

Einrichtungen zum Füllen und Entleeren von Schleusenkammern, insbesondere bei großen Flußschleusen in Kraftwasserstraßen.

Von Dipl.-Ing. F. Köhler, Rhein-Main-Donau-A.-G. München.

Eine der vielfältigen Aufgaben, die bei der Planung wie beim Bau neuer zeitlicher Schiffahrtsanlagen im Zuge einer Flußkanalisierung besondere Beachtung verdienen, ist die Füllung und Entleerung von Schleusen. Mit der Steigerung des Verkehrs auf den Schiffahrtsstraßen wurde das Füll- und Entleerungsproblem in den Vordergrund gerückt. Die Entwicklung auf diesem Gebiete ist heute noch im Fluß. Wissenschaft wie Praxis sind bemüht, zweckentsprechende Lösungen unter Zuhilfenahme von Modellversuchen zu finden. In nachfolgenden Ausführungen, die sich in erster Linie auf den Ausbau der Großschiffahrtsstraße Rhein-Mai-Donau beziehen, werden die bei der Wahl und Ausbildung der betreffenden Einrichtungen zu beachtenden Gesichtspunkte behandelt:

I. Analysierung des Füll- und Entleerungsvorganges.

1. Jede Schleuse bedeutet für die Schiffahrt einen Aufenthalt. Mit der Zunahme des Schiffsverkehrs mußte auch die Leistungsfähigkeit der Schleusen Schritt halten. Dem möglichst raschen Füllen und Entleerung mußte daher neben der Verkürzung der Zeiten für das Ein- und Ausfahren erhöhte Bedeutung zugemessen werden.
2. Die beim Durchschleusen zu gewährleistende Sicherheit der Fahrzeuge gebot Maßnahmen, die ein weitgehend gefahrloses Füllen und Entleeren gestatten sollen.
3. Die für die Schleusenfüllung erforderliche Wassermenge mußte auf jenes Maß beschränkt bleiben, das mit Rücksicht auf den Wasserhaushalt des Flusses und die gleichzeitig betriebene Kraftausnutzung zulässig erschien.
4. Im Zusammenhang mit Schwankungen in der Wasserversorgung war den bei der Schleusung entstehenden Wellenbewegungen und Längsströmungen in den Haltungen besonderes Augenmerk zu schenken.
5. Auf der Suche nach besten Füll- und Entleereinrichtungen und zweckmäßigen baulichen Maßnahmen, insbesondere Antriebsvorrichtungen, mußte die Kostenfrage und Wirtschaftlichkeit entsprechende Berücksichtigung finden.

Hiermit gleichlaufend mußte die Schleuse baulich und betrieblich auf eine Form gebracht werden, die die größtmögliche Betriebssicherheit der Anlage gewährleistete.

Für die nachfolgenden Ausführungen darf die Theorie der hydro-mechanischen Vorgänge beim Füllen und Entleeren als bekannt vorausgesetzt werden*).

Die an den fertiggestellten Anlagen der Großschiffahrtsstraße Rhein-Main-Donau in den letzten 20 Jahren gewonnenen Erfahrungen wie die Tatsache, daß Schleppzugschleusen mit 300 m Nutzlänge und zwischen 4 und 6 m schwankenden Hubhöhen viel rascher und sorgloser gefüllt werden können, als kleinere Schleusen mit geringerer Nutzlänge und hohem Gefälle, geben keinen Anlaß, grundsätzlich von den bewährten Stemmtoren mit gesonderten Tor-Umläufen abzugehen. Zum Füll- und Entleerungsproblem wird daher im Nachfolgenden ausschließlich unter dem Gesichtswinkel Stellung genommen, daß die gleiche Füllart auch für den Ausbau neuer Schleusen grundsätzlich beibehalten wird, selbstredend in dem Bestreben, den Füllvorgang weitgehend zu verbessern und ihn in seinen Auswirkungen den Vorteilen umlaufloser Schleusen möglichst anzupassen.

II. Stellungnahme zu den die Füllung und Entleerung beeinflussenden Faktoren.

Zu 1. Verkürzung der Füll- und Entleerungszeit.

Die Zusammensetzung der für die Rhein-Main-Donau-Verbindung maßgebenden Rhein- und Donauflotte hat sich nach dem 1. Weltkrieg dahingehend verändert, daß die in kurzer Zeit zu beladenden, schnellfahrenden Motorkähne bis zu 600 t einen zunehmenden Anteil an der Verkehrsleistung aufweisen. Die Rentabilität dieses Schiffstyps erfordert rasche Abfertigung und möglichst kurze Umlaufzeit, was bei den Schleusen Abkürzung des Aufenthalts bedingt.

Die Rhein-Main-Donau-A.-G. hat dieser Entwicklung durch Einbau von Mittelhäuptern für die nach dem 2. Weltkrieg auszubauende Kanalisierungsstrecke Rechnung getragen. Die Schleppzug-Schleusen mit 300 m Nutzlänge werden also künftig in eine große und eine kleine Kammer unterteilt, obwohl es für den Schleusenverkehr und damit für die Schleusungszeit dienlicher wäre, die Selbstfahrer aus der Fahrstraße des Schleppzuges in den Vorhäfen herauszunehmen und ihnen eine besondere Schleuse neben der Schleppzugschleuse zuzuweisen.

Es besteht kein Zweifel, daß die Organisation des Schiffahrtbetriebes im großen wie im einzelnen an vielen kanalisierten Flüssen der anderer Verkehrsarten noch nachhinkt und von dieser Seite noch vieles zur besseren Leistung beigesteuert werden kann. Dies zeigt sich z. B. in dem straff geregelten Betrieb des Rhein-Herne-Kanals, des Dortmund-Ems-Kanals und auf einigen französischen Wasserstraßen.

