

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen  
der Universität (TH) Karlsruhe  
o. Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach

Dr.-Ing. Reinhard Koehler

**Verkehrsablauf  
auf Binnenwasserstrassen**

Untersuchungen zur Leistungsfähigkeits-  
berechnung und Reisezeitverkürzung

---

Heft 3



1968

---

	Seite
4.4.3 Vergleich der simulierten Wartezeiten vor Schleusen verschiedener Kammergröße und verschiedener Schleusungszeit	62
4.4.4 Wartezeitmessungen an Schleusen	63
4.4.5 Überprüfung der Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit Werten, die bei praktischen Messungen ermittelt wurden	64
5. Reisezeiten auf kanalisiertem Wasserstraßen	66
5.1 Möglichkeiten der Reisezeitverkürzungen auf einer kanalisiertem Wasserstraße	66
5.2 Das Verhältnis von Fahrzeit zu Gesamtzeit für die Durchfahrt durch einen Kanal unter besonderer Berücksichtigung der Übernachtungen	67
5.3 Die Koordinierung von Schleusenketten	68
5.3.1 Wahl der Koordinierungsgeschwindigkeit	69
5.3.2 Wahl der Koordinierungsart	71
5.3.3 Nomogramme zur Bestimmung der Fahrzeit, bei der ein Schiff, das gerade eine Schleuse verläßt, die nächste zur Zeit der Einfahrtfreigabe erreicht	74
5.4 Darstellung einer Möglichkeit zur teilweisen Koordinierung des Verkehrs auf Wasserstraßen	77
5.5 Gesichtspunkte, die beim Entwurf neuer Wasserstraßen oder beim Umbau bestehender Wasserstraßen im Hinblick auf eine schnelle Verkehrsabwicklung und evtl. Koordinierung Berücksichtigung finden sollten	78
5.5.1 Die Zeitdauer zur Überwindung des Höhenunterschiedes an Schiffshebeanlagen	78
5.5.2 Untersuchungen über die Wahl günstiger Schleusenabstände beim Entwurf von Kanalneubaustrecken	79
6. Technische, verwaltungsmäßige und juristische Maßnahmen, die zur Verwirklichung der vorgeschlagenen Betriebsänderungen notwendig sind	80
6.1 Notwendige Änderungen und Zusätze zur Binnenschiffahrtsstraßenordnung zur Erreichung einer optimalen Koordinierung	80
6.2 Hilfsmittel zur Einhaltung empfohlener Geschwindigkeiten	81
7. Schlußbemerkungen	84
Literaturverzeichnis	85

## 1. Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich etwa 30 % aller zu transportierenden Güter auf Wasserstraßen befördert. Dieser Prozentsatz ist seit einigen Jahren konstant, während bei anderen Verkehrsträgern Umschichtungen eingetreten sind. Das bedeutet, daß das Transportvolumen der Binnenschifffahrt proportional mit dem steigenden Gesamttransportvolumen ansteigt, daß aber andererseits die Binnenschifffahrt keinen Gewinn an Transporten gegenüber anderen Verkehrsträgern erzielen konnte [1].

Für diese Transportaufgabe steht der Binnenschifffahrt ein Netz von Wasserstraßen zur Verfügung, das zwei Teilbereiche umfaßt, die sich in ihrer Art stark unterscheiden (Abb. 1):

1. Das Gebiet des Rheins mit seinen Nebenflüssen Neckar, Main und Mosel.
2. Das Gebiet der Kanäle und kanalisierten Flüssen zwischen Ruhrgebiet und Berlin.

Als drittes Wasserstraßengebiet kann der Donaoraum betrachtet werden. Dieses Gebiet spielt bisher für die deutsche Schifffahrt nur eine unbedeutende Rolle. Nach Fertigstellung des Main-Donau-Kanals wird jedoch vom Rhein über den Main eine Verbindung zu diesem Wasserstraßengebiet hergestellt sein und damit dessen Bedeutung für Deutschland wachsen.

Von allen diesen Wasserstraßen ist der Rhein die einzige, auf der von der Mündung bis Strasbourg ohne Behinderung durch Schleusen gefahren werden kann. Alle übrigen erwähnten Wasserstraßen sind teils kanalisierte Flüsse wie Neckar, Main, Mosel und Weser, teils künstlich angelegte Kanäle.

Am Rhein wurden laufend Verbesserungen an der Fahrrinne vorgenommen, es konnte jedoch bisher noch nicht erreicht werden, daß der Schifffahrt auch bei Niedrigwasser eine ausreichende Fahrwassertiefe zur Verfügung steht. Hier sei speziell die kritische Gebirgsstrecke zwischen Bingen und Bad Salzig erwähnt [2], [3].

Zu Großschiffahrtsstraßen wurden zwischen 1925 und 1964 die Nebenflüsse des Rheins durch den Einbau von Staustufen mit Schleusen ausgebaut. Dies geschah in der Regel aus zweierlei Gründen:

1. Zur Wasserkraftgewinnung
2. Zur Einführung der Schifffahrt oder zumindest zur Verbesserung bereits vorhandener Schifffahrtsmöglichkeiten. Nach [4] konnten hierbei die Schifffahrtsverhältnisse oft so verbessert werden, daß trotz der nun notwendigen Aufenthaltszeiten an Schleusen die Gesamtfahrzeit nicht verlängert, unter günstigen Umständen sogar verkürzt wurde [5].

Die in der Zeit zwischen 1899 und 1928 angelegten künstlichen Wasserstraßen zwischen dem Ruhrgebiet und Berlin sind ausschließlich für die Schifffahrt erstellt worden [2].

Alle diese Wasserstraßen wurden in ihrem Querschnitt und in ihren technischen Einrichtungen im Lauf der Jahre immer wieder erweitert und modernisiert. Die ursprüngliche Planung war jedoch rein auf die topografischen Verhältnisse abgestellt und nahm auf einen günstigen Betriebsablauf nur wenig Rücksicht. Das trifft auch für die Mosel, die zuletzt kanalisierte Wasserstraße, zu [6].

Auf den deutschen Wasserstraßen verkehrten zu Beginn der Großschifffahrt am Anfang dieses Jahrhunderts fast ausschließlich Schleppzüge, die überaus langsam fuhren und für die Mängel im Betriebsablauf prozentual nur unwesentliche Reisezeitverlängerungen brachten.

Nach dem ersten und besonders stark nach dem zweiten Weltkrieg machte sich eine Umstrukturierung der Flotte bemerkbar. Als neues Fahrzeug trat das Motorgüterschiff in immer größerer Zahl auf. Die Entwicklung hat dann dazu geführt, daß der Schleppzug fast ganz abgelöst wurde [7]. Das Motorgüterschiff erreicht wesentlich höhere Geschwindigkeiten als der Schleppzug, und insofern machen sich Zeitverluste durch betriebliche Störungen bezogen auf die Reisezeit wesentlich stärker bemerkbar. Mit der neuesten Entwicklung in der Flotte, den starren oder gelenkigen Schubverbänden wurde der Ruf nach Continu - Schifffahrt lauter [8], da auf Schubbooten leichter mehrere Besatzungen untergebracht werden

können. Mit Einführung dieser Betriebsart würde dann auch die im Durchschnitt achtstündige Pause während der Nacht wegfallen und der prozentuale Anteil der Zeitverluste durch betriebliche Störungen bezogen auf die Reisezeit noch erheblich steigen.

Zur Vermeidung dieser Zeitverluste wird aus Binnenschiffahrtskreisen immer wieder die Forderung laut, die Wasserstraßen durch Querschnittserweiterungen und den Bau zusätzlicher Schleusenammern leistungsfähig zu gestalten. Bauliche Veränderungen an Wasserstraßen erfordern jedoch außerordentlich hohe Kosten, und bei einem Verkehrsträger, dessen Transportanteil konstant bleibt oder sogar fällt, wie das durch die Umschichtung auf dem Energiesektor von der Kohle zur Kernenergie zu erwarten ist, erhebt sich bei so großen Investitionen immer wieder die Frage nach dem Nutzen.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, zu untersuchen, ob es möglich ist, den Betriebsablauf mit der heutigen Flotte so zu verbessern, daß die Reisezeiten auf Binnenwasserstraßen, die für eine anders strukturierte Flotte gebaut wurden, verkürzt werden können. Einige Möglichkeiten zur Verkürzung des Umlaufs sind in [9] bereits aufgezeigt.

Die Reisezeit beinhaltet Fahrzeit, Schleusenaufenthalte und Liegezeiten in Häfen. Über die Liegezeiten in Häfen liegen bereits umfangreiche Untersuchungen vor [10], [11], [12], [13].

Im einzelnen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Es wurde die Frage geprüft, ob der Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen mit den Methoden der mathematischen Statistik beschrieben werden kann.  
Dabei wurde versucht, Einflußfaktoren auf die zeitliche Verteilung der Schiffe und die Schiffsgeschwindigkeiten sowie die Überholmöglichkeiten von Schiffen auf Wasserstraßen zu bestimmen (Kapitel 2).
2. Die Leistungsfähigkeit von Binnenwasserstraßen auf der freien Strecke in Abhängigkeit vom Wasserstraßenquerschnitt und den hydraulischen Gegebenheiten wurde dargestellt (Kapitel 3).
3. Da die bisherigen Methoden zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Schleusen die Wartezeiten der Schiffe vor den Schleusen nicht berücksichtigen,

sichtigen, wurden diese als zusätzliches Kriterium zur Bestimmung der zulässigen, praktischen Leistungsfähigkeit von Schleusen mit herangezogen. Hierzu wurde eine Vielzahl von Messungen zur Bestimmung von Einflußfaktoren durchgeführt. Im weiteren wurde dann mit Simulationsmodellen gearbeitet (Kapitel 4).

4. Da nicht nur an Eingangsschleusen kanalisierter Wasserstraßen, sondern auch an Schleusen innerhalb einer Kette, Wartezeiten für die Schifffahrt auftreten, wurde untersucht, ob sich diese Wartezeiten durch Koordinierung der Schleusenketten vermeiden und somit die Reisezeiten vermindern lassen (Kapitel 5).
5. Falls eine Verwirklichung der vorgeschlagenen Maßnahmen in Frage kommt, so sind dazu technische, verwaltungsmäßige und juristische Maßnahmen erforderlich. Beispiele dieser notwendigen Maßnahmen wurden dargestellt (Kapitel 6).

## 2. Theoretische Grundlagen und meßtechnische Erfassung der Charakteristiken des Verkehrs auf Binnenwasserstraßen

Bei der Erfassung des Verkehrsablaufes auf Verkehrswegen hat in zunehmendem Maß die mathematisch-statistische Betrachtungsweise Eingang gefunden [14], [15], [16]. Im folgenden soll festgestellt werden, ob diese Betrachtungsweise auch auf den Binnenwasserstraßenverkehr anwendbar ist.

Die Zahl der Schiffseinheiten ist auf vielen Wasserstraßen bereits so groß geworden, daß man von einer Massenerscheinung sprechen kann, die aufgrund des "Gesetzes der großen Zahl" einer mathematisch-statistischen Erfassung zugänglich ist. Dabei ist das Auftreten jedes einzelnen Fahrzeugs an einem Querschnitt determiniert, d.h. es ergibt sich z.B. die Ankunftszeit aus der Abfahrtszeit an der Quelle der Fahrt, der Streckencharakteristik der Wasserstraße, der Motorleistung des Schiffes und etwa sonst noch auftretenden äußeren Einflüssen. Insofern läßt sich auch eine Analogie zu Vorgängen aus dem Gebiet der Physik herstellen [18], bei denen jeder Einzelvorgang in seinem Ablauf bekannt ist, durch eine große Zahl von Wiederholungen aber der Schein der Zufälligkeit auftritt.

Zwei Fragenkomplexe sind für die Erfassung des Verkehrsablaufs von besonderer Bedeutung und meßtechnisch erfaßbar:

1. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen in bestimmten aufeinanderfolgenden Zeitabständen, und daraus abgeleitet die Verteilung der Zeitabstände aufeinanderfolgender Fahrzeuge [14], [15].
2. Die Verteilung der Fahrgeschwindigkeiten an einem bestimmten Querschnitt des Verkehrsweges oder auf einer bestimmten Meßstrecke. Die dabei beobachteten unterschiedlichen Geschwindigkeiten resultieren entweder aus dem individuell verschiedenen Verhalten der Fahrzeugführer bei unterschiedlichen Verkehrsgegebenheiten [19] oder aus der Motorleistung bzw. dem Beladungsgrad des Fahrzeugs und der Streckencharakteristik des Verkehrsweges. Ein Maß für die Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit durch den Beladungsgrad bietet das Verhältnis von Motorleistung zu Gesamtgewicht.

