenwinde muß dazu, etwa wie es am Rhein-Herne-Kanal der Fall ist, mit einem Zeiger versehen sein, an dem sich jederzeit die Stellung des Schützes ablesen läßt. Trägt man die so gefundenen Werte zeichnerisch übereinander, so kann man mit ziemlicher Sicherheit bestimmen, bis zu welchen Leistungen man dauernd gehen darf, und welche Beobachtungen nur Spitzenwerte darstellen. Auf Grund dieser Entscheidung wird man dann eine Probeanlage ausführen, deren Übersetzungsverhältnis zweckmäßig auch noch verstellbar ist.

5. Die mittlere Hubgeschwindigkeit einer Schleuse.

Aus Füllhöhe und Füllzeit einer Schleuse kann man die „mittlere Hubgeschwindigkeit“ berechnen. Sie ist von jeher

ein beliebter Begriff gewesen, um die Leistungen verschiedener Schleusen miteinander zu vergleichen. Für praktische Zwecke hat das sicher Wert, man will wissen, wie schnell man eine bestimmte Hubhöhe überwinden kann. Wenn es sich aber darum handelt, den inneren, absoluten Wert verschiedener Schleusenkonstruktionen gegeneinander abzuwiegen, ist ein solcher Vergleich doch nur mit großer Vorsicht zu verwenden. Der Begriff der mittleren Hubgeschwindigkeit ist ein rein rechnerischer Wert, er erfaßt die Schwierigkeiten, die beim Schleusen in den verschiedenen Fällen zu überwinden sind, nur sehr unvollkommen.

Es wurde bereits oben darauf hingewiesen, daß der Hauptpunkt beim Schleusen, die ruhige Lage der Schiffe beim Füllen der Kammer, nur verhältnismäßig wenig von der Hubgeschwindigkeit beeinflußt wird. Eine geringe Hubgeschwindigkeit allein bietet noch keine Gewähr für gefahrloses Schleusen. Vielmehr können die Schiffe bei großer Hubgeschwindigkeit, wenn man nur die Umlaufschützen zu Beginn langsam öffnet, ruhiger liegen als bei kleiner Hubgeschwindigkeit und schnellem Öffnen der Schützen.

Bei Schleusen mit kleinem Gefälle ist die mittlere Hubgeschwindigkeit bei sonst gleichen Verhältnissen geringer als bei großem Gefälle. Für voll geöffneten Umlaufquerschnitt U ergibt sich die Füllzeit $T = \frac{2\sqrt{h} F}{\mu \sqrt{2g} U}$, wo F die Kammerfläche ist.

Früher war es üblich, den Wert $\frac{U}{F}$ ziemlich unveränderlich $= \frac{1}{200} \sim \frac{1}{250}$ zu wählen [5, S. 54]. Dann ist also $T = c\sqrt{h}$ und

die mittlere Hubgeschwindigkeit $v = \frac{h}{T} = c_1\sqrt{h}$. Dies Ergebnis

ändert sich auch nicht wesentlich, wenn man bei Schleusen mit großem Gefälle zunächst nur einen Teil des Umlaufs frei gibt. Bei gleichem Umlaufquerschnitt ändert sich also die mittlere Hubgeschwindigkeit von Schleusen mit ihrem Gefälle.

Vor allem aber ist, wenn man die Hubgeschwindigkeit zweier Schleusen vergleichen will, die Art ihrer Füllanlagen zu berücksichtigen. Man kann dabei drei Gruppen unterscheiden: Schleusen mit Kopffüllung (Öffnungen in den Toren, kurze Umläufe in den Häuptern), Schleusen mit Seitenfüllung, deren Füllkanäle aber

von Kopf her gespeist werden (Schleusen mit gewöhnlichen langen Umläufen, Sparschleusen, deren Sparbecken in der Längsrichtung nebeneinanderliegen), Schleusen mit reiner Seitenfüllung, deren Füllkanäle in der Schleusenmitte oder symmetrisch dazu gespeist werden (Schleusen mit doppeltem Umlauf nach Zeitschrift für Bauwesen 1921, S. 249, Sparschleusen mit übereinanderliegenden Sparbecken).

Die größten Schwierigkeiten bietet das Füllen bei der ersten Gruppe. Wenn man es auch gelernt hat, die gefährlichen Schwingungserscheinungen ganz wesentlich einzuschränken, ein Rest bleibt immer noch. Und alle Bewegungen wirken hier nur in der Längsrichtung der Schleuse, wo die Schiffe am schlechtesten zu halten sind. Wenn man bei einem Vergleich in allen Fällen nun eine gleich unruhige Lage der Schiffe zuläßt, so wird man bei Kopffüllung die geringste Hubgeschwindigkeit erreichen können.

Weiter kommt es bei solchen Schleusen sehr darauf an, wie lang sie sind. Denn da ein großer Teil der bewegenden Kräfte rein von der Menge des zugeführten Wassers abhängt, kann man die Zuflußmenge bei wachsender Kammerlänge nicht im selben Verhältnis steigern. Eine Schleppzugschleuse mit Kopffüllung muß also eine geringere Hubgeschwindigkeit haben als eine ähnliche einschiffige Schleuse. Wollte man die Hubgeschwindigkeit beider miteinander vergleichen, so müßte man auch unter sonst gleichen Verhältnissen die der Schleppzugschleuse mit einem Faktor vergrößern. Der Wert dieses Faktors liegt für eine zweischiffige Schleuse zwischen 1 und 2, er wächst, je geringer die Geschwindigkeit der Umlaufschützen ist, je größer also der Anteil der reinen Massenkräfte gegenüber den Schwingungskräften ist. Ermitteln könnte man ihn z. B. bei langen Schleppzugschleusen mit Mittelhaupt, wo alle sonstigen Verhältnisse ähnlich sind.

Bei Füllanlagen der zweiten Gruppe erleiden die Schiffe vor allem quergerichtete Kräfte, denen sie leicht widerstehen können. Die Hubgeschwindigkeit kann deshalb grundsätzlich größer sein als bei Schleusen der ersten Art. Ganz vermeiden lassen sich längsgerichtete Kräfte aber auch hier nicht, unter Umständen können sie sogar recht bedeutende Werte annehmen. Wenn nämlich die Umlaufschützen plötzlich geöffnet werden, tritt das Wasser mit großer Gewalt zunächst nur aus den ersten Stichkanälen nahe dem Oberhaupt in die Kammer, es müssen dann

natürlich ähnliche Schwingungserscheinungen auftreten wie bei reiner Kopffüllung. Da die Schwingungswellen, wenn sie einmal vorhanden sind, infolge der Spiegelung nur langsam abnehmen, vermeidet man in diesem Fall mit den langen, teuren Umlaufkanälen nur das Auftreten von Längsströmungen aus den Massenkraften. Wie wenig vorteilhaft eine solche Anlage im Betrieb sein kann (nicht sein muß), zeigt ein Beispiel vom Dortmund-Ems-Kanal [18, S. 443]: Schleppzugschleusen mit senkrechten Wänden, 165 m lichter Länge und 10 m Breite (wie beim Rhein-Herne-Kanal), aber mit nur 3,30 m Gefälle, mit langen Umläufen von 5,20 m² Querschnitt haben nach dem Entwurf eine Füllzeit von 10 Min., im wirklichen Betrieb aber von 15 bis 20 Min., da die Schützen mit Rücksicht auf die Wasserbewegung erst nicht ganz geöffnet werden. Die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals haben kurze, allerdings 7,60 m² große Umläufe, dafür aber 5,0 m Gefälle. Trotzdem beträgt die wirkliche Füllzeit nur etwa 7—9 Min.