Wenn daher die Leistung der Schleusenkommer durch kurze Füll- und Entleerungszeiten gesteigert wird, so wird dadurch die Leistung der ganzen Schleusenanlage gefördert und für die Unzulänglichkeiten des Betriebes in den Vorhäfen eine Zeitreserve geschaffen.

Die Leistung der Schleusenkommer ist ziemlich eindeutig von der Füll- und Entleerungszeit abhängig. Sie ist auch durch bau- und maschinentechnische Einrichtungen eher zu beherrschen, als es die weniger zwangsläufigen Betriebsvorgänge in den Vorhäfen sind.

Verkürzungen der Füllzeit sind jedoch (bei niederen Gefällen von 4 bis 6 m) nur dann entscheidend, wenn es gelingt, die Zeit auf weniger als 10 Minuten herabzudrücken.

*) Vgl. den Aufsatz von Wittmann u. Bleines über hydromechanische Vorgänge bei der Schleusenfüllung.

Bisher vorgenommene Untersuchungen, empirische Berechnungsmethoden wie Modellversuche haben ergeben, daß einer weitgehenden Verkürzung der Füll- und Entleerungszeiten verhältnismäßig enge Grenzen gezogen sind. Auch die Streitfrage, ob Schleusen mit oder solche ohne Umläufe wesentliche Vorteile bieten, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. Die Praxis hat jedenfalls gezeigt, daß eine wesentliche Kürzung der Füllzeiten mit der Füllart durch das Oberhaupt allein nicht erreicht werden kann, auch nicht mit noch so raffinierten Verschlüssen in den Häuptern, komplizierten Antriebsvorrichtungen und den unvermeidlichen Energievernichtern. Dazu kommt, daß alle Bemühungen, dem ebenso wichtigen Problem der ruhigen Lage der Fahrzeuge während des Schleusungsvorganges durch entsprechende Maßnahmen gerecht zu werden, meist nur auf Kosten der Füllzeit und damit der Leistungsfähigkeit erfüllbar sind.

Inwieweit sich jedoch gegenüber den seither ausgebauten Schleusen Fortschritte erzielen ließen, möge nachfolgende Gegenüberstellung vermitteln:

	Hub	mittl. Hubgeschwindigkeit	Füllzeit
Mainschleuse alt	4,60	0,27 m/min.	18 min.
„ neu	4,60	0,37 m/min.	12½ min.

Auch in neuerer Zeit durchgeführte Untersuchungen zeigten bei Hubhöhen zwischen 4 und 6 m Füllzeiten, die zwischen 11 und 14½ min. liegen. Verkürzungen derselben, wie sie z. B. durch vorzeitige Öffnung der Tore, Einschaltung verschiedener Öffnungsgeschwindigkeiten, Vergrößerung der Umlaufquerschnitte, Wahl anderer Verschlusssysteme und Antriebsvorrichtungen ermöglicht werden könnten, brachten nur Zeitgewinne, die zwischen ½ bis 1 min. liegen und daher den baulichen wie kostenmäßigen Aufwand nicht rechtfertigen.

Eine weitere Verkürzung ist durch die Füllung vom Oberhaupt aus schon deswegen nicht mehr möglich, weil die beim Füllen entstehenden Schwallen und die sich daraus ergebende ungünstige Beanspruchung der geschleusten Schiffe diese nicht zulassen.

Nach dem gegenwärtigen Stand der technischen Entwicklung kann wohl gesagt werden, daß eine wirklich gewinn- und nutzbringende Verkürzung der Füllzeit nur durch eine andere Schleusenbauweise erreicht werden kann, bei welcher das Füllwasser nicht vom Haupt aus unmittelbar, sondern auf die ganze Kammerlänge verteilt zugeführt wird.

Zu 2. Gefahrloses Füllen und Entleeren.

Dem nicht minder wichtigen Gesichtspunkt des gefahrlosen Füllens und Entleerens gilt besonderes Interesse.

Für die Beurteilung dieses Vorganges sind im allgemeinen die Kräfte maßgebend, die auf die Schiffe ausgeübt werden, welche während der Schleusung in der Schleusenkammer liegen. Mit Rücksicht auf die gebotene Betriebssicherheit war es daher erforderlich, Bedingungen zu finden, die die ruhige Lage der Schiffe während des Füllvorganges gewährleisten.

Bei Schleusen, deren Länge, wie im vorliegenden Fall, sehr viel größer ist, als ihre Breite und die von einem der Häupter aus gefüllt werden, wird der ganze Füllvorgang im wesentlichen von den Füllschwallen, welche die Schleusenkammer mehrfach durchlaufen, bestimmt. Für die Schnelligkeit der Schleusung sind daher in erster Linie die auftretenden Trossenkräfte ausschlaggebend. Sie sollen nach einem Erfahrungswert $\frac{1}{750}$ bis $\frac{1}{600}$ des Schiffsgewichtes nicht überschreiten, das sind beim 1350-t-Kahn mit 1665 m³ Verdrängung = 2,22 bis 2,77 t.

Der Füllvorgang wird von der ersten Schwallbildung entscheidend beeinflusst. Schwallbewegung und Schwingungsvorgang in der Schleuse sind vom Zuwachs der Wassermenge in der Zeiteinheit abhängig. Die nachteiligen Erscheinungen des vor- und rücklaufenden Schalles müssen dadurch vermindert werden, daß, wie bereits erwähnt, bei Beginn der Füllung, also beim größten Druckunterschied, die Zuflußmenge klein gehalten wird. Nun kann zwar die Schwallbildung durch den Einbau von Energieumlenkern und Energievernichtern gedämpft werden, aber ein wesentlicher Zeitgewinn ist auch durch diese Maßnahme nicht zu erreichen. Als einziger Ausweg verbleibt vielmehr, kurz vor der Ausspiegelung durch Einschalten einer größeren Öffnungsgeschwindigkeit im Füllorgan diesen anfänglichen Zeitverlust aufzuholen. Unter dem Zwang, die Schwalde zu beherrschen, geht also die Möglichkeit, die Zeit des größten Druckunterschiedes für rasche Füllung auszunützen, nahezu verloren.