## 2.1 Zeitlückenverteilung

### 2.1.1 Theoretische Ableitung

Als Zeitlücke wird der zeitliche Abstand der Fahrzeuge an einem Querschnitt eines Verkehrsweges bezeichnet. Es können dabei Brutto- und Nettozeitlücken betrachtet werden. Bei der Bruttozeitlücke wird die Fahrzeuglänge vernachlässigt, d.h. es wird der zeitliche Abstand von Fahrzeugspitze zu Fahrzeugspitze betrachtet, während bei der Nettozeitlücke der zeitliche Abstand vom Fahrzeugende des vorherfahrenden zur Fahrzeugspitze des folgenden Fahrzeuges betrachtet wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die Bruttozeitlücken eingegangen.

Die Zeitlückenverteilung leitet sich her aus der Poisson-Verteilung, die ein Sonderfall der Binomial-Verteilung ist.

Das Poisson'sche Verteilungsgesetz lautet:

$$P(x) = e^{-m} \cdot \frac{m^x}{x!}$$

$m$  ist hierbei die durchschnittliche Anzahl der pro konstantem Zeitintervall ankommenden Fahrzeuge.

Das Verteilungsgesetz der Zeitlücken in einem Verkehrsstrom läßt sich aus dem Poisson'schen Gesetz ableiten.

Es lautet:

$$P(0) = e^{-m} \cdot \frac{m^0}{0!} = e^{-m}$$

Hierbei ist  $m = N \cdot t$

$N$  = Zahl der im Mittel pro Zeiteinheit ankommenden Schiffe.



Daraus folgt:

$$P(T \geq t) = P(0) = e^{-N \cdot t}$$

Für die Überprüfung der Übereinstimmung der theoretischen Zeitlückensummenlinie mit den aus praktischen Messungen gewonnenen Ergebnissen war die Pearson'sche  $\chi^2$ -Probe geeignet. Die Pearson'sche  $\chi^2$ -Probe erlaubt es festzustellen, inwieweit die Abweichung einer beobachteten Verteilung von einer zugehörigen theoretischen Verteilung wesentlich oder nur zufällig ist.

Die theoretischen  $\chi^2$ -Werte sind in Tabellen zusammengestellt [20].

Für die Gegenüberstellung der theoretischen mit den beobachteten  $\chi^2$ -Werten gelten folgende Bewertungsmaßstäbe:

1. Ist der errechnete  $\chi^2$ -Wert kleiner als der theoretische für  $\bar{S} = 95 \%$ , so gilt die Abweichung der beobachteten von der theoretischen Verteilung als zufällig.
2. Ist der errechnete  $\chi^2$ -Wert größer als der theoretische für  $\bar{S} = 99 \%$ , so gilt die Abweichung als wesentlich und statistisch gesichert. Die beobachtete Verteilung kann nicht durch die theoretische Verteilung dargestellt werden.
3. Eine Abweichung, die mit einer statistischen Sicherheit zwischen  $\bar{S} = 95 \%$  und  $\bar{S} = 99 \%$  erschlossen ist, läßt zwar die Vermutung aufkommen, daß die Abweichung nicht mehr zufällig ist, jedoch muß diese Vermutung durch weitere Untersuchungen nachgeprüft werden.

Sind die Abweichungen der empirisch ermittelten von der theoretischen Zeitlückensummenlinie mit gleichem Mittelwert und gleicher Grundgesamtheit statistisch gesichert, so kann von Störungen des Verkehrsablaufs gesprochen werden. Einige typische gestörte Zeitlückenverteilungen sind qualitativ in Abb. 2 zusammengestellt.

### 2.1.2 Praktische Zeitlückenmessung

Die Messungen konnten infolge der geringen Fahrgeschwindigkeiten der Schiffe mit ausreichender Genauigkeit mittels einer Stoppuhr durchge-

führt werden. Die abgelesenen Zeiten wurden auf Listen notiert. Gemessen wurden jeweils die Bruttozeitlücken. Schiffsverbände (Schleppzüge oder Schubeinheiten) wurden als Einheit betrachtet. Die Bruttozeitlücke umfaßt hier den Zeitraum von der Durchfahrt des Bugs des Schleppers bzw. der Schubeinheit bis zur Durchfahrt des Bugs des nächsten selbständigen Schiffes oder Schiffsverbandes. Es besteht dann die Möglichkeit, daß sich eine Zeitlückenverteilung ergibt, wie sie in [43] für den Verkehrsablauf auf der Fahrspur einer Autobahnstrecke infolge des Anteils von Schwerverkehr ermittelt wurde.

In [19] wurden zusätzlich noch Zeitlückenmessungen für den Fall, daß Schlepper und Kähne als selbständige Fahrzeuge betrachtet werden, durchgeführt. Man erhält auf diese Weise einen Verkehrsanteil, nämlich alle Schleppkähne, der mit Sicherheit am Überholen gehindert wird. Für die Zeitlückenverteilung bedeutet das, daß für den am Überholen gehinderten Verkehrsanteil Lücken kleiner als der Fahrzeugfolgeabstand nicht auftreten können. Ist der Anteil der Schleppzüge groß, so spiegelt die Zeitlückensummenlinie dies deutlich wider [19].

Zeitlückenmessungen wurden an Querschnitten von Wasserstraßen verschiedener Charakteristik durchgeführt:

1. Auf Wasserstraßen mit einem Verkehrsablauf, der von äußeren Gegebenheiten unbeeinflusst ist. Hier besteht im allgemeinen freie Geschwindigkeitwahl infolge freier Überholmöglichkeit. Einschränkend muß hier lediglich bemerkt werden, daß bei niedrigem Niedrigwasser die freie Überholmöglichkeit infolge zu geringer Fahrwasserbreite nicht immer gegeben ist.
2. Auf kanalisierten Wasserstraßen, bei denen der Verkehrsablauf zum Teil durch den Schleusentakt der Schleusen bestimmt wird.

### 2.1.3 Meßergebnisse

#### 2.1.3.1 Messungen am freien Strom

In den Abb. 3, 4, 5 und 6 sind Zeitlückensummenlinien von Messungen an

2 verschiedenen Querschnitten eines freien Stroms jeweils für Berg- und Talfahrt dargestellt. Die Abweichungen von der theoretischen Verteilung sind hier nach den Ergebnissen der  $\chi^2$ -Probe jeweils als zufällig anzusehen, es kann also von freiem Verkehr gesprochen werden, d.h. jeder Schiffsverband kann seine Geschwindigkeit frei wählen.

In Abb. 7 ist eine Zeitlückensummenlinie aus einer Messung bei extremem Niedrigwasser an einem freien Strom dargestellt. Die Abweichung ist hier als statistisch gesichert anzusehen. Der Einfluß mangelnder Überholmöglichkeit ist daran zu erkennen, daß fast keine Zeitlücken auftreten, die kleiner sind als eine Lücke von  $t_0 = 1,5$  min, das entspricht bei einer Geschwindigkeit von 6 km/h, einem Abstand von 150 m. Die Gleichung der theoretischen Zeitlückensummenlinie ergibt sich dann nach [15] zu

$$P(T \geq t) = e^{-N'(t - t_0)}$$

wobei

$$N' = \frac{N}{1 - t_0 N} \quad \text{und} \quad \bar{t} = t_0 + \frac{1}{N'} \quad \text{ist.}$$

Bei einem höheren Wasserstand wurde an der gleichen Stelle die Zeitlückensummenlinie ermittelt, die in Abb. 8 dargestellt ist. Der höhere Wasserstand erlaubte ein freies Überholen und somit zeigt das Ergebnis der  $\chi^2$ -Probe, daß die Abweichung nur als zufällig anzusehen ist. In Abb. 7 ist außerdem ein Einfluss von Verkehrsschwankungen zu erkennen. Verkehrsschwankung besagt, daß während der Meßdauer der Erwartungswert der Zahl der Schiffsdurchgänge pro Zeiteinheit nicht konstant war.

Eine theoretische Verteilung für Zeitlückenmessungen unter dem Einfluss von Verkehrsschwankungen läßt sich ebenfalls nach [15] ermitteln. Es ergibt sich dann als Gleichung der Zeitlückensummenlinie:

$$P(T \geq t) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i N_i e^{-N_i t}}{\sum_{i=1}^n a_i N_i}$$

In dem betrachteten Beispiel sind drei Abschnitte mit Verkehrsbelastungen von  $N_1 = 0,0167$ ,  $N_2 = 0,125$  und  $N_3 = 0,272$  Schiffe/min enthalten. Die Anteile der Meßdauer  $T$  betragen:  $a_1T = 0,286 T$ ,  $a_2T = 0,286 T$  und  $a_3T = 0,428 T$ . Die so ermittelte theoretische Zeitlückensummenlinie, die sowohl die mangelnde Überholmöglichkeit, wie auch die Verkehrsschwankungen berücksichtigt, ist in Abb. 7 eingetragen.

### 2.1.3.2 Messungen an kanalisiertem Wasserstraßen

Die Ergebnisse einer Messung in der Mitte einer etwa 40 km langen Strecke des Kanals C ohne Schleusen zeigen ein sehr unterschiedliches Bild (Abb. 9 und 10). Während für die Bergfahrt die Abweichung von der theoretisch ermittelten Geraden als zufällig anzusehen ist, ist in der Talfahrt eine deutliche Abweichung feststellbar, die auf den Einfluß mangelnder Überholmöglichkeit zurückzuführen ist. Es zeigt sich das typische Bild, daß Zeitlücken unter einer Minute nicht auftreten. Die Ursache für die unterschiedliche Überholhäufigkeit in Berg- und Talfahrt dürfte in dem bei der Messung beobachteten höheren Beladungsgrad der Schiffe in der Bergfahrt gegenüber der Talfahrt zu suchen sein. Die beladenen Schiffe in der Bergfahrt können, je nach Motorenstärke z.T. die zugelassene Höchstgeschwindigkeit nicht einhalten. Dadurch treten wesentlich differenziertere Geschwindigkeiten auf und die Zahl der Überholungen ist größer als bei den leeren Talfahrern, die in der Regel die zulässige Höchstgeschwindigkeit einhalten können. Durch die geringen Geschwindigkeitsdifferenzen in der Talfahrt bildet sich Kolonnenverkehr aus.

Die Definition der Kolonne lautet nach [21]: Eine Kolonne ist ein Teil aufeinanderfolgender Fahrzeuge einer Fahrzeugreihe, von denen jedes Fahrzeug außer dem ersten in seinem Geschwindigkeitsverhalten durch ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst wird.

Zeitlückenmessungen in den Zufahrten zu der Schleuse 1 am Kanal A und Schleuse 1 am Fluß N ergaben ähnliche Ergebnisse. Beide Schleusen sind Eingangsschleusen von kanalisiertem Wasserstraßen, bei denen die Zufahrt im Unterwasser vom freien Strom her erfolgt, während im Oberwasser die Zufahrt von der in 12 bzw. 8 km entfernt gelegenen folgenden Schleuse

her erfolgt. Beide Ergebnisse zeigen im Unterwasser eine Ankunftsverteilung, die sich mittels der Poisson-Verteilung beschreiben läßt. Im folgenden sei in diesen Fällen von zufallsverteilter Ankunft gesprochen (Abb. 11 und 13). Die Zeitlückensummenlinie für die Ankunft im Oberwasser zeigt einen Störeinfluß durch Sperrzeiten infolge des Schleusentakts der folgenden Schleuse (Abb. 12 und 14).

Ein Maß für die Entfernung zu finden, ab der eine solche Störung abgeklungen ist, ist schwierig und hängt vor allen Dingen von der Überholmöglichkeit und der Möglichkeit freier Geschwindigkeitswahl in der dazwischenliegenden Haltung ab. Über das Problem der Stauauflösung im Straßenverkehr wurden Untersuchungen durchgeführt [22]. Ihre Übertragbarkeit auf den Wasserstraßenverkehr wird noch zu prüfen sein.

## 2.2 Geschwindigkeitsverteilung

### 2.2.1 Grundlagen

Für die Leistungsermittlung von Verkehrswegen ist wegen des Zusammenhanges zwischen Verkehrsmenge, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit die Kenntnis der gefahrenen Geschwindigkeiten und deren Verteilung von Bedeutung.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung werden über eine bestimmte Zeit hinweg die Fahrgeschwindigkeiten aller Fahrzeuge an einem Querschnitt bzw. an einer relativ kurzen Meßstrecke gemessen. Die Streuung der beobachteten Geschwindigkeitsverteilung resultiert aus dem Verhalten der Schiffsführer, der Motorleistung der Schiffe und örtlichen Gegebenheiten. Beobachtete Geschwindigkeitsverteilungen ähneln häufig einer Gauss'schen Normalverteilung.