Die vorteilhaftesten Füllanlagen sind zweifellos die der dritten Gruppe. Solange das Wasser den Umlaufkanälen in der Mitte oder symmetrisch zur Mitte zugeführt wird, können keine Längsströmungen oder Schwingungen auftreten, und die quergerichteten Kräfte sind ungefährlich. Diese Schleusen können also aus rein konstruktiven Gründen eine größere Hubgeschwindigkeit haben als andere.

Der Begriff der mittleren Hubgeschwindigkeit kann also wohl praktisch einen gewissen Vergleich zwischen verschiedenen Schleusen ermöglichen, in dem er die Betriebserfolge aufzeigt, er allein läßt aber nicht ohne weiteres einen Schluß über den inneren Wert der einzelnen Anlagen zu. Eine Konstruktion, die durch ungünstige äußere Umstände bedingt ist, kann trotz geringer Hubgeschwindigkeit technisch eine gute Lösung darstellen.

g) Die Gesamtdauer einer Schleusung.

Bei Berechnung der Durchschnittswerte für die Gesamtdauer einer Schleusung wurden mit Absicht nur ganz ungewöhnliche Fälle ausgeschlossen. Ein praktischer Betrieb hat mit vielen Zufälligkeiten zu rechnen, sie zu leugnen, wäre falsch.

Die Gesamtdauer einer Schleusung rechnet (vgl. S. 26) von der Mitte eines äußeren Verlustabschnitts bis zur Mitte des

nächsten (Tabelle 1 und 2, Spalte 21—23). Es ergibt sich, daß die Schleusungsdauer bei der Bergfahrt leerer Kähne ebenso groß ist wie bei der Talfahrt beladener, je etwa 1700 Sek. Was die leeren Kähne bei der Ein- und Ausfahrt gewinnen, setzen sie dann beim Füllen der Kammer wieder zu. Die Bergfahrt beladener Kähne dauert etwa um den Unterschied der Füllzeit länger als ihre Talfahrt, also $525 - 355 = 170$ Sek.

Das Durchschleusen beladener Kähne dauert zu Tal 28, zu Berg 31 Min., das Durchschleusen leerer Kähne 26 und 28 Min.

Von dieser Gesamtschleusungszeit geht ein großer Teil auf die Verluste. Deren Summe beläuft sich bei gemischtem Betrieb (Einfahrt mit Wagen, Ausfahrt mit Dampfer) auf:

$$\frac{225}{2} + 130 + 135 + \frac{200}{2} = 475 \text{ Sek. ,}$$

bei reinem Wagenbetrieb auf:

$$\frac{225}{2} + 130 + 45 + \frac{225}{2} = 400 \text{ Sek.}$$

Beim Rhein-Herne-Kanal machen somit die Verluste bei einer Schleusung rund ein Viertel der Gesamtdauer aus.

Einige Verluste sind unvermeidlich, andere können vermieden werden. Auch einige Vorgänge des eigentlichen Schleusungsgeschäftes lassen sich noch abkürzen. Im ganzen ergeben sich dann folgende Ersparnisse:

Äußerer Verlust, Einfahrt und Schließen des Untertores bleiben unverändert. Die 130 Sek. Verlust zwischen dem Schließen des Tores und dem Öffnen der Schützen können fortfallen. Beim Leeren der Kammer sind mindestens 30 Sek., beim Füllen im Durchschnitt 90 Sek., im Mittel etwa 60 Sek. zu sparen. Das Öffnen und Schließen des Obertores dauert mit 140 Sek. ebenfalls zu lange. Das Klapptor der Schachtschleuse Minden, das allerdings etwas niedriger ist, wird in 25 Sek. bewegt [20, S. 248]. Man wird also sicher mit dem Wert, mit dem auch das Schiebeter im Unterhaupt bewegt wird (50 Sek.), auskommen können. Das bedeutet 90 Sek. Ersparnis. Die Dauer der Ausfahrt bleibt unverändert. Die Gesamtersparnis beträgt dann $130 + 60 + 90 = 280$ Sek., das sind beinahe 20% der bisherigen Schleusungsdauer.

IV. Zusammenfassung.

Das Schleusen bestand im Anfang aus einzelnen, ganz unregelmäßigten Arbeitsvorgängen, die untereinander keinen festen Zusammenhang hatten. Ein Betrieb, d. h. eine ununterbrochene, gesetzmäßige Aufeinanderfolge derselben Vorgänge hat sich erst ausgebildet, als die Verkehrsdichte genügend gewachsen und durch Maschinen wenigstens die am stärksten veränderlichen, menschlichen Einflüsse ersetzt worden waren. Beispiele für die einfachste Art des Schleusens bietet die Fahrt durch Wehrlücken und Stauschleusen. Durch Anordnung von zwei einfachen Stauschleusen dicht hintereinander wird das Schleusen wesentlich ungefährlicher für die Schiffe. Diese Bauwerke bilden in Deutschland den Übergang zur Kammerschleuse (14. Jahrhundert).

Bis Mitte des vorigen Jahrhunderts ging die Entwicklung des Schleusenwesens nur sehr langsam vor sich. Von da ab aber brachte das Aufkommen der Kraftmaschinen und die durch die Eisenbahnen geförderte allgemeine Belebung des Wirtschaftsverkehrs auch den Schleusen einen ungeahnten Aufschwung in konstruktiver und betriebstechnischer Hinsicht. Als Beispiel für einen modernen Schleusenbetrieb werden die Verhältnisse am Rhein-Herne-Kanal dargestellt. Es ergaben sich dabei folgende Gesichtspunkte:

Um den Zusammenhang zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleusungen darzustellen, empfiehlt es sich, den Begriff der „äußeren Verlustzeit zwischen zwei Schleusungen“ einzuführen. Sie rechnet von dem Augenblick, wo der letzte Kahn des einen Schleppzuges die Schleuse verläßt, bis zu dem Augenblick, wo die Spitze des nächsten Schleppzuges in die Schleuse einfährt. Da der äußere Verlust je zur Hälfte der vorhergehenden und der nachfolgenden Schleusung zugeteilt werden muß, ist die Mitte des äußeren Verlustes der gegebene Zeitpunkt, von dem an man die Gesamtdauer einer Schleusung zu rechnen hat. Willkürliche Annahmen wie bisher fallen damit fort.