Das Bestreben, die Füllzeiten so kurz wie möglich zu halten, ist also auch unter vorgenannten Gesichtspunkten beschränkt. Die Sicherheit des Betriebes gestattet nicht, die Füllzeit auf Kosten der ruhigen Lage der Schiffe in der Schleuse herabzumindern. Es sind also alle jene Füllzeiten auszuschalten, bei denen nennenswerte, nach dem Obertor zu gerichtete Kräfte und ein häufiger Wechsel der Kraftwirkung auftreten sowie die Längskräfte das zulässige Maß wesentlich überschreiten.

Für die Verbesserung der Strömungsvorgänge sind ausschlaggebend die Abhängigkeit des ersten Füllschalles von der Größe der freigegebenen Schützöffnung und Öffnungsart, der freie Wasserquerschnitt in der Kammer, sowie das Zusammentreffen von zurückgeworfenem Schwall und erneutem Füllschwall. Bereits früher ausgeführte Versuche haben eine Betriebsform ergeben, die diese maßgeblichen Faktoren unter Berücksichtigung einer verschiedenartigen Schleusenbelegung weitgehend berücksichtigt.

Die rund 5,04 m² großen und kurzen Torumläufe sollten danach in folgenden Stufen freigegeben werden:

1. Freigabe von $\frac{2}{10}$ des Füllquerschnittes in 100 Sekunden.
2. Freigabe von weiteren $\frac{3}{10}$ des Füllquerschnittes in 120 Sekunden.
3. Freigabe der restlichen $\frac{5}{10}$ des Füllquerschnittes in 140 Sekunden.

Die gesamte Öffnungszeit betrug also 360 Sekunden oder 6 Minuten. Die gesamte Füllzeit für die ganze, große Schleusenkammer ermittelte sich zu 12 $\frac{1}{2}$ Minuten.

Die einzelnen Öffnungsquerschnitte werden stetig mit linearer Flächenzunahme freigegeben. Der Übergang von einer Öffnungsgeschwindigkeit zur nächsten sollte pausenlos erfolgen. Den Versuchen lag eine Hubhöhe von 4,60 m zugrunde. Bei Änderungen der Hubhöhe, z. B. bei höheren Unterwasserständen im Fluß, die eine Verminderung der Anfangshubhöhe bedingen, kann die Freigabe rascher erfolgen. Die vorgenannte Betriebsform gestattet dies insofern, als in diesem Fall die Stufe 1 und 2 abgeschaltet werden konnte und lediglich mit der Stufe 3 geöffnet werden sollte.

Die Einführung dieser Betriebsform machte den Einbau von besonderen Getrieben und Schaltvorrichtungen notwendig, die eine nicht unwesentliche Komplizierung der Antriebe und des ganzen Betriebes bedingten und deren Beschaffung darüber hinaus mit nicht unwesentlichen Mehrkosten verbunden waren. Bevor nicht erwiesen war, welche Zeitvergrößerung bei der Beibehaltung einer stetigen Öffnungsgeschwindigkeit tatsächlich in Frage kam, sollte aus vorgenannten Gründen von der empfohlenen Betriebsform mit veränderlichen Öffnungsgeschwindigkeiten abgesehen werden.

Neuerdings vorgenommene Untersuchungen mit der langsamsten Geschwindigkeit von $\frac{2}{10}$ in 100 Sekunden oder $\frac{10}{10}$ in 500 Sekunden ergaben eine Füllzeit von $13\frac{1}{2}$ Minuten. Der Zeitgewinn beträgt also nur 1 Minute. Auch die gleichzeitig gegebene Möglichkeit, den Umlaufquerschnitt auf $2 \times 6,0 \text{ m}^2$ zu vergrößern, ergab nur Zeitverkürzungen, die annähernd 1 Minute erreichten. Praktisch wäre also eine um insgesamt 2 Minuten schnellere Füllzeit erzielbar gewesen. Der durch die Querschnittsvergrößerung ermöglichte Gewinn war insofern illusorisch, als er bei kleineren Hubhöhen als 4,60 m sehr stark absank (auf 4 v. H.), andererseits jedoch eine Vergrößerung der Schützfläche um 20 v. H. bedingt hätte. Ferner kam hinzu, daß nach Einschaltung von Mittelhäuptern bei der kleineren Schleusenkammer die völlige Ausspiegelung bereits eintritt, bevor die Schützquerschnitte vollständig freigegeben sind. Letztere könnten also im Hinblick auf die kleine Schleusenkammer noch kleiner als $5,0 \text{ m}^2$ gewählt werden. Es empfahl sich daher, bei den kleineren Querschnitten von $5,0 \text{ m}^2$ zu verbleiben.

In Anbetracht der nur unwesentlichen und kleinen Verbesserungen der Füllzeiten läßt sich der für eine stufenförmig veränderliche Geschwindigkeitsregelung erforderliche Aufwand nicht vertreten, zumal deren voller Erfolg nur dann gewährleistet ist, wenn sie in weiten Grenzen variable Öffnungsgeschwindigkeiten zuläßt, die die Veränderlichkeit der Schleusenbelegung wie der Hubhöhe berücksichtigen lassen. Umgekehrt wird hierdurch jedoch eine wesentliche Erschwerung und Komplizierung des Schleusenbetriebes verursacht, die unerwünscht ist. Wir haben demgegenüber vorgezogen, Hubhöhen, Querschnittsgrößen und Öffnungsgeschwindigkeiten auf einander abzustimmen und die Öffnungsgeschwindigkeit bei jeder künftigen Schleuse an die größte Hubhöhe anzupassen.