Abweichungen beobachteter Verteilungen von der Normalverteilung können entstehen, wenn z.B. in einem Verkehrsstrom zwei sehr unterschiedliche Fahrzeugarten vorkommen. Das hat u.U. schiefe oder zweigipflige Ver-

teilungen zur Folge [23]. Eine andere Ursache für schiefe Verteilungen können Geschwindigkeitsbegrenzungen sein.

Bei den Untersuchungen wurden jeweils nur lokale Geschwindigkeitsverteilungen (Verteilung der Geschwindigkeiten von Fahrzeugen an einem festen Querschnitt über einen längeren Zeitraum hinweg) gemessen. Der Mittelwert dieser Verteilungen errechnet sich zu:

$$\bar{v}_1 = \frac{1}{n} \sum v_i$$

und die Standardabweichung zu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_1)^2}$$

### 2.2.2 Durchführung der Geschwindigkeitsmessungen

Zur Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeiten wurden die Durchfahrungszeiten der Schiffe für eine kurze Meßstrecke (meist 100 m) gestoppt und daraus die Einzelgeschwindigkeiten der Schiffe errechnet. Die Meßanordnung ist in Abb. 15 schematisch dargestellt.

Die Messungen lassen sich auch statt mit der Spiegelvorrichtung mit Hilfe von Lichtschranken und einem Zeitschreiber automatisch durchführen. Es ist hierbei jedoch zu beachten, daß die Lichtschranken sich als sehr witterungsempfindlich erwiesen und die Reichweite nur begrenzt ist (max. 150 m).

Die Messungen wurden an drei in ihrer Charakteristik sich unterscheidenden Arten von Wasserstraßen durchgeführt:

1. An einem freien Flusslauf, bei dem sich die Fließgeschwindigkeit mit dem Wasserstand ändert.
2. An kanalisiertem Flüssen, bei denen die Einflüsse des Wasserstandes auf die Fließgeschwindigkeit zeitlich begrenzt sind. Bei diesen Wasserstraßen tritt eine Fließgeschwindigkeit hauptsächlich

lich nur außerhalb des Staubereichs auf. Die Länge des Stillwasserbereichs wächst dabei mit sinkendem Wasserstand.

3. An Kanälen, bei denen Fließbewegungen nur durch das Füllen und Leeren der Schleusen auftreten können und bei denen der Wasserstand im wesentlichen konstant gehalten wird.

#### 2.2.2.1 Messungen am freien Strom

Zur Quantifizierung des Einflusses des Wasserstandes und somit der Fließgeschwindigkeit auf die Schiffsgeschwindigkeit in der Berg- und Talfahrt wurden an einem Querschnitt eines freien Stroms über einen längeren Zeitraum Messungen durchgeführt.

Die Mittelwerte dieser Messungen sind in Abb. 16 zusammengestellt. Es zeigte sich dabei, daß bei Talfahrt die mittlere Geschwindigkeit mit wachsendem Wasserstand ansteigt. In der Bergfahrt steigt die mittlere Geschwindigkeit ebenfalls mit wachsendem Wasserstand, nähert sich aber sehr schnell einem Maximalwert, der nicht mehr überschritten wird. Mit Hilfe der Korrelationsrechnung wurde versucht, eine Funktion zu finden, durch die der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Wasserstand zu beschreiben war. Es ergaben sich dabei folgende Funktionen:

$$\text{Bergfahrt: } \bar{v}_1 = 5,76 + 2,58 w - 0,33 w^2$$

$$\text{Talfahrt: } \bar{v}_1 = 7,16 + 6,01 w - 0,63 w^2$$

Das Bestimmtheitsmaß betrug dabei in der

$$\text{Bergfahrt: } 0,63$$

$$\text{Talfahrt: } 0,84$$

Die Funktion für die Talfahrt spiegelt in etwa die Tatsache wider, daß die Summe aus möglicher Schiffsgeschwindigkeit bei stehendem Wasser und Stromgeschwindigkeit die Schiffsgeschwindigkeit über Grund ergibt. Die Funktion für die Bergfahrt widerspricht dieser Tatsache. Hier ist die niedrige Schiffsgeschwindigkeit bei geringen Wasserständen dadurch zu erklären, daß in diesem Fall die Wassertiefe unter der Schraube nicht mehr ausreicht um noch die volle Motorenkraft zur Wirkung kommen zu lassen.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diese Funktionen nur für die an der Meßstelle vorhandenen örtlichen Verhältnisse (Fahrwasserbreite und -tiefe, Fließgeschwindigkeit) gelten können. Es kann jedoch angenommen werden, daß an Querschnitten mit ähnlichen Gegebenheiten sich ähnliche Funktionen einstellen. In Abb.17 und 18 sind die Häufigkeitsverteilungen für eine dieser Messungen dargestellt. Es ergab sich eine schiefe Verteilung, da die mittleren Geschwindigkeiten der Motorgüterschiffe und der Schleppzüge erheblich voneinander abweichen. Es kann hier von zwei Verteilungen, die sich überlagern oder einer Mischverteilung [23] gesprochen werden.

#### 2.2.2.2 Messungen an kanalisierten Flüssen

In der Stauhaltung 1 des Flusses N und in der Stauhaltung 5 des Flusses M wurden Geschwindigkeitsmessungen mit Lichtschranken durchgeführt. Die Meßstelle am Fluss N lag innerhalb einer Seitenkanalstrecke ohne Wasserstandsschwankung. Eine Fließgeschwindigkeit war jedoch zu verzeichnen, da der Seitenkanal gleichzeitig Zulauf eines Kraftwerkes ist. Die Ergebnisse sind in Abb. 19 dargestellt. Die Unterschiede für Berg- und Talfahrt dürften einerseits durch die Fließgeschwindigkeit, andererseits aber durch den sehr unterschiedlichen Beladungsgrad der Schiffe bedingt sein. Nach der amtlichen Statistik sind ca. 90 % der bergfahrenden und nur ca. 10 % der talfahrenden Schiffe an der Schleuse 1 beladen. Über den Einfluss der Beladung auf die Geschwindigkeit siehe 2.2.2.3.

In Abb. 20 ist die Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeiten für Berg- und Talfahrt an der Meßstelle in der Haltung 5 des Flusses M dargestellt. Es ist ebenfalls der charakteristische Unterschied in den Geschwindigkeitsverteilungen und im Mittelwert zwischen Berg- und Talfahrt zu erkennen.

#### 2.2.2.3 Messungen am Kanal A

Bei den Messungen in der Haltung 1 des Kanals A konnte zusätzlich noch festgestellt werden, ob die Schiffe beladen oder leer waren.



Die Ergebnisse sind in Abb. 21 und 22 dargestellt. Während in der Bergfahrt der Einfluss der leeren Schiffe, infolge ihrer geringen Zahl, auf die Gesamtverteilung gering ist, ergibt sich in der Talfahrt eine charakteristische Zweigipfligkeit, die auf den unterschiedlichen Beladungsgrad und die unterschiedliche zugelassene Höchstgeschwindigkeit für beladene und leere Schiffe zurückzuführen ist. Daß die Wunschgeschwindigkeit der leeren Schiffe höher liegt als die der beladenen, läßt sich daraus ersehen, daß der Mittelwert der Geschwindigkeiten der beladenen Schiffe, obwohl 26 % aller Schiffe die Höchstgeschwindigkeit überschritten, um 9 % unter der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit liegt, während bei den leeren Schiffen nicht nur der Prozentsatz der Überschreitungen mit 69 % wesentlich höher lag, sondern auch der Mittelwert um 3 % höher lag als die zugelassene Höchstgeschwindigkeit.

Die Höchstgeschwindigkeiten wurden festgelegt, um die Uferbefestigungen vor Beschädigungen durch den mit steigender Geschwindigkeit wachsenden Wellenschlag zu schützen und bei Begegnungs- oder Überholungsvorgängen die Sicherheit der Schifffahrt zu gewährleisten. Wird die zugelassene Höchstgeschwindigkeit ständig überschritten, so ist in zunehmendem Maße mit Uferbeschädigungen zu rechnen und die Gefährdung der Schiffe untereinander wächst.

### 2.3 Abhängigkeit zwischen Reisegeschwindigkeit und Gefälle eines Flusses

Die Reisegeschwindigkeit sei der Quotient aus dem Reiseweg und der Reisezeit einschließlich aller Zwischenaufenthalte. Zur Bestimmung des Einflusses des Gefälles in den einzelnen Haltungen einer Wasserstraße auf die Reisegeschwindigkeiten in Berg- und Talfahrt wurden aus Schleusungszeitmessungen am Fluss M mit namentlichem Aufschrieb durch Verfolgung der Schiffe von Schleuse zu Schleuse deren Reisezeiten zwischen den Schleusen unter Ausschluß der Schleusungszeiten ermittelt und daraus die Geschwindigkeiten errechnet. Die Auswertung wurde in Abhängigkeit vom Wasserstand durchgeführt. Die Mittelwerte dieser errechneten Geschwindigkeiten sind in Abb. 23, 24 und 25 dar-

gestellt. Die Auswertung wurde für die Haltungen 2, 5 und 9 durchgeführt. Das Wasserspiegelgefälle beträgt bei einer Abflußmenge von  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{sec}$  in der

$$\text{Haltung 2: } \frac{1}{6910}$$

$$\text{Haltung 5: } \frac{1}{9680}$$

$$\text{Haltung 9: } \frac{1}{13270}$$

Vergleicht man diese Werte mit den errechneten Reisegeschwindigkeiten, so zeigt sich:

1. Die Differenzen zwischen den Mittelwerten der Geschwindigkeiten von Berg- und Talfahrt wachsen mit steigendem Gefälle
2. Je größer das Gefälle ist, umso stärker steigt die Schiffsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wasserstand in der Talfahrt an, bzw. fällt in der Bergfahrt ab.

In dem Diagramm für die Geschwindigkeiten in der Haltung 5 sind zusätzlich die aus der lokalen Geschwindigkeitsmessung (s. 2.2.2.2) gewonnenen Werte eingetragen, die sich in die Tendenz gut einfügen. Daraus kann geschlossen werden, daß die Fahrgeschwindigkeit innerhalb der Haltung als etwa konstant angesehen werden kann.

#### 2.4 Die Zahl der Überholungen auf Binnenwasserstraßen bei freiem Verkehr

An Stellen, wo der Verkehr als frei<sup>x)</sup>, stationär<sup>xx)</sup> und homogen<sup>xxx)</sup>

- 
- x) Freier Verkehr herrscht nach [21] dann, wenn sich nur wenige Fahrzeuge auf dem Verkehrsweg befinden und jeder Fahrer seine Fahrgeschwindigkeit völlig frei wählen kann (also auch alle notwendigen Überholungen, die zur Beibehaltung dieser gewünschten Geschwindigkeit erforderlich sind, frei ausführen kann).
  - xx) Stationarität herrscht nach [21] dann, wenn die statistischen Parameter unabhängig von der Zeit sind.
  - xxx) Homogenität herrscht nach [21] dann, wenn die statistischen Parameter unabhängig vom Weg sind.

angesehen werden kann, wurde untersucht, ob auf einer Wasserstraße sich dann auch die Zahl der Überholungen errechnen läßt [24], [25], [26]. Die Berechnung wurde nach der Formel

$$\dot{U}_{1(M)} = \sum_{v_0=0}^{v_0=v_{\max}} \frac{A(v_0)}{\bar{v}} \cdot \sum_{v=0}^{v < v_0} \frac{\Delta v}{v_0} \cdot A(v) \quad \text{[Überholungen pro Stunde und km]}$$

durchgeführt [25].

Hierbei bedeuten:

$A(v)$  = Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit innerhalb einer Geschwindigkeitsklasse mit Mittelwert  $v_0$

$\bar{v}$  = Mittlere Momentangeschwindigkeit.

Zur Überprüfung wurden auf einem freien Strom im Abstand von 7,9 km Zeitlücken- und Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Zur Verfolgung der Schiffe wurden die Namen notiert. Anhand dieser Aufschreibungen konnte die Zahl der praktisch durchgeführten Überholungen ausgezählt werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß durch Geschwindigkeitsschwankungen Mehrfachüberholungen auftreten können, d.h. daß sich einzelne Schiffe innerhalb der Meßstrecke wechselweise überholen, durch die Reihenfolge der Ankünfte an den Endquerschnitten aber gar keine oder nur eine Überholung erfaßt werden kann, und dadurch Fehler beim Auszählen vorhanden sind. Dieser Fehler dürfte jedoch in dem betrachteten Beispiel vernachlässigbar sein, da man, wie der Vergleich zwischen Lokal- und Reisegeschwindigkeit zeigt, von konstanter Geschwindigkeit über die Meßstrecke ausgehen kann. Aus der lokalen Geschwindigkeitsverteilung wurde nach [25] die Zahl der Überholungen, bezogen auf die Meßdauer von 7,66 h und die Entfernung der Meßquerschnitte von 7,9 km, errechnet. Ausgezählt wurden dabei 108 Überholungen, errechnet 106. Man kann also von einer sehr guten Übereinstimmung sprechen, die allerdings in dem betrachteten Beispiel möglicherweise zufällig ist. Die Bedingung, daß freier Verkehr herrscht, wurde durch Test der ermittelten Zeitlückensummenlinien auf ihre zufällige Abweichung von der Exponentialverteilung, die Bedingung der Stationarität durch Feststellung, daß der Erwartungswert des Zuflusses

über die Meßdauer konstant war, überprüft. Die Bedingung der Homogenität konnte durch Vergleich der Lokalgeschwindigkeiten mit den Reisegeschwindigkeiten, die durch Differenzbildung der Durchfahrtszeiten an den beiden Querschnitten ermittelt wurden, bestätigt werden, da deren Mittelwert und Standardabweichungen nur geringfügig voneinander abwichen.