Die Hälfte der gesamten Schleusungsdauer entfällt auf Einfahrt, Ausfahrt und äußeren Verlust, also gewissermaßen Nebenarbeiten der eigentlichen Schleusung. Auf ihre Beschleunigung ist somit besonderer Wert zu legen.

Zum Ein- und Ausschleppen der Kähne ist der Schleppwagen das geeignetste Hilfsmittel. Eine Spillanlage ist bei einschiffigen Schleusen ungefähr gleichwertig, bei mehrschiffigen dagegen unterlegen. Zum Ausschleppen leerer Kähne sind bei ungünstigem Wind besondere Bugsierdampfer nicht zu entbehren, obwohl sie an sich weniger vorteilhaft sind.

Bei sehr wechselnden Kahngrößen empfiehlt sich ein Mitschleusen der Schleppdampfer nicht, wenn die Schleppzüge ohnehin zerlegt werden müssen und darum also für das Wechseln der Schlepper zwischen zwei Haltungen keine besondere Zeit vergeht.

Eine reichliche Kammerlänge und -tiefe erleichtern den Schleusenbetrieb.

Erfolgt das Füllen und Leeren der Kammer mittelbar (durch lange Umläufe) oder unmittelbar (durch kurze Umläufe oder Torschützen) von Kopf her, so müssen die Umlaufschützen langsam geöffnet werden, damit in der Kammer keine Schwingungserscheinungen auftreten. Die Umlaufquerschnitte sollen möglichst groß sein, dadurch kann besonders der letzte Teil der Füllzeit, wo der Wasserausgleich wegen des geringen Gefälles sehr langsam vor sich geht, wesentlich abgekürzt werden.

Zu Beginn des Füllens und Leerens werden große Umläufe nur teilweise geöffnet, um Gefahren für Schiffe und Bauwerk zu vermeiden. Die weitere Bewegung der Schützen erfolgte bisher absatzweise und wurde von Hand geregelt. Zweckmäßiger aber ist gleichmäßige Bewegung und Maschinensteuerung. Es soll dann beim Leeren der Kammer stets die gleiche Wassermenge abgeführt werden, beim Füllen dagegen sollen die Wassermengen so zunehmen, daß die Schiffe während der ganzen Schleusungsdauer stets die gleichen Angriffe erfahren.

Die Gesamtdauer einer Schleusung am Rhein-Herne-Kanal kann um etwa 20% verringert werden. Dabei sind noch nicht einbegriffen Ersparnisse durch Vergrößern der Umläufe und Ersparnisse bei Ein- und Ausfahrt und äußerem Verlust.

Anhang.

I. Über Schleusenfüllung bei gleichmäßig wachsendem Umlaufquerschnitt.

Zur Zeit t_1 ist die Umlauföffnung u_1 , das Druckgefälle y_1 ; die Wassermenge Q_1 ist bereits abgelaufen. Die Umlauföffnung nimmt gleichmäßig zu bis u_2 zur Zeit t_2 (y_2 ; Q_2). Gesucht $Q = f(t)$ zwischen t_1 und t_2 .

Allgemein ist:

$$dQ = \mu u \sqrt{2gy} dt.$$

Auf S. 37 war gefunden worden [Gl. (2) und (3)]:

$$u = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} t + \frac{u_1 t_2 - u_2 t_1}{t_2 - t_1} = at + b$$

$$\sqrt{y} = \sqrt{y_1} - \frac{a\mu\sqrt{2g}}{4F} (t^2 - t_1^2) - \frac{b\mu\sqrt{2g}}{2F} (t - t_1).$$

Diese beiden Gleichungen werden in die allgemeine Gleichung eingesetzt und integriert. In den meisten Fällen wird man t von t_1 aus rechnen, man hat also $t_1 = 0$; $Q_1 = 0$.

Dann ist:

$$Q = -\frac{a^2\mu^2g}{8F} t^4 - \frac{ab\mu^2g}{2F} t^3 + \left[\frac{a\mu}{2} \sqrt{2gh} - \frac{b^2\mu^2g}{2F} \right] t^2 + b\mu\sqrt{2gh} \cdot t.$$

Man erhält also für Q eine Gleichung vierten Grades. Eine wesentliche Vereinfachung tritt ein, wenn auch $u_1 = 0$ ist, wie es zu Beginn der Schleusung der Fall ist. Dann ist $u = \frac{U}{z} t$, wobei z die Zeit bedeutet, innerhalb der der Umlauf ganz geöffnet wird. Man hat $a = \frac{U}{z}$ und $b = 0$. Die Gleichung für Q geht dann über in

$$Q = -\frac{\mu^2g}{8F} \left(\frac{U}{z}\right)^2 t^4 + \frac{\mu}{2} \sqrt{2gh} \left(\frac{U}{z}\right) t^2.$$

In Abb. 6 stellt Kurve ABC die Parabel dar, nach der die Kammer sich füllt, wenn der Umlauf von Anfang an voll geöffnet

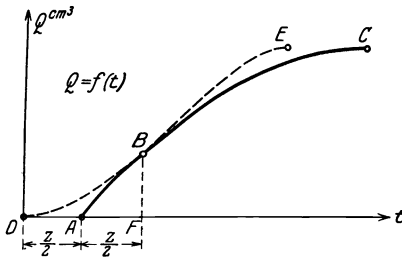


Abb. 6.

ist. Öffnet sich dagegen der Umlauf allmählich in z Sek., so wird das Stück AB durch die Kurve DB ersetzt, die die Werte der zuletzt abgeleiteten Gleichung für Q darstellt. Dabei ist $DA = AF = \frac{z}{2}$. Die Füll-

zeiten muß man jetzt von D aus zählen.

Könnte sich der Umlauf im selben Maße noch weiter vergrößern (z. B. nach $2z$ Sek. auf $2U$), so würde das Kurven-

stück BC durch BE ersetzt werden. Man sieht dabei, daß durch den größeren Umlauf das sehr flache und zeitraubende letzte Ende von BC wesentlich abgekürzt werden kann.