Die anfänglich großen Druckhöhen und kleinen Füllquerschnitte lassen das Füllwasser mit großer Geschwindigkeit in die Schleuse eintreten. Zur gleichmäßigen Einführung werden besondere bauliche Maßnahmen notwendig. Durch Energievernichter und durch besondere Ausbildung der Füllöffnungen, wie sie auch für die Mainschleusen in Aussicht genommen sind, kann nur die Verteilung des ausströmenden Wassers über den Kammerquerschnitt erreicht oder verbessert werden, die Schwallbildung jedoch läßt sich hierdurch nicht beeinflussen. Verzichtet man auf die Energievernichter oder werden diese ungünstig ausgebildet, so verstärken sich die regellosen Schwankungen und Pulsationen des Wasserspiegels in der Nähe des Oberhauptes beträchtlich. Die ziemlich regelmäßigen Wasserspiegelschwingungen, die etwa $\frac{3}{4}$ der Kammer beherrschen und nur von den Schwallen herrühren, werden dagegen nicht verändert. Nur die Betriebsweise der Füllöffnungen hat einen erheblichen Einfluß auf die Schwallbildung. Da die im Verhältnis zu langen Stauhaltungen kurzen, aber meist tiefen Schleusenkammern besonders schwingungsempfindlich sind, muß der Füllschwall als Hauptursache der Schwingung klein gehalten und gedämpft werden.

Diese Erkenntnis ist als hauptsächlicher Faktor für die gefahrlose Füllung und Entleerung zu betrachten. Er wird daher maßgeblich mitbestimmend für die Größe der Füll- und Entleerungszeit für welche die Gesichtspunkte bereits aufgezeigt wurden. Beide Erfordernisse auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen, muß daher bei der Lösung aller mit diesem Problem zusammenhängenden Fragen oberster Grundsatz sein. Da das alte System der Torumläufe hydrodynamisch der Füllung unmitttelbar vom Ober- tor aus gleich zu achten ist, kann es zweifellos, wenn es strömungstechnisch so durchgebildet wird, daß der Eintritt des Füllstrahles keine schädlichen

Strömungen in der Kammer erzeugt, als geeignetes Mittel für eine gefahrlose Füllung der Schleuse herangezogen werden.

Zu 3. Beschränkung der Füllwassermenge.

Selbst wenn man einer völlig ruhigen Einströmung keinen entscheidenden Wert beimessen und kurze, nicht allzu häufig auftretende Längskräfte nach dem Obertor als nicht betriebsgefährdend zulassen wollte, darf nicht vergessen werden, daß das Füllwasser in vielen Fällen nicht in unbeschränkter Menge dem Oberkanal entnommen werden kann. Dabei ist nicht nur ausschlaggebend, ob die Größtwassermenge unter dem Maß bleibt, das mit Rücksicht auf die Lage der Schiffe in den Vorhäfen zulässig ist.

Die Rücksichtnahme auf die Kraftgewinnung an den Mainstauufen gebietet vielmehr die Beschränkung der Größtwassermenge auf den für die niedrigste Wasserführung maßgeblichen Wert von 40 bis 50 m³/sec. Die Größe des Umlaufquerschnittes ist bei den Mainschleusen somit mehr zwangsläufig bestimmt. Die Größe der Maximalwassermenge ist jedoch außer vom Umlaufquerschnitt auch vom größten Spiegelunterschied zwischen Oberwasser und Kammer und von der Öffnungsgeschwindigkeit der Schützen abhängig. Damit ist vorgezeichnet, daß auch die Wassermengenzunahme in einem kritischen Zeitraum der Füllung von ihrem Beginn bis zum Größtwert einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf. Dem entsprechend kann auch die Freigabegeschwindigkeit des Füllquerschnittes nur so groß gewählt werden, daß bei den Mainschleusen 0,10 m³/sec. als Wassermengenzunahme gewährleistet bleiben.

Wenn man bei in neuerer Zeit ausgeführten Schleusen die rasche Füllung mit einer etwa 7- bis 8mal größeren Hubgeschwindigkeit als bei den Mainschleusen rühmt, so darf man nicht übersehen, daß dort unbeschränkte Füllmengen zur Verfügung stehen, die in unserem Fall auch dann nicht gegeben sind, wenn ein Teil der Füllwassermengen unmittelbar aus dem Oberwasser des Wehres entnommen wird.

Zu 4. Beeinflussung der Strömungsvorgänge außerhalb der Schleusen.

Die beim Füllen der Schleusen festgestellten Einwirkungen auf die Wasserspiegellage im Ober- und Unterwasser der Stauhaltungen äußern sich in pendelnden Wellenbewegungen und Längsströmungen. Nach unseren Beobachtungen sinkt bei plötzlichem Öffnen der Umläufe das Oberwasser in Nähe der Umläufe um etwa 0,20 m ab. Diese Absenkung pflanzt sich über den Oberkanal hinaus fort, erzeugt ein starkes Spiegelgefälle und bringt dadurch die Wassermassen gegen das Oberhaupt zu in Bewegung. Da aber die Umläufe das zuströmende Wasser nicht verarbeiten können, staut es sich am Obertor bis 0,20 m über Regelstau auf, erzeugt höheres Druckgefälle im Umlauf und begünstigt die Schwallbildung in der Kammer. Die am Obertor angestaute Welle fließt, da sie jetzt entgegengesetztes Spiegelgefälle hat, wieder zurück. Der Wasserspiegel am Oberhaupt wird erneut unter Regelstau abgesenkt, erhält Spiegelgefälle zum Obertor und verursacht dadurch die nächste Welle. Dieses Spiel setzt sich fort und ebbt langsam bis zur völligen Ruhe ab.

Bei wenig bewegtem Oberwasser und geringer Wasserführung lassen sich die Schwankungen auch oberhalb des Oberkanals im freien Fluß beobachten, nur sind sie wegen des großen Wasserquerschnittes wesentlich abgeschwächt.