	Lokalgeschw.	Reisegeschw.
Mittelwert	9,14	9,10
Standardabweichung	1,35	1,48

Die Berechnung der Überholungen, die im folgenden Wunschüberholungen genannt seien, erlaubt es, ein Kriterium über das Maß der Behinderung der Schifffahrt auf Kanälen anzugeben, bei denen ein freies Überholen nicht möglich ist.

Kennt man unter den oben definierten Voraussetzungen an einem Querschnitt einer Wasserstraße die Geschwindigkeitsverteilung eines Verkehrsstromes, so läßt sich daraus die Zahl der Wunschüberholungen auf der gesamten betrachteten Kanalstrecke errechnen. Die Zahl der tatsächlichen Überholungen läßt sich durch Auszählen aus dafür aufgestellten Zeit-Weg-Diagrammen für den untersuchten Kanalabschnitt ermitteln. Vergleicht man diese Zahl mit der Zahl der tatsächlich durchgeführten Überholungen, so läßt sich feststellen, ob diese Zahlen in etwa gleich sind oder ob Differenzen bestehen. Mit abnehmender Anzahl der tatsächlichen Überholungen gegenüber der Zahl der Wunschüberholungen steigt die Behinderung für die Schifffahrt, und die Notwendigkeit für eine Verbesserung der Überholmöglichkeiten wächst.

## 2.5 Überholwege für Schiffe auf Wasserstraßen

Im Zusammenhang mit der Zahl der Überholungen ist es auch von Interesse die Länge der Überholwege von Schiffen in Abhängigkeit von den Fahrgeschwindigkeiten zu kennen. Zur Quantifizierung dieser Frage wurde für das Beispiel, daß sich zwei 80 m-Schiffe überholen wollen, die Überhol-

wege in Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten der beiden Schiffe dargestellt. Als Voraussetzung wird bei dieser Berechnung eingeführt, daß der Abstand zwischen Bug des letzten und Heck des ersten Schiffes vor Beginn und nach Beendigung des Überholvorganges 100 m betragen soll. Die Formel für die Berechnung der Überholwege ergibt sich dann zu

$$l_2 = \frac{360}{v_2 - v_1} v_2$$

Hierbei bedeuten:

$l_2$  = Weg des überholenden Schiffes [m]

$v_1$  = Geschwindigkeit des überholten Schiffes

$v_2$  = Geschwindigkeit des überholenden Schiffes

Die graphische Darstellung (Abb. 26) zeigt deutlich, daß bei geringen Geschwindigkeitsdifferenzen Überholwege von einem und mehr Kilometern auftreten können.

In die Darstellung sind 4 Beispiele eingetragen:

Beispiel 1:  $v_1 = 8$  km/h;  $v_2 = 12$  km/h

Überholweg  $l_2 = 1080$  m

Beispiel 2:  $v_1 = 8$  km/h;  $v_2 = 9$  km/h

Überholweg  $l_2 = 3240$  m

Beispiel 3:  $v_1 = 6$  km/h;  $v_2 = 9$  km/h

Überholweg  $l_2 = 1080$  m

Beispiel 4:  $v_1 = 6$  km/h;  $v_2 = 12$  km/h

Überholweg  $l_2 = 720$  m

Daraus ergibt sich, daß bei den vorhandenen Sichtweiten, die sich aus den Krümmungsradien und der Länge der Geraden von Kanälen ergeben, bei 2-schiffigem Ausbau ein gefahrloses Überholen nur bei sehr hohen Geschwindigkeitsdifferenzen möglich ist. Dem stehen aber häufig Geschwindigkeitsbegrenzungen auf max. 12 km/h entgegen. Da in den seltensten Fällen Schiffe weniger als 6 km/h fahren, würde demnach der kürzeste auftretende Überholweg unter den gegebenen Voraussetzungen entsprechend Beispiel 4,  $l_2 = 720$  m betragen. Berücksichtigt man die häufigen Ge-

schwindigkeitsüberschreitungen (s. 2.2.2.3), so verkürzt sich auch der minimale Überholweg.

Als Beispiel für die vorhandenen Radien und die Längen der Zwischengeraden seien in den nachfolgenden Tabellen die Werte einer ca. 50 km langen Strecke des Kanals C angegeben.

Vorhandene Zwischengeraden

Länge [m]	Zahl	Gesamtlänge [m]	% der Streckenlänge von 50270 m	Σ % der Strecken- länge
0- 500	5	1400	2,78	2,78
500- 750	3	2090	4,16	6,94
750-1000	3	2790	5,55	12,49
1000-1250	3	3450	6,86	19,35
1250-1500	-	-	-	-
1500-1750	1	1670	3,32	22,67
1750-2000	1	1940	3,86	26,53
2000-2250	1	2020	4,02	30,55
2250-2500	2	4860	9,67	40,22
2500-2750	1	2620	5,21	45,43
2750-3000	-	-	-	-
> 3000	3	14860	29,55	74,98

Da bei Radien > 3500 m die Sichtbehinderungen nur sehr gering sind, wurden Strecken mit Radien > 3500 m als Geraden betrachtet.

Vorhandene Krümmungsradien

Radius [m]	Zahl	Gesamtlänge [m]	% der Streckenlänge von 50270 m	Σ % der Strecken- länge
600	1	270	0,54	0,54
700	2	1010	2,01	2,55
900	4	3450	6,86	9,41
1000	7	2640	5,25	14,66
1200	2	1620	3,22	17,88
1500	3	940	1,87	19,75
2000	6	2640	5,25	25,00

Zur Bestimmung der Sichtweiten wurde in Abb. 27 eine Kurvenschar in Abhängigkeit vom Radius für drei Kanalbreiten aufgetragen. Vereinfachend wurde dabei angenommen:

1. Die Schiffsbreite wird vernachlässigt.
2. Die Böschung ist senkrecht bzw. durch Bewuchs ist über die Böschung keine Sicht möglich, vorhandene Kurvenverbreiterungen bleiben vernachlässigt.
3. Das Schiff kann rechts oder links fahren.

Die Formel für die Berechnung der Kurven lautet:

$$l_s = \sqrt{(r + b)^2 - r^2}$$

$l_s$  = Sichtweite

$r$  = Radius der Innenkurve

$b$  = Kanalbreite

Ein Vergleich zwischen den notwendigen Überholwegen und den vorhandenen Sichtweiten auf dem beobachteten Teilstück zeigt, daß auf einem erheblichen Teil der Strecke, dessen prozentualer Anteil an der Gesamtstrecke von der Geschwindigkeitsdifferenz abhängt, nur infolge des dreischiffigen Ausbaus überholt werden kann, wobei auch das nur dann gefahrlos geschieht, wenn in der Gegenrichtung nicht gleichzeitig eine Überholung stattfindet.

## 2.6 Mögliche Überholungen auf kanalisiertem Wasserstraßen

Auf Wasserstraßen, deren Verkehrsfluss durch die Öffnungszeiten der Schleusen bestimmt wird und deren Querschnitt ausreichend ist, können sich einmal Schiffe überholen, die gemeinsam geschleust wurden, zum anderen können sich aber auch Schiffe überholen, die in aufeinanderfolgenden Schleusungen geschleust wurden. Die Zahl dieser Überholungen hängt jedoch stark von der Zeit für eine Kreuzungs- bzw. Richtungs-schleusung, von der Länge der Haltungen und den Geschwindigkeitsdifferenzen ab. Am Beispiel des Flusses M wurde für zwei Schleusenöffnungszeiten (zeitlicher Abstand, in dem Schiffe die Schleuse in der gleichen

Richtung verlassen können) die Länge  $l$  der Einholwege dargestellt.

Die Strecke  $l$  errechnet sich nach der Formel

$$l = \frac{s}{\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}}$$

Hierbei bedeuten:

$s$  = Zeitdifferenz zwischen der Ausfahrt zweier  
Schiffe aus der Kammer

$v_1$  = Geschwindigkeit des zuerst ausgefahrenen Schiffes

$v_2$  = Geschwindigkeit des einholenden Schiffes

In den Darstellungen sind die Haltungslängen eingetragen, so daß man sofort ablesen kann, in welchen Haltungen ein Einholen bei den verschiedenen Geschwindigkeiten und Differenzen der Ausfahrzeiten möglich ist (Abb. 28 und 29).

Die Darstellungen zeigen, daß sich bei der Länge der Haltungen nur Schiffe mit relativ großen Geschwindigkeitsdifferenzen einholen können.

Es läßt sich daraus der Schluß ziehen, daß ein zweischiffiger Ausbau von Wasserstraßen mit geringen Haltungslängen für die Schifffahrt keine wesentlichen Behinderungen darstellt, da die Zahl der möglichen Überholungen von Schiffen, die zu verschiedenen Zeiten geschleust wurden, sehr gering ist und ein Überholen der Schiffe untereinander, die gemeinsam geschleust wurden, keinen Zeitgewinn erbringt, wenn die Schiffe wieder gemeinsam geschleust werden.

Die geringen Überholmöglichkeiten auf kanalisiertem Wasserstraßen sind eine günstige Voraussetzung für eine Koordinierung von Schleusenketten, da eine Koordinierung sich dann besonders empfiehlt, wenn einmal vorhandene Pulks möglichst lange, d.h. in diesem Fall bis zur folgenden Schleuse zusammenbleiben [22] (s. Kap. 5.3).



### 3. Die Leistungsfähigkeit von Binnenwasserstraßen auf der Strecke

#### 3.1 Leistungsfähigkeit von Engpässen

Bei nicht kanalisierten Wasserstraßen oder bei sehr langen Abschnitten von kanalisierten Wasserstraßen, an denen sich keine Schleusen befinden, ist für die Leistungsfähigkeit der Strecke die Leistungsfähigkeit der engsten Stelle bzw. der Stelle mit der geringstmöglichen Fahrgeschwindigkeit innerhalb dieser Strecke maßgebend. Für den Verkehrsablauf auf der Strecke gilt nach [21] die Kontinuitätsgleichung:

$$M = \bar{v}_m \cdot D$$

$$M = \text{Verkehrsmenge [Schiffe/h]}$$

$$\bar{v}_m = \text{mittlere Momentangeschwindigkeit [km/h]}$$

$$D = \text{Verkehrsdichte [Schiffe/Längeneinheit]}$$

$$D = \frac{1000}{\bar{a}}$$

$$\bar{a} = \text{mittlerer Bruttoabstand [m]}$$

Durch Einsetzen ergibt sich dann:

$$M = \bar{v}_m \cdot \frac{1000}{\bar{a}}$$

Als Modell wird hier betrachtet, daß nur 80 m-Schiffe des Typs "Johann-Welker" verkehren und in diesem Engpass keine Überholmöglichkeit besteht.

Für den Abstand wird von zwei verschiedenen Annahmen ausgegangen.

1. Der Minimalabstand der Schiffe sei entsprechend § 51,2 der RhSchFVO mit 120 m konstant, unabhängig von der Geschwindigkeit.
2. Da in der BSchSO nur ein "ausreichender" Abstand verlangt wird, werden in Abb. 30 noch Werte für 80 m (Schiffslänge) und 160 m

(doppelte Schiffslänge) Abstand eingetragen. Es handelt sich bei diesen Abstandswerten um Netto-Abstände, die vom Heck des ersten zum Bug des folgenden Schiffes gemessen werden. Die Bruttoabstände beinhalten zusätzlich noch die Schiffslänge.

Die Ergebnisse wurden in Diagrammform dargestellt (Abb. 30): Zu der jeweiligen Geschwindigkeit  $v$  läßt sich dann die jeweilige Verkehrsmenge  $M$  in Abhängigkeit vom Bruttoabstand ablesen. Zwischenwerte können interpoliert werden.