Ist nach der Füllzeit t gefragt, so löst man die letzte Gleichung für Q zweckmäßig nach $\frac{U}{z} t^2$ auf:

$$\left(\frac{U}{z} t^2\right)^2 - \frac{4F}{\mu} \sqrt{\frac{2h}{g}} \left(\frac{U}{z} t^2\right) = -\frac{8FQ}{\mu^2 g}$$

$$\frac{U}{z} t^2 = \frac{2F}{\mu} \sqrt{\frac{2h}{g}} \left[\mathbf{1}^{(+)} \sqrt{1 - \frac{Q}{Fh}} \right].$$

Für Q hat man den Bruchteil des ganzen Kammerinhalts Fh einzusetzen, dessen Füllzeit man berechnen will. Auf S. 35 Gl. (1) ist eine ähnliche Beziehung abgeleitet worden für den Fall, daß der Umlaufquerschnitt u während des Füllens unverändert bleibt:

$$u t = \frac{F}{\mu} \sqrt{\frac{2h}{g}} \left[\mathbf{1}^{(+)} \sqrt{1 - \frac{Q}{Fh}} \right].$$

Es zeigt sich also auch hier wieder der oben (S. 37) erwähnte Zusammenhang zwischen Füllzeit und Umlaufquerschnitt, wenn man sich vergegenwärtigt, daß bei veränderlichem Umlauf der mittlere Querschnitt $= \frac{1}{2} \frac{U}{z} t$ ist.

II. Bestimmung der Durchflußbeiwerte μ für die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals¹⁾.

Die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals haben als Umlaufverschlüsse im Unterhaupt Rollkeilschützen von $2 \cdot 1,80 \cdot 2,30 = 8,28 \text{ m}^2$, im Oberhaupt Zylinderschützen von $2 \cdot \frac{2,2^2 \pi}{4} = 7,60 \text{ m}^2$ lichtem

Querschnitt. Zur Bestimmung der Durchflußbeiwerte μ wurden an verschiedenen Schleusen Leerschleusungen vorgenommen, bei denen die Umläufe je $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$ oder $\frac{4}{4}$ geöffnet waren. Die Dauer der Absenkungen wurde von Anfang an fortlaufend gemessen, ihre Höhe von halben zu halben Metern an den Sprossen der Steigeleitern (je 0,25 m entfernt) festgestellt. Die Zeiten für das Füllen und Leeren der einzelnen Abschnitte wurden zeichnerisch so gegeneinander ausgeglichen, daß die Gesamtsumme unverändert blieb. Es ergaben sich auf diese Weise ziemlich gleichmäßige und wahrscheinliche Werte. Für Ober- und Unterhaupt wird nachstehend je eine Messungsreihe wiedergegeben, die dem Durchschnitt am nächsten kommt.

Die Kammerwände der Schleuse sind nicht senkrecht, sondern um 30 : 1 nach rückwärts geneigt. F_0 sei die Kammerfläche bei der Ausspiegelung (Druckhöhe $y = 0$), beim Leeren also die kleinste, beim Füllen die größte. F ist eine beliebige Kammerfläche (Druckhöhe y). Bedeutet l die Länge der Kammer und $n : 1$ das Neigungsverhältnis der Wände, dann ist $F = F_0 \pm 2 \frac{ly}{n}$. Dieser

Wert wird in die Grundgleichung des Schleusenbetriebs eingeführt :

$$\mu u \sqrt{2gy} dt = \left(F_0 \pm 2 \frac{ly}{n} \right) dy .$$

Dabei ist u ein beliebiger, unveränderlicher Teil des Umlaufquerschnitts U . μ sei innerhalb des betrachteten Abschnitts ganz oder nahezu unveränderlich. Dann erhält man :

¹⁾ Die reinen Messungen zu diesem Abschnitt wurden dem Verfasser aus den Akten der Kanalbaudirektion Essen zur Verfügung gestellt, die Bearbeitung jedoch erfolgte nach eigenen Gedanken.

$$\mu u \sqrt{2g} \cdot dt = -F_0 \frac{dy}{\sqrt{y}} \mp 2 \frac{l}{n} \sqrt{y} dy$$

$$\mu u \sqrt{2g} \cdot t = + 2F_0 (\sqrt{h} - \sqrt{y}) \pm \frac{4}{3} \frac{l}{n} (h\sqrt{h} - y\sqrt{y}).$$

wenn für $y = h$, $t = 0$ wird.

$$\mu = \frac{2F_0(\sqrt{h} - \sqrt{y}) \pm \frac{4}{3} \frac{l}{n} (h\sqrt{h} - y\sqrt{y})}{ut\sqrt{2g}}.$$

Beim Leeren gehört zu dem kleinen Wert F_0 das + Zeichen, beim Füllen zu dem großen Wert F_0 das — Zeichen. Der Wert der beiden Klammerausdrücke im Zähler wird mit Hilfe von Tabellen (z. B. „Hütte“) ein für allemal ermittelt, alle weiteren Rechnungen sind dann bequem und genau genug mit dem Rechenschieber auszuführen. μ wurde zunächst für den vollen Umlaufquerschnitt ($u = U$) berechnet, die Werte für $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{4}$ und $\frac{1}{4}$ Öffnung müssen demnach noch mit $\frac{4}{3}$, 2 und 4 multipliziert werden. Der Grund zu dieser Rechnungsweise ist beim Unterhaupt nur Bequemlichkeit, beim Oberhaupt dagegen kommt noch eine andere Schwierigkeit hinzu, auf die später eingegangen wird.

Abteilung II in Tabelle 3 zeigt das Ergebnis der Rechnungen für das Unterhaupt. In dem Verhalten der Werte μ lassen sich drei Abschnitte unterscheiden:

1. Während der Dauer der Schützbewegung;
2. vom Ende der Schützbewegung bis zum Beginn der Ausspiegelung;
3. während der Ausspiegelung.

Es werde zunächst der mittlere Abschnitt betrachtet.

Je nach dem Verhältnis von Schützöffnung zum Umlaufquerschnitt ist hier ein verschiedenes Verhalten der Werte μ zu beobachten.

Bei geringen Schützöffnungen ($\frac{1}{4}$ und dem größten Teil von $\frac{2}{4}$) schwankt μ bei verschiedenen Druckhöhen ohne erkennbare Regel um einen festen Wert. Diese Abweichungen sind wohl aus Ungenauigkeiten der Messungen zu erklären. Selbst bei richtiger Ausgleichung der beobachteten Zeiten Δt auf volle Sekunden können Fehler bis zu einer halben Sekunde vorkommen. Bei einer Größe Δt etwa von 20 Sek. ändert aber ein solcher Fehler die Zahl μ

bereits um $\frac{1}{40} = 0,025$. Bei geringen Schützöffnungen kann man also unbedenklich μ als unveränderlich betrachten, d. h. dann ist μ unabhängig von der Druckhöhe. Dies Ergebnis wird auch von den anderen, hier nicht aufgeführten Messungen durchaus bestätigt, wenn sie auch sonst bisweilen zu anderen Zahlen kommen.

Bei größeren Schützöffnungen dagegen nehmen die Werte μ unverkennbar ab, wenn die Druckhöhe geringer wird. Auch hierin stimmen die anderen Messungen überein. Dies Ergebnis überrascht insofern, als man im allgemeinen geneigt sein wird, mit abnehmender Druckhöhe und Geschwindigkeit eine Verkleinerung der Widerstände und damit eine Vergrößerung von μ zu erwarten.