Der gleiche Vorgang setzt auch beim Entleeren der Kammer mit plötzlich geöffneten Umläufen ein. Das Unterwasser außerhalb der Tore steigt etwa

um 0,30 m an und bildet eine Welle stromabwärts. Erst bei nahezu ausgeglichenem Wasserspiegel kommt eine Welle gegen das Tor, die dasselbe aufdrückt.

Die Wellenbewegungen vorbeschriebener Art erzeugen in den einzelnen Haltungen zeitlich pendelnde Berge und Täler im Wasserspiegel, d. h. Sunk- und Schwallwellen, die bei dichtem Schiffsverkehr und öfteren Schleunungen über eine größere Länge der Stauregelungsstrecke fortschreiten*). Ihre Höhe ist abhängig von der Größe der in der Sekunde abfließenden Wassermengen. Je kleiner im Anfang der Füllung die Wasserentnahme aus dem Oberkanal ist, um so niedriger wird die Sunkwelle. Praktisch führt diese Erkenntnis dazu, die Fülleinrichtungen bei Beginn langsam zu öffnen und die Öffnungsgeschwindigkeit nur allmählich zu steigern. Wir haben es also hier mit den gleichen Folgerungen zu tun, wie bei der Erzeugung und Dämpfung des primären Schwalles in der Schleusenammer.

Weiter erscheint es erforderlich, daß die dem Oberkanal zu entnehmende Wassermenge ein gewisses zulässiges Maß nicht übersteigt und daß die Schiffe im oberen Vorhafen genügend weit von der Schleuse entfernt anlegen.

Bei den Maßnahmen für das Entleeren der Schleusenammer ist wichtig zu wissen, daß einmal eine Schwallwelle erzeugt wird und daß andererseits die Schiffe in der Schleuse infolge der größeren Wassertiefe ruhiger liegen als beim Füllen und daher die Entleerung rascher durchgeführt werden kann. Es ist anzustreben, die lebendige Kraft des ausströmenden Wassers möglichst weitgehend zu vernichten, damit im Unterkanal schädlichen Angriffen auf Sohle und Böschungen vorgebeugt wird.

Die rasche Entnahme des Füllwassers aus der Haltung wirkt sich auf den Schiffahrtsbetrieb weniger ungünstig aus, da die Schiffsliegplätze weit außerhalb der Schleuse angelegt wurden, so daß auch bei starken Wasserspiegelabsenkungen die im Vorhafen liegenden Fahrzeuge nicht leicht nach der Schleuse abgetrieben werden können. Von Nachteil kann die Wasserspiegelabsenkung jedoch am Ende längerer Haltungen, d. h. im Unterwasser der nächst oberhalb gelegenen Staustufe sein, wenn dort die Fahrwassertiefe nur dem vorgeschriebenen Normalmaß entspricht. Bei starker Sunkwelle können die Schiffe zeitweise Bodenberührung erleiden oder auf Grund geraten.

Besonders nachteilige Folgen hat der fortschreitende Wechsel der Wasserspiegellage jedoch auf den Kraftwerksbetrieb. Wird diesem bei der Beaufschlagung der Turbinen nicht Rechnung getragen, so erfolgt eine neuerliche Anfachung der Pendelbewegung, die sich insbesondere bei geringer Wasserführung auf weite Haltungstrecken fortpflanzt und zu unangenehmen Leistungsschwankungen der Kraftwerke führen kann.

Es erscheint also auch aus vorgenannten Gründen notwendig, das Füllen und Entleeren von Schleusen auf ein richtiges Zeitmaß abzustellen und insbesondere das allzu rasche Füllen zu vermeiden.

Zu 5. Wirtschaftlichkeit, Gestaltung und Betriebssicherheit baulicher Maßnahmen.

Der von den Verfechtern der umlauflosen Schleusen allgemein aufgestellten Behauptung, daß Schleusenumläufe die bauliche Ausführung und den Betrieb erschweren und verteuern und darüber hinaus Abschlußvorrichtungen erfordern würden, die häufigen Anlaß zu Betriebsstörungen geben, muß im Rahmen dieser Ausführungen widersprochen werden. Es mag

*) Vgl. den Aufsatz von Wiener über Schleunungs- u. Kraftwerkswellen in Schiffahrtskanälen.

zutreffen, daß nach den an Schleusen mit höheren Gefällen gemachten Erfahrungen die Umläufe hydraulisch nicht befriedigen. Dies hat seine Ursache darin, daß sie den bei höheren Gefällen auftretenden Erscheinungen und strömungstechnischen Erfordernissen nicht genügend angepaßt sind. In allen übrigen Fällen, insbesondere bei Hubhöhen unter 6 m ist es jedoch sehr wohl möglich, die nur als Zu- und Abführungskanäle gedachten kurzen Umläufe als Kopfumläufe den Bedürfnissen der Energievernichtung weitgehend anzupassen.

Umlauflose Schleusen haben die Vernichtung der lebendigen Kraft des in Richtung der Schleusenachse ein- und abströmenden Wassers zur unbedingten Voraussetzung. Dies wird je nach Verwendung besonderer Verschlussarten nur durch verhältnismäßig aufwendige und tiefreichende Energievernichtungsanlagen bewirkt, deren bauliche Ausführung teuer kommt und oft eine Verlängerung der Häupter bedingt. Kostenvergleiche haben ergeben, daß derartige Einbauten unter Berücksichtigung des bei den Anlagen des Maingebietes fast überall hoch anstehenden Felsuntergrundes kostspielige Gründungsarbeiten erfordern, welche die durch Weglassen der Umläufe erhofften Ersparnisse illusorisch machen. Der Entfall besonderer Umlaufverschlüsse spielt keine ausschlaggebende Rolle, da auch bei umlauflosen Schleusen die Füll- und Entleerungsvorrichtungen samt komplizierten Antrieben einen nicht geringen Kostenaufwand erfordern.