Als Beispiel 1 und 2 wurden in dem Diagramm von der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V. durch persönliche Information angegebene Werte für  $v$  für das Typschiff "Johann Welker" auf dem Kanal D eingetragen. Die Abladung beträgt hierbei 1,5 m. Die Geschwindigkeit von 10,10 km/h stellt die heutige, 12,75 km/h die nach dem geplanten Ausbau fahrbare Höchstgeschwindigkeit dar. Die Verkehrsmenge beträgt dann, je nach dem gewählten Abstandsmaß, zwischen 42,5 und 80 Schiffe pro Stunde.

In [2] wurde eine Berechnung für die Leistungsfähigkeit eines Engpasses an einem freien Strom durchgeführt. Die mittlere Schiffslänge wurde dabei nach dem vorhandenen Schiffspark zu 60 m geschätzt und der Nettoabstand mit 120 m (entsprechend § 51.2 RhSchPVO) eingesetzt. Es ergab sich dann bei einer gemessenen mittleren Momentangeschwindigkeit zu Berg von 5 km/h eine bewältigbare Verkehrsmenge von

$$M = \frac{1000 \cdot 5}{180} = 28 \text{ Schiffe/Stunde zu Berg}$$

Beobachtet wurden 25 Schiffe/Stunde zu Berg.

Die graphische Lösung wurde als Beispiel 3 in Abb. 30 eingetragen. Aus dem Diagramm kann dann die Leistungsfähigkeit anderer Fahrwässer in Abhängigkeit von der möglichen Fahrgeschwindigkeit und dem Bruttoabstand abgelesen werden.

Die Dimension der Leistungsfähigkeit ist hier jeweils in Schiffen pro Stunde angegeben. Da aber auf Wasserstraßen mit wechselndem Wasserstand die Schiffe oft nicht voll abgeladen fahren können, ist es auch notwendig, die Leistungsfähigkeit an einem Querschnitt in Ladefähig-

keitstonnen pro Stunde anzugeben. Die Ladefähigkeitstonnen sind bei der Umrechnung als Funktion des Wasserstandes bzw. der Abladetiefe einzusetzen. Solche Werte können z.B. für die Typschiffe des Zentralvereins für deutsche Binnenschifffahrt den Typenbeschreibungen entnommen werden [27].

Auf Wasserstraßen mit einheitlichem Querschnitt wird die maximale Leistungsfähigkeit bei Kolonnenverkehr im allgemeinen durch die zugelassene Höchstgeschwindigkeit bestimmt, soweit diese eingehalten wird (s. 2.2.2.3). Häufig tritt jedoch durch eine Geschwindigkeitsverminderung an Parallelhäfen und Länden, die notwendig ist, damit nicht durch Sog oder Wellenschlag mit dort liegenden Schiffen Havarien entstehen, eine Leistungsminderung ein. Da in den betrachteten Fällen der Schiffsabstand unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit in die Kontinuitätsgleichung eingesetzt wird, nimmt die unter der Voraussetzung von Kolonnenverkehr maximal bewältigbare Verkehrsmenge linear mit sinkender mittlerer Geschwindigkeit ab.

### 3.2 Zusammenhang zwischen Wasserstand und notwendiger Anzahl von Schiffen

Soll eine bestimmte Menge von Gütern über eine bestimmte Entfernung transportiert werden, so ist dafür eine bestimmte Zahl von Schiffen notwendig. Diese Zahl hängt jedoch in zweifacher Beziehung vom Wasserstand ab.

1. Sinkt der Wasserstand unter ein gewisses Maß, so können die Schiffe nicht mehr voll abgeladen fahren [2], [28].
2. Mit dem Wasserstand ändert sich auch die Schiffsgeschwindigkeit. Messungen, die über 3 Jahre an einem Querschnitt eines freien Stromes bei verschiedenen Wasserständen durchgeführt wurden, haben ergeben, daß an diesem Querschnitt bei Talfahrt mit wachsendem Wasserstand die Schiffsgeschwindigkeit ansteigt, während sie bei Bergfahrt bis zu einem bestimmten Wert ansteigt und von da an etwa konstant bleibt (Abb. 16).

Eine Untersuchung über diese Einflüsse auf der Donau wurde bereits durchgeführt und in [29] veröffentlicht.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Gesichtspunkte ergibt sich, daß mit sinkendem Wasserstand für die gleiche in einer bestimmten Zeit zu transportierenden Gütermenge mehr Schiffe benötigt werden. Für die Bestimmung der Zahl der Schiffe, die zur Bewältigung eines Transportvorgangs in einer bestimmten Zeit notwendig sind, wurde ein graphisches Verfahren entwickelt. Folgende Annahmen wurden getroffen:

1. Es wird das Typschiff "Johann Welker" untersucht, der Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Abladetiefe wurde nach den Angaben in [27] errechnet.
2. Es werden die bei Messungen ermittelten Beziehungen zwischen Schiffsgeschwindigkeit und Wasserstand zugrundegelegt (s. Kap. 2.2.2.1).
3. Es wird eine Transportweite von 200 km betrachtet.
4. Die zu transportierende Gütermenge betrage 1350 t. Diese Menge wird zugrundegelegt, da sie gerade eine Schiffsbeladung des betrachteten Schiffes bei voller Ablademöglichkeit beträgt.

In Abb. 31 ist in Teil I die Abhängigkeit zwischen Abladetiefe und Tragfähigkeit und in Teil III die Umlaufzeit in Abhängigkeit vom Wasserstand aufgetragen, die aus den in Teil II aufgetragenen mittleren Geschwindigkeiten punktweise errechnet wurde. Teil IV zeigt die Abhängigkeit zwischen Umlaufzeit und Zahl der notwendigen Schiffe in Abhängigkeit vom Wasserstand. Teil V stellt die Beziehung zwischen Tragfähigkeit und notwendiger Zahl der Schiffe dar. Bei gegebenem Wasserstand erhält man auf den Ordinaten A und B der Teile IV und V Werte, die die Zahl der aus den Einzelabhängigkeiten notwendigen Schiffe angeben. Verbindet man beide Punkte, so erhält man einen Schnittpunkt mit der Kurve in Teil VI. Die Zahl der gegenüber einer möglichen Abladetiefe von 2,50 m notwendigen Schiffe zur Beförderung von 1350 t Ladegut über eine Entfernung von 200 km in Abhängigkeit vom Wasserstand ergibt sich dann auf der Ordinate C.

Zu beachten ist, daß die Beziehung zwischen Abladetiefe und Tragfähigkeit nur für Wasserstände unter 2,0 m gilt. Für größere Wasserstände steigt die Tragfähigkeit nicht weiter an. Die Gesamtzahl der notwendigen

gen Schiffe kann in diesem Fall direkt auf Ordinate A in Teil IV abgelesen werden.

In Abb. 31 sind 2 Beispiele eingetragen:

Beispiel 1 für den Wasserstand  $w = 1,00$  m

Beispiel 2 für den Wasserstand  $w = 2,15$  m

Bei  $w = 1,00$  werden 2,85 Schiffe benötigt, gegenüber einem Schiff bei voller Ablademöglichkeit, die einem Wasserstand von  $w = 2,00$  entspricht. A ergibt sich dabei zu 1,23, B zu 2,32.

Bei  $w = 2,15$  ist Vollabladung möglich. Die Zahl der notwendigen Schiffe wird demnach nur von der veränderten Fließgeschwindigkeit beeinflusst. Das Ergebnis kann auf der Ordinate A zu 0,98 abgelesen werden.

Das graphische Verfahren enthält naturgemäß ein gewisses Maß an Ungenauigkeiten. Braucht man nur eine Abhängigkeit zwischen Wasserstand und Schiffsgeschwindigkeit zu berücksichtigen, so empfiehlt sich deshalb, das Ergebnis analytisch zu ermitteln.

Der Rechengang ist dabei folgender:

$$1.) \quad \frac{1}{\bar{v}_B} \cdot L = R_B$$

$$\frac{1}{\bar{v}_T} \cdot L = R_T$$

$$\bar{v}_B = \text{mittlere Geschwindigkeit zu Berg}$$

$$\bar{v}_T = \text{mittlere Geschwindigkeit zu Tal}$$

$$L = \text{Transportweite}$$

$$R_B = \text{Reisezeit zu Berg}$$

$$R_T = \text{Reisezeit zu Tal}$$

$$R_B + R_T = R_{\text{Ges.}}$$

$R_{\text{Ges}}$  ist für den zu betrachtenden Wasserstand ( $R_{\text{vorh}}$ ) und den Wasserstand bei voller Ablademöglichkeit ( $R_{2,5}$ , da in dem Beispiel die max. Abladetiefe des Schiffes 2,5 m sei) zu bilden.

$$\frac{R_{\text{vorh}}}{R_{2,5}} = A$$

A = Zahl der notwendigen Schiffe infolge  
verminderter Geschwindigkeit

2.)

$$\frac{y_{2,5}}{y_s} = B$$

$y_{2,5}$  = max. Ladefähigkeit

$$y_s = a x + b$$

a, b = Konstante, die sich aus den Massen  
des betrachteten Schiffes ergeben

x = mögliche Abladetiefe in Abhängig-  
keit vom Wasserstand

B = Zahl der notwendigen Schiffe infolge  
verminderter Abladetiefe

Bestimmung von a und b

1.)  $y_s = \text{max. Tragfähigkeit} = y_{2,5}$

$x = \text{max. Abladetiefe} = 2,5$

2.)  $y_s = 0$

$x = \text{Abladetiefe bei Leerfahrt} = x_L$

Daraus folgt:

$$y_{2,5} = 2,5 a + b$$

$$0 = x_L a + b$$

---

$$y_{2,5} = (2,5 - x_L) a$$

$$a = \frac{y_{2,5}}{2,5 - x_L}$$

$$b = \frac{x_L \cdot y_{2,5}}{2,5 - x_L}$$

Die Gleichung für  $y_s$  gilt nur für Werte von  $x$ , die kleiner sind als die volle Ablademöglichkeit des Schiffes. Für größere Werte von  $x$  nimmt die Ladefähigkeit nicht weiter zu. In diesen Fällen ergibt sich  $B$  konstant zu 1.

- 3.) Durch Multiplikation von  $A$  und  $B$  ergibt sich  $C$ , die Gesamtzahl der notwendigen Schiffe.

Wie Leutzbach gezeigt hat, lässt sich für die Berechnung auch eine geschlossene Lösung finden:

$$C = A(v) \cdot B(x) = L \cdot a \cdot \frac{v_B(w) + v_T(w)}{v_B(w) \cdot v_T(w)} \cdot \frac{k}{y_s}$$

$a, k = \text{Konstanten}$

Im folgenden wird jedoch wegen des einfacheren Rechnungsganges die schrittweise Berechnung beibehalten.

Beispiel 1, Abb. 31

$$1.) \quad \bar{v}_B = 5,76 + 2,58 w - 0,33 w^2$$

$$\bar{v}_T = 7,16 + 6,01 w - 0,63 w^2$$

(s. Kap. 2.2.2.1)

$w$  sei 1,0 m, somit folgt:

$$\bar{v}_B = 8,01$$

$$\bar{v}_T = 12,54$$

$$R_B = \frac{1}{8,01} \cdot 200 = 24,97$$

$$R_T = \frac{1}{12,54} \cdot 200 = 15,95$$

$$R_{1,5} = 40,92 \text{ [h]}$$

w sei 2,0 m, somit folgt:

$$\bar{v}_B = 9,60$$

$$\bar{v}_T = 16,65$$

$$R_B = \frac{1}{9,60} \cdot 200 = 20,85$$

$$R_T = \frac{1}{16,65} \cdot 200 = 12,02$$

$$R_{2,5} = 32,87 \text{ [h]}$$

$$A = \frac{40,92}{32,87} = 1,24 \text{ Schiffe}$$

2.)

$$y_{2,5} = 1350$$

$$y_s = 766 x - 566$$

$$x = 1,5$$

$$y_s = 583$$

$$B = \frac{1350}{583} = 2,32$$

3.)

$$A \cdot B = C$$

$$C = 1,24 \cdot 2,32 = 2,88 \text{ Schiffe}$$

Beispiel 2, Abb. 31

1.)

$$R_{2,5} = 32,87 \text{ [h]}$$

$$R_{2,65} = R_B + R_T = \frac{1}{v_B} + \frac{1}{v_T}$$

$$v_B = 10,21$$

$$v_T = 17,17$$



$$R_B = \frac{1}{10,21} \cdot 200 = 19,59$$

$$R_T = \frac{1}{17,17} \cdot 200 = 11,65$$

$$R_{2,65} = 31,24$$

$$A = \frac{31,24}{32,87} = 0,95$$

2.) Da  $x = 2,65 > 2,5$  ist, wird  $y_s = y_{2,5}$  und somit  $B = 1$

3.)  $C = A \cdot B = 0,95 \cdot 1 = 0,95$  Schiffe

Als Beispiel für tatsächlich ermittelte Auslastungen des Einzelschiffes in Abhängigkeit vom Wasserstand wurden nach [27] die dort angegebenen Werte in Abb. 32 graphisch dargestellt. Es zeigt sich dabei, daß die Auslastung bis zum Wasserstand bei Vollsichtigkeit in etwa linear zunimmt.