Bezieht man nun alle Werte μ auf die wirklich vorhandenen Schützöffnungen, so ist $\mu_{\frac{1}{4}}$ mit 1, $\mu_{\frac{1}{3}}$ mit $\frac{4}{3}$, $\mu_{\frac{1}{2}}$ mit 2 und $\mu_{\frac{1}{4}}$ mit 4 zu multiplizieren. Für die Durchschnittswerte ist die Rechnung durchgeführt worden. Daraus sieht man weiter, daß μ bei geringer Schützöffnung wesentlich größer ist als bei voller. Die Widerstände an der Absperrstelle durch Einschnürung sind also offenbar geringer als der Vorteil, daß bei kleinen Durchflußmengen eine entsprechend gleichmäßigere und günstigere Wasserführung im Umlauf stattfindet. Dies Verhältnis zwischen den beiden Einflüssen ist sicher aber auch nicht unveränderlich. Vielmehr liegt die Vermutung nahe, daß bei ganz kleinen Öffnungen (1—2 cm) die Einschnürungswiderstände überwiegen, μ also wieder kleiner wird. Ein Nachweis dafür ist an einer Schleuse im Betrieb kaum zu erbringen, da es Schwierigkeiten macht, den Inhalt so kleiner Schützöffnungen richtig anzugeben.

Das Verhalten von μ im mittleren Abschnitt einer Schleusung — vom Ende der Schützbewegung bis zum Beginn der Auspiegelung — ändert sich also nach zwei Gesichtspunkten, die sich überlagern.

1. Stellt man neben jeden Wert μ die zugehörige mittlere Umlaufgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gy} \frac{u}{U}$, wobei $\frac{u}{U}$ das Verhältnis von Schützöffnung zum Umlaufquerschnitt gibt, so sieht man: Bei großen Wassergeschwindigkeiten hat man große Werte μ , sie nehmen dann mit der Wassergeschwindigkeit ab, bis bei mitt-

Tabelle 3. Berechnung der Durchfluß.

Rechenwerte					Leeren											Wer-	
Druck- höhe	h	y	$\sqrt{h}-\sqrt{y}$	$\frac{h\sqrt{h}}{-y\sqrt{y}}$	$F_0 = 1750 \text{ m}^2$ $u = 8,28 \text{ m}^2$ $\mu \cdot \Delta t$	Gemessene Zeiten [Sek.]											
						$t^{4/4}$	Δt	$t^{3/4}$	Δt	$t^{2/4}$	Δt	$t^{1/4}$	Δt	$^{4/4}$	$^{3/4}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
5,0												30					
4,5	5,0	4,5	0,1148	1,64	11,28	50	50	50	50	50	50	63		0,226	0,226		
	4,5	4,0	0,1213	1,55	11,90		25		25	55		28		49	0,476	0,476	
4,0						75		75		78		112					
	4,0	3,5	0,1292	1,45	12,62		21		22		78			52	0,602	0,574	
3,5						96		97		107		164					
	3,5	3,0	0,1388	1,35	13,52	110 ¹⁾											
	3,5	3,0	0,1388	1,35	13,52		17		21		32			56	0,796	0,643	
3,0						113		118		139		220					
	3,0	2,5	0,1509	1,24	14,62		18		23		35			61	0,813	0,635	
2,5						131		141		174		281					
	2,5	2,0	0,1669	1,125	16,18		20		26		39			67	0,809	0,622	
2,0						151		167		213		348					
	2,0	1,5	0,1895	0,991	18,30		24		30		44			74	0,763	0,610	
1,5						175		197		257		422					
	1,5	1,0	0,2247	0,837	21,60		29		35		52			86	0,744	0,617	
1,0						204		232		309		508					
	1,0	0,5	0,2929	0,647	28,15		38		46		67			120	0,741	0,600	
0,5						242		278		376		628					
	0,5	0	0,707	0,353	67,6		74		88		118			182	0,91	0,77	
0						316		366		494		810					
														Durchschnittswerte	0,82	0,62	
														Durchschnittswerte, auf den richtigen Querschnitt bezogen	0,82	0,82	

F_0 = Kammerfläche bei $y = 0$. l = Kammerlänge.

leren Geschwindigkeiten ein Grenzwert erreicht wird, unter den μ nicht weiter sinkt, auch wenn die Geschwindigkeiten noch mehr abnehmen. Der Wert μ_3 läßt diesen Übergang gut erkennen. Eine genügende Erklärung für diese Beobachtungen kann nicht gegeben werden.

¹⁾ Dauer der Schützhebung.

$$\text{beiwerte } \mu = \frac{2 F_0 (\sqrt{h} - \sqrt{y}) \pm \frac{4l}{3n} (h\sqrt{h} - y\sqrt{y})}{u\sqrt{2g \cdot \Delta t}}$$

te μ		$F_0 = 1810 \text{ m}^2$ $u = 7,60 \text{ m}^2$	Füllen								Werte μ				
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$		Gemessene Zeiten [Sek.]								$\frac{4}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1}{4}$	
$\mu \cdot \Delta t$	$\mu \cdot \Delta t$	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	31
0,226	0,178	11,96	61	61	61	61	61	61	50	71	0,196	0,196	0,196	0,168	
0,425	0,243	12,68	90	29	90	29	78	29	71	46	0,437	0,437	0,437	0,275	
0,435	0,243	13,54	115	25	110	26	90	31	117	47	0,542	0,520	0,437	0,282	
0,423	0,242	14,60	139	24	116	25	121	32	165	50	0,608	0,583	0,456	0,292	
0,418	0,240	15,90	144 ¹⁾	25	141	26	153	34	215	55	0,635	0,611	0,467	0,289	
0,415	0,241	17,65	164	27	167	29	187	37	270	62	0,653	0,608	0,478	0,285	
0,416	0,247	20,1	191	31	196	33	224	43	332	73	0,648	0,609	0,467	0,275	
0,415	0,251	23,9	222	38	229	41	267	51	405	89	0,628	0,583	0,468	0,269	
0,420	0,235	31,3	260	50	270	56	318	69	494	115	0,626	0,558	0,453	0,272	
0,57	0,37	75,6	310	90	326	94	387	127	609	183	0,84	0,80(?)	0,60	0,41	
0,42	0,24		400		420?		514		792		0,70	0,59	0,46	0,28	
0,84	0,96										0,70	0,79	0,92	1,12	

$n : 1 =$ Neigung der Kammerwände. $u =$ Umlaufquerschnitt.

2. Je kleiner das Verhältnis Schützöffnung: Umlaufquerschnitt wird, desto größer ist μ . Die Wirbel, die an der unvollständig geöffneten Schütztafel entstehen, sind also weniger schädlich als die im ganzen erreichte günstige Wasserführung.