Ferner kommt hinzu, daß auf Grund der inzwischen an umlauflosen Schleusen gemachten Erfahrungen den Toren der Vorzug zu geben ist, die ganz aus dem Wasser gehoben werden können. Alle anderen Verschlussarten weisen mehr oder weniger betriebliche Nachteile auf, die den, den Umlaufverschlüssen nachgesagten Mängeln die Waage halten. Hubtore kommen jedoch aus mannigfachen Gründen für die Anlagen im Bereich der Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtsstraße, mit mittleren Hubhöhen nicht in Frage.

So wie sich die Verhältnisse im Schleusenbau bis jetzt entwickelt haben, kann von einer Verteuerung der Bauausführung bei Schleusen mit Umläufen gegenüber solchen ohne Umläufe keine Rede sein, da dabei Kosten mitbestimmend sind, deren Zusammensetzung auf Grund der örtlichen Verhältnisse nicht verallgemeinert werden kann. Wenn zudem durch einen in Grenzen bleibenden Mehraufwand die Leistungsfähigkeit einer Schleuse verbessert und gesteigert werden kann, so handelt es sich hierbei um das gleiche Argument, das auch als bestechender Vorteil der umlauflosen Schleusen vielfach herausgestellt wird.

Im Hinblick auf die Betriebssicherheit können den Häuptern mit Umläufen ebenfalls keine schwerwiegenden Nachteile unterschoben werden. Grundsätzlich erfordert die Betriebssicherheit einfache, robuste und in der Unterhaltung billige Verschlusseinrichtungen. Sowohl bei den altbewährten Stemmtoren wie bei mit Rollkeilschützen versehenen Umläufen ist diesem Grunderfordernis weitgehend Rechnung getragen. Verschlüsse für umlauflose Schleusen, deren Zahl und Bauart sich stetig weiterentwickelt hat, weisen wesentlich kompliziertere Antriebsorgane auf, die störungsanfälliger sind. Der unschätzbare Vorteil doppelter Umläufe, auch im Störfall mit einem Umlauf füllen oder entleeren zu können, wird jedenfalls bei umlauflosen Schleusen bisher noch nicht erreicht. Klemmen der Füllorgane im Tor oder Schäden im gemeinsamen Antrieb bedingen den Ausfall des gesamten Verschlusses und legen die Schifffahrt lahm, es sei denn, man sieht gleich von vornherein eine 2. Schleuse vor.

Vorstehende Gesichtspunkte wie die Tatsache, daß nach mehr als 20jährigem Betrieb kein einziger Fall bekannt geworden ist, der zu nachhaltigen und schwerwiegenden Folgen geführt hätte, veranlaßten uns, bei Schleusen mit Hubhöhen von 4—6 m die Umläufe in der bewährten Ausführung beizubehalten, zumal es sich gerade in neuerer Zeit gezeigt hat, daß auch die durch das Füll- und Entleerungsproblem aufgeworfenen Fragen und neugewonnene Erkenntnisse bei ihnen in weitreichendem Maße Berücksichtigung finden können. Die Fortschritte neuzeitlichen Schleusenbaues lassen erkennen, daß zweckentsprechendere Lösungen auf anderem Wege gefunden werden können, als solche bisher auf dem Umweg über die umlauflose Schleuse vorgezeichnet waren. Bei ihnen entfällt jedenfalls der Zwang zur Füllung vom Oberhaupt aus und die Notwendigkeit, Schwalle zuerst zu erzeugen und dann wieder dämpfen zu müssen. Erst wenn erwiesen ist, daß die während des Krieges im Ausland rasch vorwärts getriebene Weiterentwicklung neuer Typen bei großen Flußschleusen mit bestehend kurzen Hubgeschwindigkeiten als nachahmenswerte Beispiele anzusehen sind, kann darüber entschieden werden, ob die Beibehaltung von Schleusen mit Umläufen als unvorteilhaft aufgegeben werden muß.

III. Bisherige und künftige Betriebsform sowie bauliche Gestaltung der Füll- und Entleerungsorgane an den Schleusen.

Das Öffnen der Umlaufverschlüsse an den Schleusen der bisher fertiggestellten Kanalisierungsstrecke erfordert bei ununterbrochenem Hub 90 Sekunden. Praktisch kommt die volle und plötzliche Freigabe des Umlaufquerschnittes jedoch nie in Frage, da durch den hohen Überdruck am Beginn der Füllung derartige Schwalle erzeugt werden, daß die ruhige und sichere Lage der Fahrzeuge während der Schleusung nicht gewährleistet erscheint. Neben unzulässigen Trossenzügen nach dem Oberhaupt treten auch Querströmungen auf, die das Festmachen der Schiffe erschweren. Diese unangenehmen Auswirkungen werden erheblich gemildert, wenn die Oberhaupt-Umläufe stufenweise geöffnet werden. Es hat sich daher eine Betriebsform herausgebildet, bei welcher die Verschlüsse anfänglich nur rund 0,30 m angehoben werden. In dieser Stellung werden sie alsdann mindestens 5 Minuten belassen und dann um weitere 0,50 m geöffnet. Diese Öffnungsbegrenzung entspricht etwa einem Drittel der vollen Querschnittshöhe. Erst bei halbgefüllter Schleuse wird der volle Umlaufquerschnitt freigegeben. Je nach Belegung der Kammer und wechselndem Unterschied zwischen Ober- und Unterwasser kann diese Betriebsform geändert werden. Diese bisherige Betriebsform befriedigte jedoch weder in hydraulischer noch in betrieblicher Hinsicht. Die durch sie begünstigte Schwallbildung hat eine dauernde Änderung der Längskräfte und häufige Wechsel der Kraftgrößen je nach Lage der Fahrzeuge in der Kammer zur Folge. Es bleibt ferner dem Geschick und der Erfahrung der Schleusenwärter überlassen, jeweils das richtige Zeitmaß für das Öffnen der Verschlüsse abzuschätzen, damit die Wasserbewegung in der Kammer auf ein erträgliches Maß begrenzt bleibt. Zudem gestattet diese Betriebsform eine Betätigungsweise, die trotz entsprechender Bedienungsanweisungen willkürlich gehandhabt werden kann.