#### 4. Die Leistungsfähigkeit von Wasserstraßen mit Schleusen

Bei Wasserstraßen, an denen aus topographischen und hydrologischen Gründen Wehre und Schleusen angelegt werden müssen, wird die Leistungsfähigkeit der gesamten Wasserstraße praktisch immer durch die Leistungsfähigkeit der Schleusen bestimmt.

Zur Verdeutlichung sei hier ein kurzes Beispiel angeführt: Entsprechend 3.1 kann Kanal D auf der freien Strecke eine Verkehrsmenge von ca. 40 bis ca. 80 Schiffen vom Typ "Johann Welker" pro Stunde und Richtung je nach der Wahl des Nettoabstandes der Schiffe bewältigen. An der Schleusengruppe 1 am Kanal D können jedoch bei Vollausslastung nur etwa 4,1 Schiffe vom Typ "Johann Welker" pro Stunde geschleust werden [2]. Das bedeutet, daß die Schleusenkapazität auf das 10- bis 20-fache der jetzigen Kapazität erhöht werden müßte, um die gleiche Leistungsfähigkeit wie auf der freien Strecke zu erreichen.

Soll die Leistungsfähigkeit einer kanalisierten Wasserstraße demnach gesteigert werden, so ist es notwendig, die Kapazität der Schleusen zu steigern. Dies kann auf verschiedene Weisen geschehen:

1. Durch Beschleunigung des Schleusungsvorgangs, insbesondere durch:
  - 1.1 Verkürzung der Füll- und Leerungszeiten, Einrichtung von zentralen Steuerständen.
  - 1.2 Verbesserung der Einfahrverhältnisse für die Schiffe.
2. Durch Verlängerung der Schleusenbetriebszeit.
3. Durch den Bau weiterer Schleusenammern an der gleichen Staustufe.

Mit den unter 1.1 genannten Maßnahmen sind an modernen Schleusenanlagen in der Regel nur noch geringfügige Verbesserungen zu erzielen, da die Füll- und Leerungseinrichtungen nach dem heutigen Stand der Technik für einen sicheren Betriebsablauf bereits weitgehend optimal gestaltet sind. Höchstens bei sehr alten und noch nicht modernisierten Schleusen lassen sich hierbei noch Zeitgewinne erzielen.

Ein Ansatzpunkt wäre allerdings hier, soweit noch nicht vorhanden, die Einrichtung zumindest zentraler, möglichst aber automatischer

Steueranlagen mit Fernsehüberwachung, damit die Laufzeiten der Schleusengehilfen von einem Haupt zum anderen zur Bedienung des jeweiligen Steuerstandes wegfallen.

Zur Verbesserung der Einfahrverhältnisse bzw. Verkürzung der Einfahrzeiten wäre es sinnvoll, an allen Schleusen Startplätze einzurichten, auf die alle für die nächste Schleusung eingeteilten Schiffe vorziehen müssen. In [30] wird über das Startplatzsystem am Fluss N im Zusammenhang mit den Unzuträglichkeiten in den Vorhäfen folgendes ausgeführt:

"Dieses Startplatzsystem haben wir alle begrüßt und viele Hoffnungen daran geknüpft, die jedoch nur teilweise in Erfüllung gegangen sind. Ohne Zweifel hat das Startplatzsystem den Schleusungsvorgang beschleunigt und wesentlich zur Leistungsfähigkeit der immer stärker belasteten Wasserstraßen beigetragen."

(Die erwähnten, nicht erfüllten Hoffnungen beziehen sich nicht auf die Leistungssteigerung, sondern auf die Rangordnung im Vorhafen und damit verbundene Personalfragen.)

Es hat sich bei Beobachtungen des Betriebsablaufes häufig gezeigt, daß sich sowohl die wartenden Schiffe untereinander vor der Einfahrt wie auch einfahrende und ausfahrende Schiffe behindern. Letzteres geschieht dadurch, daß durch das Manövrieren der sich zur Einfahrt vorbereitenden Schiffe das Fahrwasser für die Ausfahrt gesperrt ist. Naturgemäß entstehen dadurch Verzögerungen.

Die Startplätze wären so nahe vor der Schleuse anzulegen, daß Schiffe von dort aus unter einfachster Manövrierung die Schleusenammer nach Einfahrtfreigabe in kürzester Zeit erreichen können. Andererseits muß er aber soweit abliegen, daß die ausfahrenden Schiffe nicht behindert werden.

Der Startplatz muß eine Größe aufweisen, die allen Schiffen einer Kammerbelegung gleichzeitig Anlegeplatz bietet, ohne daß sich die Schiffe bei der Einfahrt behindern.

Verkürzungen der Einfahrzeiten können u.U. auch durch verbesserte Vorhafensignalisierung erreicht werden, da es sich z.B. an der Schleusen- gruppe 2 des Kanals C häufig gezeigt hat, daß Schiffe, die vor einer Kammer im Rang waren, vor die andere wechseln, in der Hoffnung, dort schneller geschleust zu werden. Durch solche Manöver können die aus- fahrenden Schiffe behindert werden und somit Zeitverzögerungen auf- treten.

Die erwähnte Verlängerung der Schleusenbetriebszeit läßt sich bei den derzeitigen Betriebszeiten, die in der Regel 16 Stunden betragen, nur durch Einführung der Nachtschiffahrt verwirklichen. Damit werden je- doch zahlreiche Probleme aufgeworfen, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll. Im Gegensatz zu den Punkten 1 und 2 sind zur Verwirklichung von Punkt 3 sehr große Investitionen erforderlich. Die Rentabilität solcher Investitionen sollte jedoch nachgewiesen werden. Ein Kriterium, wann der Bau einer weiteren Schleusenkammer notwendig ist, wäre dadurch gegeben, daß man für die zumutbare Wartezeit der Schiffe vor der Schleuse eine obere Grenze setzt, die nicht überschritten werden darf. Falls es möglich ist Zeitverlust in Geld umzurechnen, kann diese Grenze so bestimmt werden, daß man vorgibt, der in Geld umgerechnete Zeitverlust der Schiffe vor der Schleuse pro Jahr dürfte die jährlichen Aufwendungen für Bau und Betrieb einer neuen, zusätzlichen Schleusenkammer nicht überschreiten. Auf die Wartezeitgewinne beim Bau zweiter Schleusenkammern wird in 4.4.2 näher eingegangen.

#### 4.1 Methoden zur Leistungsfähigkeitsberechnung von Schleusen

Bereits seit einigen Jahrzehnten wird versucht, die Leistungsfähig- keit von Schleusen theoretisch zu berechnen. Im folgenden Kapitel wurden die bisherigen Formeln zusammengestellt.

Bei der Behandlung der Formeln sind immer die im Original verwendeten Bezeichnungen übernommen worden. Diese Bezeichnungen stimmen im all- gemeinen nicht mit den sonst in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen überein.

4.1.1

Die erste Methode zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Schleusen wurde 1932 veröffentlicht [31]. Die dabei verwendeten Formeln geben die Leistung für Berg- und Talfahrt gemeinsam an:

$$Q = \frac{b}{(m-n) S_T + n S_K} \cdot Z_m \quad [\text{Fahrzeuge/Betriebszeit}] \quad (1)$$

$$Q = \frac{b \cdot Z_m \cdot L_m \cdot \frac{P_T + P_B}{200}}{(m-n) S_T + n S_K} \quad [\text{Tonnenladung/Betriebszeit}] \quad (2)$$

b = tägl. Betriebszeit

m = Anteil des Talverkehrs am Gesamtverkehr

n = Anteil des Bergverkehrs am Gesamtverkehr

m + n = 1

S<sub>T</sub> = Zeit für eine Talschleusung

S<sub>B</sub> = Zeit für eine Bergschleusung

S<sub>K</sub> = Zeit für eine Kreuzungsschleusung

Z<sub>m</sub> = mittlere Anzahl der Schiffe in der Kammer

L<sub>m</sub> = Ladung eines mittleren Schiffes in [t]

P<sub>B</sub> = Anteil der beladenen Schiffe am Gesamtbergverkehr in %

P<sub>T</sub> = desgl. am Gesamttalverkehr

$$Z_m \text{ theor.} = \frac{100}{\sum p_i / Z_i} = \frac{100}{\sum w}$$

Z<sub>i</sub> =  $\left(\frac{L}{l}\right) \cdot \left(\frac{B}{b}\right)$  (Beide Faktoren müssen ganzzahlig sein, Brüche sind abzurunden.) Es wird vorausgesetzt, daß immer nur Schiffe gleicher Abmessungen gleichzeitig in der Kammer geschleust werden.

L = Kammerlänge

l = Schiffslänge

B = Kammerbreite

b = Schiffsbreite

$p_i$  = Anteile der einzelnen Schiffsgrößen am Gesamtverkehr (%)  
(1 und b beziehen sich auf eine Schiffsgröße)

$w$  = "Wahrscheinlichkeitswert"  $p_i/Z_i$

$Z_m$  prakt. =  $Z_m$  theor. · k

k = Abminderungsfaktor, der sich als Funktion der Kammer- und Fahrzeuggröße darstellt

k = 0,032  $Z_m$  theor. + 1,032 (aus Versuchen ermittelt)

Die Jahresleistung ergibt sich dann zu  $J_{\max} = Q \cdot B$

B = Zahl der Betriebstage/Jahr

Diese Formel enthält zwei Fehler:

1. Nach [32] ergibt der Ausdruck  $\frac{p_T + p_B}{200}$  nur für  $p_T = p_B$  richtige

Werte. Daher müssen  $p_T$  und  $p_B$  entsprechend m und n gewichtet werden.

Der Ausdruck muß dann richtig lauten:

$$\frac{m \cdot p_T + n \cdot p_B}{100}$$

2. Der Ausdruck

$$Z_m \text{ theor.} = \frac{100}{\sum p_i/Z_i}$$

ist mathematisch nicht exakt.

$Z_m$  theor. ist die mittlere Anzahl von Schiffen in der Kammer.

Der Mittelwert errechnet sich jedoch exakt nach der Formel:

$$Z_m \text{ theor.} = \frac{\sum p_i Z_i}{100}$$

Diese Formel ist mit der in [31] angegebenen Formel nicht identisch.

Behält man die Bedingung bei, daß bei jeder Schleusung nur Schiffe gleicher Größe die Kammer füllen, so zeigen die folgenden zwei Beispiele das unterschiedliche Ergebnis der beiden Mittelwertbildungen.

Annahmen:

$Z_i$	Beispiel 1 $P_i$	Beispiel 2 $P_i$
6	0,50	0,5
2	0,15	-
3	0,30	0,5
4	0,05	-

Ergebnis:

	Nach [31] $Z_m$ theor.	Nach exakter Mittelwertbildung $Z_m$ theor.
Beispiel 1	$\frac{100}{\frac{50}{6} + \frac{15}{2} + \frac{30}{3} + \frac{5}{4}} = 3,69$	$\frac{6 \cdot 50 + 2 \cdot 15 + 3 \cdot 30 + 4 \cdot 5}{100} = 4,40$
Beispiel 2	$\frac{100}{\frac{50}{6} + \frac{50}{3}} = 4,00$	$\frac{6 \cdot 50 + 3 \cdot 50}{100} = 4,50$

Die Abweichungen der Berechnungsmethoden sind demnach erheblich. Ein den vorhandenen Verhältnissen entsprechendes Ergebnis läßt sich jedoch auch durch die exakte Mittelwertbildung wegen der Bedingung, daß nur Schiffe gleicher Abmessungen die Kammer füllen, nicht erzielen. In [31] werden beide Ungenauigkeiten durch den empirisch ermittelten Korrekturfaktor  $k$  ausgeglichen. Der Faktor  $k$  wurde aufgrund der damaligen Schiffsgrößenzusammensetzung bestimmt.

Ein der Schiffsgrößenzusammensetzung entsprechendes Ergebnis könnte nur durch wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung aller möglichen Schiffsgrößenkombinationen, entsprechend der Häufigkeit des Auftretens, gewonnen werden.

Die Formel gibt nach Eliminierung der erwähnten Fehler die theoretisch mögliche Leistung bei gegebener Verkehrszusammensetzung und gegebenen Verkehrsströmen an. Zur Berechnung der praktischen Leistung wird ein Abminderungsfaktor eingeführt. Dieser Faktor wird in [31] generell zu 0,3 angenommen.

#### 4.1.2

Zur genaueren Untersuchung des Faktors von 0,3 wurde die Formel 1953 überarbeitet und erweitert [33]. Der Faktor wurde dabei in "Wirkungsgrade" aufgespalten.