Die Durchschnittswerte für μ in dem betrachteten Gebiet können als arithmetisches Mittel gefunden werden, wenn man

berücksichtigt, daß den einzelnen Teilen verschiedenes Gewicht, ihre Dauer Δt , zukommt. Hier wurden sie indes in derselben Weise berechnet wie die einzelnen μ . Dadurch sind etwaige Fehler der Werte Δt in der Mitte ausgeschaltet.

Eine wesentliche Veränderung erfahren die Werte μ , sobald die Ausspiegelung beginnt. Hier schnellen ausnahmslos alle Werte, auch die nicht aufgeführten, um ein beträchtliches Stück in die Höhe. Dabei wachsen die Werte für kleine Schützöffnungen, die schon bisher günstiger waren, sogar noch stärker an als die anderen. Das Verhältnis $\mu_{\text{Ausspiegelung}} : \mu_{\text{Mitte}}$ ergibt in vorliegendem Fall für die Öffnungsweiten $\frac{3}{4}$; $\frac{2}{4}$; $\frac{1}{4}$ entsprechend die Werte: 1,19; 1,24; 1,36; 1,54. Selbst wenn man zugibt, daß die Ausspiegelungszeit leichter zu kurz als zu lang beobachtet wird, so groß sind die regelmäßigen Fehler sicher nicht. Eine gewisse Zunahme von μ ist also kaum zu bestreiten. Die Erklärung dafür ist dieselbe wie oben, daß bei den geringen Geschwindigkeiten, die während der Ausspiegelung allgemein und bei geringen Schützöffnungen besonders herrschen, eine günstige Wasserführung im Umlauf stattfindet. Bezieht man die in der Zusammenstellung angegebenen Werte μ wieder auf den richtigen Querschnitt, so ergibt sich $\mu_{\frac{1}{4}} = 0,91$; $\mu_{\frac{1}{2}} = 1,02$; $\mu_{\frac{3}{4}} = 1,14$; $\mu_{\frac{1}{4}} = 1,48$. Selbst wenn man den letzten Wert als unwahrscheinlich ausschaltet, auch die anderen sind noch beträchtlich genug. Man muß sich dabei immer vergegenwärtigen, daß unsere ganzen Anschauungen über die Wasserbewegung in geschlossenen Röhren, über die Strahleinschnürung beim Eintritt und andere Widerstände an Modellen gewonnen worden sind, deren Abmessungen meistens wesentlich kleiner waren als die im modernen Schleusenbau üblichen. (Die im Bau befindliche Schleppzugschleuse Duisburg hat im Unterhaupt zwei Umläufe von je 12,5 m² Querschnitt!) Es ist also an sich durchaus nicht ausgeschlossen, daß man unter solchen Verhältnissen in Wirklichkeit bisweilen andere Ergebnisse erhält, als nach dem Modell zu erwarten waren.

Mit Hilfe der bisher gefundenen Überlegungen lassen sich auch Vermutungen anstellen über das Verhalten von μ während der Schützhebung. μ wird größer sein als der Durchschnitt im mittleren Abschnitt, weil die Druckhöhe groß ist, vor allem aber, weil die Schützöffnungen zunächst klein sind. Diese Vermutung wird von der Erfahrung bestätigt: Da die Schützöffnung nach 55 Sek.

$\frac{U}{2}$ ist, so erhält man als mittleren Schützquerschnitt während der 50 Sek., in denen der oberste Kammerabschnitt entleert wird: $\frac{1}{2} \cdot \frac{50}{55} \cdot \frac{1}{2} U = 0,227 U$. Der richtige Wert μ ergibt sich daher, wenn man den in der Zusammenstellung angegebenen Wert 0,226 auf den wirklich vorhandenen Querschnitt bezieht. Dann ist $\mu = \frac{0,226}{0,227} \approx 1,0$, also ein Wert, der bedeutend über dem Durchschnitt liegt. Beim Entleeren des zweiten Kammerabschnittes (Druckhöhe 4,5—4,0 m) ergibt sich eine mittlere Schützöffnung von $\frac{1}{2} \left(\frac{50}{55} \cdot \frac{1}{2} + \frac{75}{78} \cdot \frac{3}{4} \right) U = 0,588 U$ und ein Wert μ von $\frac{0,476}{0,588} = 0,81$. Hier ist μ also schon fast auf den Durchschnitt zurückgegangen. Der entsprechende Wert μ_4 im ersten Entleerungsabschnitt befriedigt nicht ganz so, fällt aber doch, wenn man die Fehlerquellen berücksichtigt, in keiner Weise aus dem allgemeinen Rahmen heraus. Es ergibt sich eine mittlere Schützöffnung von $\left(30 \cdot \frac{0,25}{2} + 33 \cdot 0,25 \right) U : 63 = 0,19 U$, und daraus $\mu = \frac{0,178}{0,19} = 0,94$.

Wenn man nun zwar für den inneren Zusammenhang mancher Erscheinungen vorläufig noch die Erklärung schuldig bleiben muß, so ergibt sich doch wenigstens für den praktischen Gebrauch ein einfaches und übersichtliches Bild. In Frage kommen dafür von μ_1 , μ_2 und μ_3 die Durchschnittswerte im mittleren Abschnitt. Durch $\mu_3 = 0,96$ sind auch die Werte während der Schützhebung genügend berücksichtigt. Dagegen müssen die Zahlen, zu denen die drei Werte μ während der Ausspiegelung anwachsen, ausgeschlossen werden, da in diesem Abschnitt praktisch das Schütz immer voll geöffnet sein wird. Deshalb ist für μ_4 auch der Durchschnitt aus dem mittleren und dem letzten Abschnitt einzusetzen. Hier sind zwar die Einzelwerte ziemlich verschieden, aber gerade die ersten im mittleren Abschnitt liegen nahe am Durchschnitt. Wenn sie ausfallen, das Schütz also erst später voll geöffnet wird, wird man trotzdem keinen anderen Durchschnitt für μ_4 erhalten.

In Abb. 7 sind die Werte μ für das Unterhaupt zeichnerisch aufgetragen. Bei der vorliegenden Arbeit werden sie in zwei Fällen gebraucht. Wenn die Umlaufschützen absatzweise in

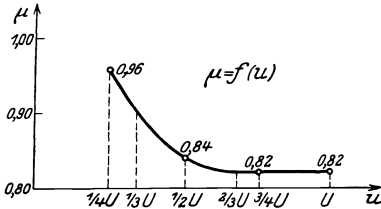


Abb. 7.

drei Staffeln geöffnet werden, hat man im ersten Drittel mit $\mu = 0,90$ zu rechnen, während im mittleren und letzten Drittel $\mu = 0,82$ zu setzen ist. Bei gleichmäßiger Schützbe-

wegung soll der Umlauf sofort auf $\frac{U}{\sqrt{3}} = 0,57 U$ geöffnet

werden. Die dazu erforderliche Zeit ist gering im Verhältnis zur Gesamtschleusungsdauer. Hier erscheint es also als durchaus statthaft, während der ganzen Schleusung mit einem unveränderlichen Wert $\mu = 0,82$ zu rechnen.