Die unzulässigen Längskräfte sind bedingt durch den geschlossenen Schwallkopf, der am Obertor in Schleusenmitte beim Öffnen der Umläufe zu beobachten ist. Er entsteht durch das Zusammentreffen des aus den gegenüberliegenden Auslaufteilen austretenden Strahles und wird dadurch verstärkt, daß beim Beginn des Füllvorganges, also bei großem Druckunterschied das Wasser nicht über den Auslaufquerschnitt verteilt und mit

überall gleichmäßiger Geschwindigkeit abströmt, sondern sich infolge der Umlenkung um 90° an die Außenwand des Umlaufes anschmiegt wie auch durch den ersten Öffnungsspalt der Füllschütze mit großer Geschwindigkeit und kleiner Fläche in den Auslauf eintritt. Der Strahl hat bei der bisherigen Bauform der Umläufe eine zu kleine Breiten- und Höhenausdehnung und trifft auf eine zu geringe Wasserüberlagerung in der Schleuse. Zur Vergrößerung der letzteren müßte der Querschnitt im Auslauf breiter und niedriger gehalten werden. Ferner macht sich auf der ganzen Länge des Auslaufes das Fehlen von Leitwänden nachteilig bemerkbar, die den Strahl über die Breite des Auslaufquerschnittes verteilen und in der Krümmung entsprechend führen sollten. Die bisher gebräuchliche Form des alten Torumlaufer geht aus Abb. 1 hervor.

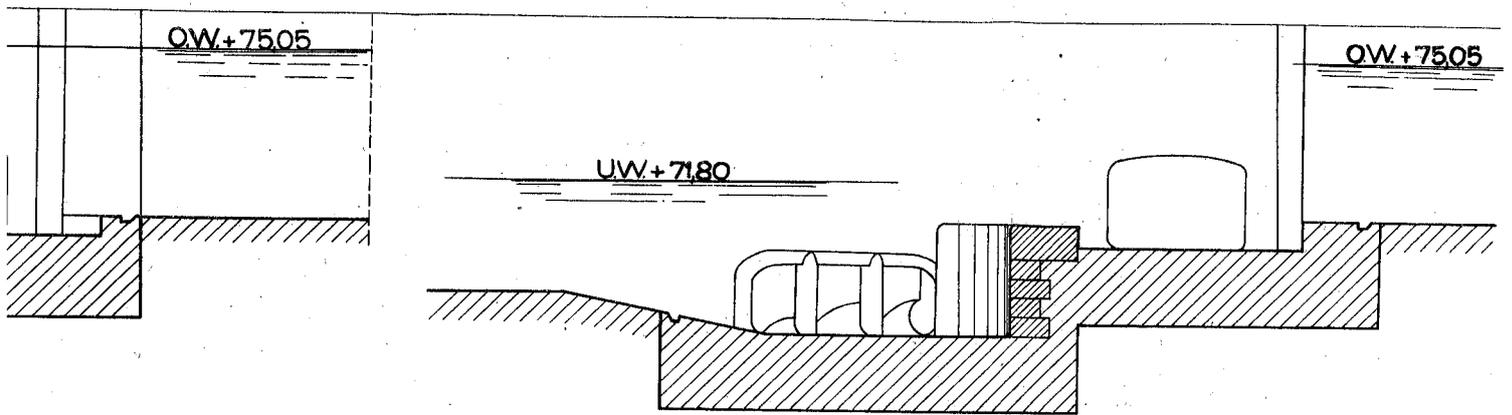
Die aus Versuchen und auf Grund von Erfahrungen gewonnene Erkenntnis, daß nur die Betriebsweise der Füllöffnungen einen erheblichen Einfluß auf die Schwallbildung ausüben kann, hat für den Bau weiterer Schleusen zu einer neuen Betriebsform geführt. Grundsätzlich soll ihr die als wichtiges Hilfsmittel erkannte Veränderlichkeit der Hubgeschwindigkeit in Form von stufenweise regelbaren Getrieben zugrundegelegt werden. Da deren Beschaffung in der benötigten Sonderausführung derzeit noch mit gewissen Schwierigkeiten verbunden ist, die jedoch ihren nachträglichen Einbau keineswegs ausschließen, soll die Füllung vorerst mit einer Öffnungsgeschwindigkeit und stetig erfolgen. Die bisherige intermittierende Öffnungsform wurde damit endgültig aufgegeben. Bei der neuen Betriebsform wird die aus früheren Versuchen gewonnene langsamste Öffnungsgeschwindigkeit bei Schleusen mit Hubhöhen von 4,60 m zu etwa 500 sec. gewählt. Auf Grund theoretisch-empirischen Berechnungsverfahrens wurde für jede Hubhöhe die zulässige Öffnungs- und Füllzeit ermittelt. Da, wie bereits erwähnt, die Vergrößerung der Füllquerschnitte auf Grund neuerer Untersuchungen keine nennenswerten Verbesserungen der Füllzeiten brachte, wurde der früher festgelegte Umlaufquerschnitt mit $5,0 \text{ m}^2$ beibehalten. Die Füllung und Entleerung wird in der gleichen Betriebsform vorgenommen. Füll- und Entleerungszeiten sind bei gleichen Öffnungszeiten gleichgroß. Die neue Betriebsform wird unveränderlich beim Ober-, Mittel- und Unterhaupt verwendet. Eine willkürliche Bedienung ist bei ihr künftig unmöglich. Die Öffnung des Füllquerschnittes wird mit einer rund 6fach langsameren Geschwindigkeit als seither erfolgen.