Die einzelnen Wirkungsgrade berücksichtigen folgende Einflüsse:

$W_1$  = Schwankungen der Art und Größe der Schiffe.

$W_2$  = Ungleichzeitigkeit der Schiffsankünfte zu Berg und Tal.

$W_3$  = Schwankungen der Abladung, bedingt durch wechselnde Flußwasserstände.  $W_3$  kann für Berg- und Talfahrt (bei versch.  $p_T$  u.  $p_B$ ) unterschiedlich sein.

$W_4$  = Jahreszeitl. Schwankung des Verkehrsaufkommens.  $W_4$  steht in direktem Zusammenhang mit  $W_3$ . Es muß der Wirkungsgrad  $W_4$  berücksichtigt werden, der im Produkt mit  $W_3$  den kleinsten Wert ergibt.

$W_5$  = Monatszeitl. Schwankung des Verkehrsaufkommens

$$W_{\text{Ges.}} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5$$

Die praktische Jahresleistung (Grenzleistung) ergibt sich dann zu:

$$J_{\text{grenz}} = J_{\text{max}} \cdot W_{\text{Ges.}}$$

Das Berechnungsverfahren eignet sich für die Berechnung der Anzahl der Schiffe und der Maximaltonnage, die pro Richtung und Zeiteinheit geschleust werden kann. Es müssen jedoch die Wirkungsgrade für alle auftretenden Fälle bestimmt und graphisch aufgetragen werden, so daß z.B. die möglichen Ladungstonnen pro Tag für verschiedene Werte des Beladungsgrades abgelesen werden können.

#### 4.1.3

Eine Formel zur Berechnung der notwendigen täglichen Betriebsstunden  $J$  wurde 1955 veröffentlicht [7]. Die Formel lautet:

$$J = \frac{\alpha}{n} \cdot \left( \frac{S_f}{b_f} + \frac{S_k}{b_k} \right) \cdot \frac{k}{2 \cdot 60}$$



Die Bezeichnungen sind in [7] wie folgt erläutert:

$S_f$  = Gesamtzahl der jährlich durch die Schleuse verkehrenden Selbstfahrer.

$S_k$  = Gesamtzahl der jährlich durch die Schleuse verkehrenden Schleppkähne.

$b_f$  = mittlere Belegungszahl je Schleusung für Selbstfahrer.

$b_k$  = mittlere Belegungszahl je Schleusung für Schleppkähne. Die Größen  $b_f$  und  $b_k$  sind nach den Ausmaßen der durchschnittlichen Schiffsgrößen und nach der Oberfläche der jeweiligen Schleuse (Nutzlänge x Nutzbreite) festzulegen.

$k$  = Gesamtdauer einer Kreuzungsschleusung einschließlich Verholzeiten in Minuten. Die Gesamtdauer einer Kreuzungsschleusung setzt sich dabei zusammen aus den Verholzeiten, aus den Zeiten für Öffnen und Schließen der Tore, aus den Füll- und Entleerungszeiten der Schleuse und evtl. aus den Laufzeiten der Schleusengehilfen von Haupt zu Haupt.

$n$  = Anzahl der Betriebstage im Jahr. Es mag hier zulässig sein, die Zahl der Betriebstage im Jahr mit 340 anzunehmen, da es sich um Vergleichszahlen handelt. Für die nordwestdeutschen Schleusen wird diese Zahl im allgemeinen zutreffen, für die süddeutschen Wasserstraßen ist sie zu hoch. Das bedeutet für die süddeutschen Schleusen, daß die wirklichen täglichen Schleusenbetriebsstunden über der Vergleichszahl liegen und daß bei Spitzenverkehr entsprechend längere Wartezeiten der Schiffe in den Vorhäfen eintreten.

$\alpha$  = Beiwert, der die Unregelmäßigkeit des täglichen Verkehrsanfalles berücksichtigt. Dieser Wert kann unter der Annahme, daß bei starkem Verkehr keine Schleusungspausen und Leerschleusungen eintreten,  $\alpha = 1$  gesetzt werden.

Vernachlässigt man den geringen Anteil an Schleppzügen, der noch auf den Wasserstraßen verkehrt, so vereinfacht sich die Formel wie folgt:

$$J = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{S_f}{b_f} \cdot \frac{k}{2 \cdot 60}$$

Statt der Jahreswerte für  $S_f$ ,  $b_f$  und  $n$  können in die Formel auch auf einen anderen Zeitraum bezogene Werte eingesetzt werden. Damit erhält man dann eine Angabe über die notwendige Zahl von Betriebsstunden bei einer mittleren Kammerbelegung.

Formt man die Gleichung um, so erhält man die maximale Zahl der Schiffe, die pro Tag bei voller Kammerbelegung  $b_f$  geschleust werden kann:

$$S_f = J \cdot b_f \cdot \frac{n}{\alpha} \cdot \frac{2 \cdot 60}{k}$$

Betrachtet man darüberhinaus  $\frac{S_f}{n \cdot J}$  als Auslastungsgrad der Anlage, so läßt sich durch weitere Umformung die Abhängigkeit der Kammerbelegung von der Auslastung darstellen:

$$b_f = \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{S_f}{J} \cdot \frac{k}{2 \cdot 60}$$

In Abb. 33 sind am Beispiel der Schleuse 1 am Kanal C eingetragen:

1. Die Gerade für  $\alpha = 1$

$$n = 1$$

$$S_f = \text{Schiffe/Tag}$$

$$b_f = \text{mittlere Kammerbelegung (aus Meßwerten)} = 1,31 \text{ Schiffe}$$

$$k = 25,9 \text{ min.}$$

2. Die Gerade mit gleichen Ausgangsgrößen wie zuvor, nur für  $b_f = \text{max.}$  Kammerbelegung = 2,54 Schiffe

3. Meßwerte aus Auswertungen aus Schleusenbüchern.

Die Darstellung zeigt, daß sich die empirisch ermittelten Werte sehr eng an die theoretisch ermittelte Gerade anschmiegen. Der Abstand der beiden Geraden in Abszissenrichtung zeigt die Leistungsreserven infolge nicht ausgenutzter Kammerfläche.

#### 4.1.4

Auf anderer Basis wurde 1953 eine weitere Formel zur Leistungsfähigkeitsberechnung von Schleusen aufgestellt [34].

Die Formel lautet:

$$D = n \cdot d \left[ \frac{t}{\text{Jahr}} \right]$$

D = Maximal bewältigbare Verkehrsmenge t/Jahr  
und Richtung

d = Maximal bewältigbare Verkehrsmenge t/Tag  
und Richtung

$$n = \frac{T}{p_m}$$

$$p_m = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_x}{x}$$

$p_m$  = arithm. Mittel der bewältigten Verkehrsmenge  
an ausgewählten, aufeinanderfolgenden Spitzen-  
tagen.

T = Summe der bewältigten Verkehrsmengen/Jahr und  
Richtung in Ladungstonnen

$$d = \alpha \cdot s \cdot \frac{h}{e} \left[ \frac{t}{\text{Tag}} \right]$$

h = Tägl. Betriebsdauer

e = Dauer einer Kreuzungsschleusung [h]

s = mittl. Schleusenbelegung (Tragfähigkeitstonnen)

$\alpha$  = Beladungskoeffizient (Auslastungsgrad der Schiffe)

h, e, s beziehen sich auf die ausgewählte Spitzenzeit.

Das Verfahren eignet sich ebenfalls zur Bestimmung einer praktischen Schleusenleistung in [t] pro Jahr und Richtung. Die Brauchbarkeit seiner Ergebnisse hängt in starkem Maß von der geeigneten Auswahl der Werte p ab.

#### 4.1.5

Aus allen diesen erwähnten Formeln läßt sich die theoretisch maximal mögliche Leistungsfähigkeit berechnen. Es sind zu diesem Zweck alle

leistungsmindernden Faktoren, die in die Rechnung eingehen (schwankender Verkehrsanfall, Teilauslastung der Schiffe, Wartezeiten der Schleuse auf ankommende Schiffe u.ä.) zu eliminieren.

Es ergibt sich dadurch nach allen Verfahren die gleiche Formel, in die nur die mittlere Kammerbelegung ( Fassungsvermögen der Anlage), die Zahl der Betriebsstunden pro Betrachtungszeitraum (Bezugszeit) und die Zeit für eine Kreuzungsschleusung (Bedienungszeit) eingeht. Im einzelnen sind folgende Vereinfachungen vorzunehmen:

In der Formel (1) nach [31]:

$$m = n = 1/2$$

In der Formel nach [7]:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 & S_k &= 0 \\ n &= 1 \end{aligned}$$

In der Formel nach [34]:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 \\ T &= p_m, \text{ wobei } T \text{ bzw. } p_m \text{ entgegen der Originalformel} \\ &\text{in Schiffen pro Tag bzw. Jahr auszudrücken} \\ &\text{wäre} \end{aligned}$$

Außerdem entsprechen sich folgende Bezeichnungen:

[31]	[7]	[34]
Q	$S_f$	$2 D^x$
b	J	h
$Z_m$	$b_f$	s
$S_k$	$\frac{k}{60}$	e

Nach den Formeln ergibt sich dann die mögliche Leistungsfähigkeit in

---

x) Der Faktor 2 ergibt sich, da in [34] die Leistungsfähigkeit pro Richtung angegeben wird.

den Bezeichnungen nach [31] zu:

$$Q = \frac{b}{S_k} \cdot Z_m \left[ \frac{\text{Schiffe}}{\text{Betrachtungszeitraum}} \right]$$

Nach dieser Formel soll im folgenden die mögliche Leistungsfähigkeit errechnet werden.

#### 4.2 Untersuchung der die Leistungsfähigkeit der Schleuse beeinflussenden Faktoren

Zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Schleusenanlagen ist eine genaue Kenntnis der Schleusungszeit und der möglichen Kammerbelegung erforderlich.

##### 4.2.1 Ermittlung der Schleusungszeiten

Bei den Schleusungszeiten muß nach Schleusungszeiten mit Schiff und nach Leerschleusungszeiten unterschieden werden, jeweils für beide Richtungen. Im einzelnen setzt sich die Schleusungszeit zusammen aus:

- Gesamteinfahrzeit der Schiffe
- Torschließungszeit
- Füll- bzw. Leerungszeit
- Toröffnungszeit
- Gesamtausfahrzeit der Schiffe

Schleusungszeitmessungen wurden in größerem Umfang durchgeführt und in [2] und [6] zusammengestellt. Dabei wurde die Messung zur Vereinfachung etwas abweichend von dem oben angeführten Schema durchgeführt. Der Beginn der Schleusungszeit wurde nach [2] als der Zeitpunkt definiert, zu dem das erste einfahrende Schiff durch einen von Schleuse zu Schleuse zu bestimmenden Querschnitt fahren kann (im folgenden auch "gedachter Querschnitt" genannt), wenn das letzte ausfahrende Schiff gerade die Torlinie passiert; das entspricht dann dem Ende der vorangegangenen Schleusungszeit. Die Gesamtschleusungszeit ändert sich durch diese Art der Messung nicht. In Abb. 34 ist die

angewandte Meßmethode im Längsschnitt und Zeit-Weg-Diagramm dargestellt. Die bei dieser Messungsart ermittelten Schleusungszeiten entsprechen<sup>x)</sup> den Schleusungszeiten, wie sie bei einer Meßanordnung gewonnen werden können, wie sie in Abb. 34 unten dargestellt ist. Die Schleusungszeiten beinhalten demnach Zeiten, die bei jeder Schleuse bauartbedingt sind (Torbewegungszeiten, Füll- bzw. Leerungszeiten), und Zeiten, die vom Verkehrsmittel (Schiff) abhängen (Ein- und Ausfahrzeiten).

Aus den Messungen ergaben sich für die einzelnen, die Schleusungszeiten beeinflussenden Parameter, verschiedene Abhängigkeiten, die nachfolgend erläutert werden.

#### 4.2.1.1 Zusammenhang zwischen Füll- bzw. Leerungszeit und Schleusenabmessungen

Zur Abschätzung der Füll- bzw. Leerungszeit von Schleusen wurde versucht, aus den Meßwerten an 34 Schleusenkammern, deren Länge zwischen 67 und 225 m, deren Breite zwischen 8,60 und 12,50 m und deren Hubhöhen zwischen 1,20 und 14,70 m lagen, einen korrelativen Zusammenhang zwischen Füll- bzw. Leerungszeit und Hubhöhe oder Kammervolumen zu erhalten.