Die Durchflußverhältnisse im Oberhaupt sind natürlich in vieler Beziehung ähnlich wie im Unterhaupt. Ein Unterschied ergibt sich jedoch durch die verschiedene Art der Umlaufverschlüsse.

Im Unterhaupt wird der Füllkanal durch eine Tafel verschlossen, die senkrecht zu seiner Längsachse bewegt wird. Bei dem rechteckigen Querschnitt des Umlaufs nehmen Schützhebung und Schützöffnung im selben Verhältnis zu. Die Schützöffnung ist jederzeit der kleinste Durchflußquerschnitt, sie kann nie größer als der Umlauf werden.

Bei den Zylinderschützen im Oberhaupt dagegen erfolgt der Abschluß durch eine Tafel (die untere Ebene des Zylinders), die in der Längsrichtung des Umlaufkanals bewegt wird. Das Wasser strömt seitlich zu. Den Abschlußzylinder kann man beliebig hoch heben, die Schützöffnung, eine Ringfläche, ist also nicht in allen Fällen der kleinste Durchflußquerschnitt. Es hat sich sogar als zweckmäßig für die Wasserführung herausgestellt, den Zylinder wesentlich höher zu heben, als es der Umlaufquerschnitt an sich erfordert. Die kleinste Durchflußfläche nimmt also zunächst zu, bis der Inhalt des Abschlußrings gleich dem Umlaufquerschnitt ist. Von da ab bleibt die Durchflußfläche un-

verändert, obwohl das Schütz weiter gehoben wird. Aus diesen Verhältnissen folgt, daß die Zunahme der Durchflußfläche durchaus nicht mit der Schützgeschwindigkeit übereinstimmt. Wenn die Schützhebung $\frac{1}{4}$ beträgt, ist der kleinste Durchflußquerschnitt bereits wesentlich größer als nur $\frac{1}{4}$ der Umlauffläche.

Um diese Unstetigkeit in der Rechnung zu vermeiden, empfiehlt es sich beim Oberhaupt dringend, zunächst alle Berechnungen der Durchflußbeiwerte μ auf einen ganz bestimmten, unveränderlichen Querschnitt zu beziehen, etwa die engste Stelle des gemauerten Umlaufkanals. Bei dieser Berechnungsweise ergeben sich ähnliche Werte, wie sie oben für das Unterhaupt gefunden wurden. Abteilung III der Zusammenstellung (Tab. 3) zeigt das Ergebnis. Auch hier kann man die Betrachtung wieder in drei Abschnitte zerlegen: Während der Schützhebung, von deren Ende bis zum Beginn der Ausspiegelung, und während der Ausspiegelung.

Im mittleren Abschnitt, nach Beendigung der Schützbewegung, zeigen hier die Werte μ ein etwas anderes Verhalten als am Unterhaupt. In allen Fällen ist zunächst ein mäßiges Ansteigen und dann wieder ein Rückgang zu bemerken. Ob darin eine Gesetzmäßigkeit liegt, läßt sich bei der Größe der Fehlerquellen schwer sagen. Im ganzen sind aber die Schwankungen so gering, daß man vorläufig wohl ohne Bedenken den Satz vertreten kann: Im mittleren Abschnitt ist die Größe der Durchflußbeiwerte unabhängig von der Druckhöhe. Zu dem gleichen Ergebnis kamen auch die Modellversuche, die seinerzeit für die Schleusen des Rhein-Herne-Kanals in der Charlottenburger Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau angestellt worden sind.

Während der Ausspiegelung zeigt sich auch beim Zylinderschütz wieder eine wesentliche Zunahme der Werte μ , auch hier ist sie bei geringen Durchflußmengen (kleinen Schützöffnungen) größer als bei starken Wassermengen: Für das Verhältnis $\mu_{\text{Ausspiegelung}} : \mu_{\text{Mitte}}$ erhält man für $\frac{4}{4}$ Öffnung 1,20, für $\frac{1}{4}$ Öffnung 1,47.

Trägt man nun die Durchschnittswerte von μ im mittleren Abschnitt für verschiedene Schützhebungen zeichnerisch auf, so erhält man Kurven wie I und II in Abb. 8. Die Kurven steigen vom Nullpunkt zunächst fast geradlinig an und biegen dann ziemlich

plötzlich steil nach oben. Aber selbst wenn das Schütz bereits sehr hoch angehoben ist, nehmen die Werte μ immer noch langsam zu. Der geradlinige Teil reicht etwa so weit, bis der freigemachte Zylindermantel $D\pi \cdot h$ gleich dem Umlaufquerschnitt $\frac{D^2\pi}{4}$ ist. Von da an ändert sich der Querschnitt nicht mehr, wohl

aber wächst μ noch weiter. Die Kurve II zeigt die an der wirklichen Schleuse gemessenen Werte, Kurve I die Werte, die sich am Modell ergaben. Auch hier findet sich wieder ein Beweis dafür,

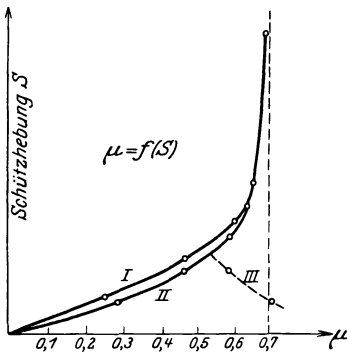


Abb. 8.

daß die Ergebnisse von kleinen Modellversuchen nicht bedingungslos auf die Wirklichkeit übertragen werden dürfen. Es leuchtet ein, daß im vorliegenden Fall der Einfluß der verschiedenen Widerstände auf die Wasserführung (Wandreibung, Strahlinschnürung usw.) im Modell verhältnismäßig größer sein muß als in Wirklichkeit.