Auf Grund von Versuchen wurde der alte Torumlauf im Auslauf von dem hohen, schmalen in einen niedrigen breiten Querschnitt umgewandelt. Gleichzeitig erhielt der Auslauf Leitwände sowie eine Querschwelle hinter dem Füllschütz, die eine bessere Verteilung des einströmenden Wassers über die Höhe des Querschnittes und die Ablenkung des Strahles von der Sohle gewährleistet.

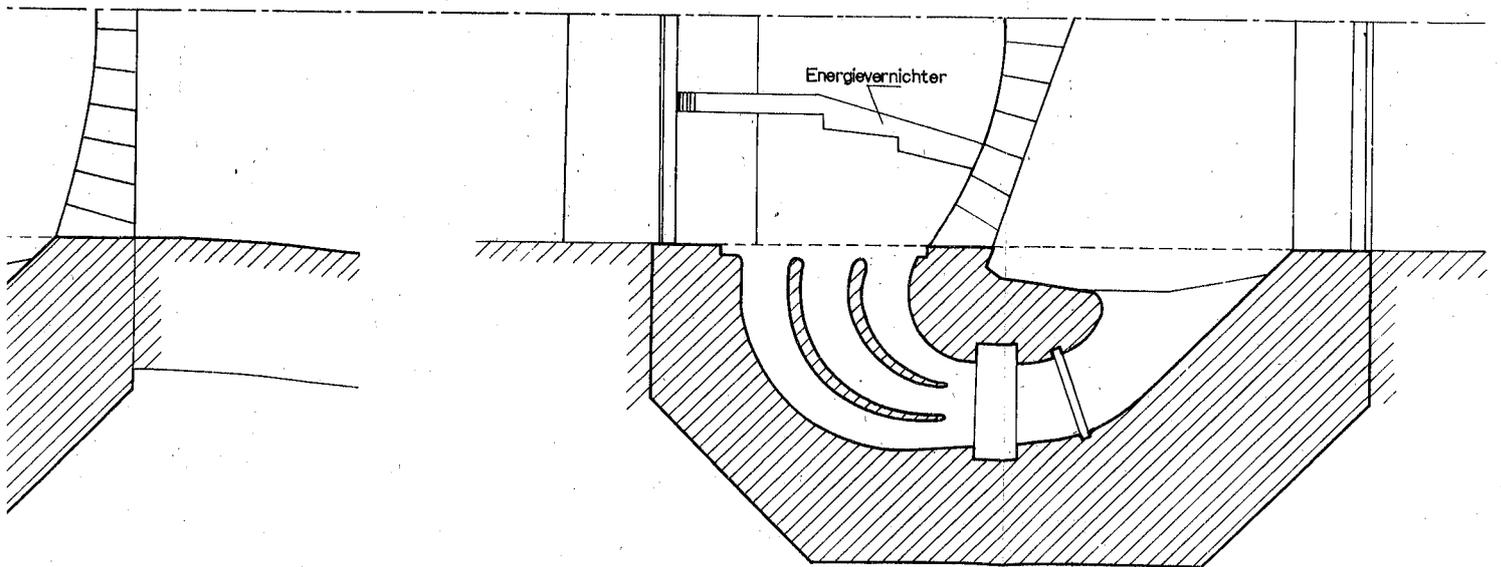
Bei allen Torumläufen mündet der Auslaufteil in ein Tosbecken, dessen Sohle 1 m unter der Kammersohle liegt. In dem flachen Tosbecken sind Energievernichter angeordnet, die die gleichmäßige Verteilung des zuströmenden Wassers über den Kammerquerschnitt erleichtern. Die nach vorstehenden Gesichtspunkten zur Ausführung bestimmte neue Umlauf-Form ist aus Abb. 2 erkennbar. Es ist anzunehmen, daß die vorerst für Hubhöhen zwischen 4 und 6 m festgelegte bauliche Ausführung der Tor-Umläufe in Verbindung mit der neuen Betriebsform Ergebnisse zeitigt, die den für das Füll- und Entleerungsproblem maßgeblichen Erfordernissen in strömungstechnischer wie betrieblicher Hinsicht gerecht wird.

Schnitt in Schleusenachse

Abb.2
künftige Ausführung

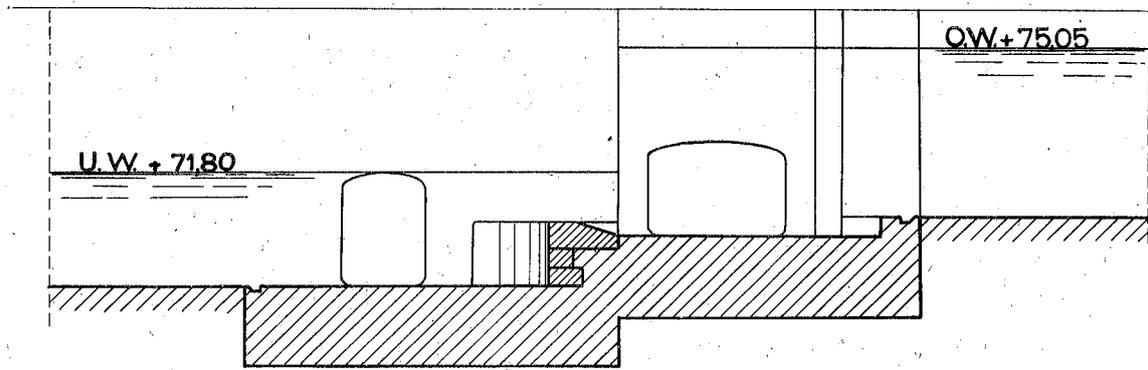


Grundriß



Schnitt in Sc

Abb.1
bisherige Ausführung



Grur