Um nun den Wirkungsgrad der Füllanlage bei verschiedenen Schützöffnungen miteinander vergleichen zu können, muß man die Werte μ an den Stellen, wo eine Hebung des Schützes den Durchflußquerschnitt noch weiter vergrößert, auf den wirklich vorhandenen Querschnitt umrechnen. Da die Gesamthöhe der Zylinderschützen 0,86 m beträgt, erhält man

$$\mu_4 = 0,279 \frac{7,60}{2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,86 \cdot 2,20\pi} = 0,71$$

$$\mu_3 = 0,462 \frac{7,60}{2 \cdot \frac{2}{4} \cdot 0,86 \cdot 2,20\pi} = 0,59.$$

Diese Werte ergeben die gestrichelte Linie III in Abb. 8. Es zeigt sich also auch hier wieder wie beim Unterhaupt, daß die Widerstände für die Wasserführung am geringsten sind bei kleinen Schützöffnungen, d. h. kleinen Wassermengen. Sie wachsen,

bis der Abschlußzylinder eine Fläche von der Größe des Umlaufquerschnitts freigegeben hat. Dann ist die Zwängung der Wasserstrahlen am größten. Bei weiterem Heben des Schützes nehmen die Widerstände ab, μ wird also wieder größer, ein Ergebnis, das durchaus wahrscheinlich ist. Wäre der erste Teil der Kurven I und II genau eine Gerade, so ergäbe sich daraus bei allen Öffnungsweiten der gleiche Wert μ , die Linie III wäre also eine Parallele zur S -Achse. Für die Kurve I ist das nahezu der Fall, II ist wesentlich bauchiger. Auch hieraus läßt sich also erkennen, daß gerade in den Grenzlagen der Schluß vom Modell auf die Wirklichkeit mit großer Vorsicht gezogen werden muß. Wenn das Schütz in einem Modell 1:10 um 1 mm gehoben ist, wird man einen schlechteren Wirkungsgrad erhalten, als wenn das Schütz der wirklichen Schleuse um 1 cm geöffnet ist.

Für den praktischen Gebrauch ist aber auch diese Darstellung nicht zweckmäßig. Die Stellung des Schützes wird am Rhein-Herne-Kanal während des Betriebs jederzeit durch einen an der Winde angebrachten Zeiger angegeben, die Größe des wirklich frei gemachten Umlaufquerschnitts dagegen ist nicht zu erkennen. Um aber auch für sie einen bequemen Anhalt zu haben, empfiehlt es sich, die Werte μ so zu bestimmen, als wenn sich die Zunahme des kleinsten Durchflußquerschnitts gleichmäßig über die ganze Dauer der Schützhebung verteilt. Durch diese Annahme wird der Gesamtwert des Produkts $\mu \cdot u$, auf den es ja allein ankommt, nicht geändert, wohl aber wird dadurch der ganze Rechnungsgang wesentlich übersichtlicher und für den praktischen Betrieb brauchbarer. Man darf dabei bloß nicht vergessen, daß die so gewonnenen Werte μ natürlich nur für ein ganz bestimmtes Verhältnis zwischen größtem Schützhub und Umlaufdurchmesser gelten.

Um diese Werte μ zu finden, hat man die in der Zusammenstellung angegebenen Werte für $\frac{4}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{1}{4}$ Öffnung mit 1, $\frac{4}{3}$, 2, 4 zu vervielfachen. Diese Rechnungsart war beim Unterhaupt selbstverständlich gewesen, hier gilt sie nur unter der besonderen Annahme, die eben gemacht wurde. Die so erhaltenen Zahlen sind hier reine Rechenwerte. Sie können nicht zu Vergleichen untereinander benutzt werden.

Für den praktischen Gebrauch kommen wieder wie beim Unterhaupt in Frage von $\mu_{\frac{1}{4}}$, $\mu_{\frac{2}{4}}$ und $\mu_{\frac{3}{4}}$ die Durchschnittswerte

aus dem mittleren Abschnitt, bei $\mu_{\frac{1}{2}}$ aus dem mittleren und dem

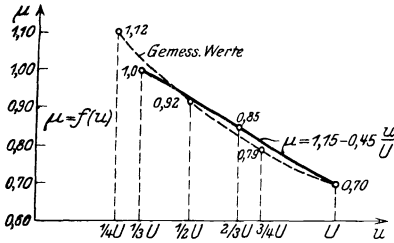


Abb. 9.

letzten Abschnitt. In Abb. 9 sind die vier Werte eingezeichnet und durch eine Kurve verbunden. Diese Kurve kann man genügend genau durch eine Gerade ersetzen und erhält dann für den wirklichen Betrieb mit Drittelstafelung die Werte $\mu_{\frac{1}{3}} = 0,70$; $\mu_{\frac{2}{3}} = 0,85$; $\mu_{\frac{1}{2}} = 1,0$. Bei

gleichmäßiger Schützbewegung dagegen muß man hier auch μ als gleichmäßig veränderlich einsetzen. Es ist:

$$\frac{\mu - 0.70}{1.0 - \mu} = \frac{U - u}{u - \frac{U}{3}}$$

oder

$$\mu = 1.15 - 0.45 \frac{u}{U}.$$

Literaturverzeichnis.

- [1] Gilly-Eytelwein: Praktische Anweisung zur Wasserbaukunst Berlin 1808.
- [2] Hagen: Handbuch der Wasserbaukunst. II. Teil. 2. Bd. 1847.
- [3] Hagen: desgl. II. Teil. 3. Bd. 1852.
- [4] Handbuch der Ingenieurwissenschaften. III. Teil. 5. Bd. Schiff-fahrtskanäle. Leipzig 1906.
- [5] Desgl. 8. Bd. Schiffsschleusen. Leipzig 1904.
- [6] Teubert: Die Binnenschifffahrt. Leipzig 1912.
- [7] Wreden: Vorläufer und Entstehen der Kammerschleuse. Ver-öfftl. im Jahrbuch des Ver. Deutscher Ing. Bd. 9. 1919.
Zentralblatt der Bauverwaltung 1881ff. insbes.:
 - [8] 1884 S. 13. Die Schleusen des Schelde-Marne-Kanals.
 - [9] 1898 S. 494. Werneburg: Der Schiffswiderstand und sein Einfluß auf den Bau und Betrieb von Kanälen.
- [10] 1901 S. 592. Gröhe: Spillanlage der Schleuse Wernsdorf.
- [11] 1907 S. 149. Landsberger: Schleusenlänge für die Mosel-kanalisierung.
 - [12] 1913 S. 307. Volk: Bauwerke am Rhein-Herne-Kanal.
 - [13] 1914 S. 333. Kray: Neuere Versuche für Schiffsschleusen.
 - [14] 1916 S. 336. Scheck: Bau der zweiten Schleuse in Fürsten-walde.
 - [15] 1917 S. 357. Lüdecke: Zur Ermittlung der Zeitdauer des Füllens und Leerens von Kammerschleusen.
 - [16] 1918 S. 30. Sympher: Abmessungen neuerer Hauptwasser-straßen.
 - [17] 1923 S. 486. Winkel: Neue Formen für Umlaufquerschnitte von Schleusen.
Zeitschrift für Bauwesen 1896 ff., insbesondere:
 - [18] 1901. Der Bau des Dortmund-Ems-Kanals.
 - [19] 1907. Sympher: Wirtschaftliche Untersuchungen über den Kanalbetrieb.
 - [20] 1921. Loebell: Die Schachtschleuse Minden.