Aus der Korrelationsgleichung ergaben sich dabei folgende Abhängigkeiten zwischen Hubhöhe ( $y_1$ ) und Füll- bzw. Leerungszeit ( $x$ ):

$$\text{Füllung: } y_1 = 0,203 + 0,717 x \quad \text{Bestimmtheitsmaß: } 0,635$$

$$\text{Leerung: } y_1 = 0,433 + 0,902 x \quad \text{Bestimmtheitsmaß: } 0,704$$

und zwischen Kammervolumen ( $y_2$ ) und Füll- bzw. Leerungszeit ( $x$ ):

$$\text{Füllung: } y_2 = - 6115 + 2012 x \quad \text{Bestimmtheitsmaß: } 0,706$$

$$\text{Leerung: } y_2 = - 7422 + 2471 x \quad \text{Bestimmtheitsmaß: } 0,750$$

Alle diese vier Bestimmtheitsmaße sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,1 % von Null verschieden.

---

x) gleiche Fahrcharakteristik der Schiffe und gleichbleibende Fahrgeschwindigkeit während der Einfahrt vorausgesetzt

Die Ergebnisse zeigen eine ausreichend gute Übereinstimmung für beide Fälle, wobei das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen Kammer-  
volumen und Füll- bzw. Leerungszeit höher liegt als für den Zusammen-  
hang zwischen Hubhöhe und Füll- bzw. Leerungszeit. Es ist jedenfalls  
möglich, auf diese Weise eine Schätzung für die Füll- bzw. Leerungszeit  
vorzunehmen und so auch Einflüsse wechselnder Hubhöhe z.B. durch Wasser-  
standsschwankungen auf die Schleusungszeit zu quantifizieren, ohne für  
jeden Fall Messungen durchzuführen. Bei extrem großen und extrem kleinen  
Hubhöhen bzw. Kammervolumen treten jedoch größere Abweichungen von den  
theoretisch ermittelten Funktionen auf. Solche Beispiele sind in den  
Abbildungen 35 und 36 besonders gekennzeichnet<sup>x)</sup>. Die Ursachen für diese  
Abweichungen dürften hydraulischer Art sein. Bei großen Hubhöhen ist die  
Druckhöhe so groß, daß ein schnelleres Füllen bzw. Leeren - vorausge-  
setzt, daß geeignete Füllsysteme vorhanden sind - möglich ist. Bei ge-  
ringen Hubhöhen reicht der Wasserdruck zu einem schnellen Füll- bzw.  
Leerungsvorgang oft nicht aus, vor allem wenn zusätzlich noch nur eine  
geringe Öffnungsgeschwindigkeit der Füll- bzw. Leerungsorgane vorhanden  
ist.

#### 4.2.1.2 Zusammenhang zwischen Einfahrzeit des Einzelschiffes und Größe des Schiffes

Aus Meßergebnissen wurde an 2 Schleusen (Schleuse 1, Kanal A und Schleuse 2,  
Kanal B) versucht, einen Zusammenhang zwischen der Einfahrzeit und der  
Schiffsgröße zu finden. Die Einfahrzeit beinhaltet die Zeit von der Durch-  
fahrt des Schiffsbugs durch den "gedachten Querschnitt" bis zur Durch-  
fahrt des Schiffsbugs durch die Torlinie (s. 4.2).

Wie aus den Abbildungen 37 und 38 ersichtlich, läßt sich jedoch ein  
solcher Zusammenhang nicht nachweisen. Die Korrelationsrechnung hat ein  
Bestimmtheitsmaß kleiner  $10^{-2}$  ergeben. Die Verteilung der Einfahrzeiten  
stellt sich dabei in etwa als Normalverteilung dar, während die Schiffs-

---

x) Zur Bestimmung der Regressionsgeraden wurden diese Werte mit heran-  
gezogen.

größen in erster Annäherung, unter Vernachlässigung von Abweichungen, gleichverteilt angenommen wurden. Nach den Ergebnissen hat der Beladungsgrad nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Einfahrzeit.

#### 4.2.1.3 Zusammenhang zwischen der Gesamteinfahrzeit der Schiffe in die Schleusenammer und der Kammerbelegung

Für die weitere Untersuchung der Schleusungszeit ist es von Interesse zu wissen, ob eine Abhängigkeit zwischen der Gesamteinfahrzeit der Schiffe in die Kammer und der Kammerbelegung besteht.

Die Gesamteinfahrzeit beinhaltet den Zeitraum von der Durchfahrt des ersten Schiffes einer Kammerbelegung durch den "gedachten Querschnitt" bis zum Zeitpunkt "Tor geschlossen". Die Kammerbelegung wurde einmal nach der Zahl der Schiffe in der Kammer und zum anderen nach der belegten Kammerfläche untersucht. Die Beziehungen der einzelnen Größen untereinander sind in den Abb. 39, 40, 41 und 42 für Berg- und Tal-fahrt dargestellt.

Bei der Beziehung zwischen Gesamteinfahrzeit und der Zahl der Schiffe in der Kammer zeigt sich speziell an dem Beispiel der Messungen am Kanal B (Abb. 39), daß die mittlere Einfahrzeit zwar stark ansteigt, für den Fall, daß statt einem, zwei oder drei Schiffe in die Kammer einfahren, daß der Mittelwert aber etwa konstant bleibt, wenn drei oder vier Schiffe in die Kammer einfahren. Das bedeutet, daß die Gesamteinfahrzeit bei wachsender Zahl der Schiffe in der Kammer einem Grenzwert zustrebt.

An dem Beispiel des Kanals A (Abb. 40) läßt sich eine ähnliche Tendenz erkennen, es ist jedoch zu berücksichtigen, daß beim Kanal A der Fall, daß fünf oder mehr Schiffe in die Kammer einfahren nur selten auftrat und insofern infolge des geringen Kollektivs keine gesicherten Schlüsse gezogen werden können.

Betrachtet man die Aufbereitung nach der flächenmäßigen Kammerbelegung (Abb. 41 und 42) so zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen belegter



Kammerfläche und Gesamteinfahrzeit. Es wurden für Berg- und Talfahrt am Kanal A Regressionsgeraden errechnet.

Die Gleichungen der Regressionsgeraden lauten:

Bergfahrt:

$$y = 0,042 + 0,0069 x$$

Bestimmtheitsmaß: 0,59; dieses Bestimmtheitsmaß ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,1 % von Null verschieden

Talfahrt:

$$y = - 2,428 + 0,0078 x$$

Bestimmtheitsmaß: 0,29; dieses Bestimmtheitsmaß ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,1 % von Null verschieden.

Die Bestimmtheitsmaße zeigen, daß speziell in der Bergfahrt eine gewisse Abhängigkeit zwischen Gesamteinfahrzeit und flächenmäßiger Kammerbelegung vorhanden ist.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß in die Rechnung alle Meßwerte mit einbezogen wurden, unabhängig von der Ausnutzung der Kammer.

Im weiteren wurden dann noch Regressionsgeraden für den Fall errechnet, daß nur Meßwerte betrachtet werden, bei denen die Ausnutzung der Kammer mindestens 75 % der ausnutzbaren Kammerfläche (s. 4.2.2) betrug.

Die Gleichungen der Regressionsgeraden lauten dann:

Bergfahrt:

$$y = - 6,136 + 0,0105 x$$

Bestimmtheitsmaß: 0,31; dieses Bestimmtheitsmaß ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 1 % von Null verschieden

Talfahrt:

$$y = - 3,599 + 0,0084 x$$

Bestimmtheitsmaß: 0,15; dieses Bestimmtheitsmaß ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 5 % von Null verschieden.

Es zeigt sich somit, daß, falls nur Gesamteinfahrzeiten im Bereich hoher Kammerauslastungen betrachtet werden, die Abhängigkeit zwischen Gesamteinfahrzeit und Kammerbelegung sehr schwach ist. Das bedeutet, daß bei wachsenden Kammerbelegungen über eine Auslastung von 75 % sich das Anwachsen der Gesamteinfahrzeit nicht mehr mathematisch gesichert nachweisen läßt.

#### 4.2.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach den dargestellten Ergebnissen erscheint es vertretbar, im Rahmen dieser Arbeit in erster Annäherung die Schleusungszeit als unabhängig von der Schiffsgrößenzusammensetzung und damit der Zahl der Schiffe pro Kammer als konstant anzunehmen. Sollten weitergehende Untersuchungen doch eine gesicherte Abhängigkeit zwischen Gesamteinfahrzeit und Zahl der Schiffe pro Kammer ergeben, so wäre das in späteren Berechnungen mit zu berücksichtigen. Es wäre in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Kammerbelegungen zu errechnen und den entsprechenden Gesamteinfahrzeiten zuzuordnen. Auf diese Weise ließe sich eine Häufigkeitsverteilung der auftretenden Gesamteinfahrzeiten ermitteln, woraus sich die Verteilung der Schleusungszeiten ergibt.

#### 4.2.2 Ermittlung der ausnutzbaren Kammerfläche

Für die mögliche Leistungsfähigkeit einer Schleusenkammer ist deren ausnutzbare Kammerfläche eine weitere maßgebende Größe. Unter ausnutzbarer Kammerfläche sei die Fläche verstanden, die bei einem Schleusungsvorgang von Schiffen belegt werden kann.

##### 4.2.2.1 Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Schiffsgrundfläche

Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit der Schiffe und der Schiffsgrundfläche besteht.

Betrachtet man vereinfachend die Schiffsgrundfläche als Rechteck aus größter Länge  $x$  größter Breite, so ergibt sich eine Beziehung zwischen der Grundfläche und der Tragfähigkeit. Unter Zugrundelegung der zahlreichen bei Messungen gewonnenen Werte wurde mit Hilfe der Korrelationsrechnung die Hypothese des Zusammenhangs zwischen Grundfläche und Tragfähigkeit überprüft. Dabei ergab sich folgende Funktion:

$$y = 1,57 x - 46,96$$

bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,95; dieses Bestimmtheitsmaß ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 0,1 % von Null verschieden.

Der Zusammenhang kann somit als statistisch gesichert angesehen werden.

Für die weitere Rechnung wurde diese Funktion ersetzt durch die Funktion

$$y = 1,54 x$$

Die neue Funktion geht ebenfalls durch den Schwerpunkt des Punkthaufens. Als zusätzliche Zwangsbedingung wurde eingeführt, daß die Funktion durch den Koordinatenursprung geht, was eine vereinfachte Rechnung erlaubt.

Beide Funktionen weichen nur geringfügig voneinander ab (Abb. 43).

Schubeinheiten wurden in die Betrachtungen nicht mit einbezogen, da der Verkehr mit Schubeinheiten auf den deutschen kanalisierten Wasserstraßen bisher vernachlässigbar gering ist.

#### 4.2.2.2 Schiffsgrößenverteilungen an verschiedenen Schleusen

Aus umfangreichem statistischem Material [35] über den Verkehr auf den Kanälen A und B wurde die Verteilung der Schiffsgrößen zwischen 50 t und 1350 t als Häufigkeits- und Summenverteilung dargestellt. Es ergab sich dabei, daß die Schiffsgrößenverteilung in etwa einer symmetrischen Verteilung entspricht, die in erster Näherung als Gleichverteilung angesehen wurde; somit läßt sich die Summenverteilung in Form der Geraden

$$y = 0,077 x - 3,85$$

darstellen.  $y$  bedeutet hierbei den %-Anteil der Schiffe kleiner als eine bestimmte Tonnage und  $x$  die Schiffsgröße.

Es wird dabei angenommen, daß alle Schiffe eine Größe zwischen 50 t und 1350 t haben. Das entspricht auch ungefähr den tatsächlichen Verhältnissen, da das größte allgemein zugelassene Schiff von 80 m Länge und 9,50 m Breite nur in Ausnahmefällen mehr als 1350 t Tragfähigkeit besitzt und Schiffe mit einer Tragfähigkeit von weniger als 50 t praktisch nicht vorkommen (Abb. 44 und 45). Die Auftragung der Verteilung der Schiffsgrößen auf Kanal C zeigte ein von den anderen Ergebnissen abweichendes Bild, da dort die kleinen Fahrzeuge wesentlich häufiger sind und die Schiffe über 1000 t Tragfähigkeit wegen der Abladetiefebeschränkung nur begrenzt eingesetzt werden (Abb. 44 und 46).

#### 4.2.2.3 Bestimmung der ausnutzbaren Kammerfläche

Eine Schleusenammer kann immer nur bis zu einem bestimmten Prozentsatz ihrer Kammerfläche durch Schiffe ausgenutzt werden. Als maximal ausnutzbare Kammerfläche wird die größte Fläche bezeichnet, die bei den Messungen bei ausreichendem Zufluß bei einer Schleusung belegt war. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß im Vorhafen noch solche Schiffe im Rang warten, die aus Raumgründen nicht mehr in die Schleuse einfahren konnten, während kleineren Schiffen die Möglichkeit gegeben war, in die Kammer einzufahren, obwohl sie im Rang hinter den größeren lagen. Als Beispiel wurden die ausnutzbaren Kammerflächen für zwei Schleusentypen ermittelt. Am Kanal A mit Schleusen von  $225 \times 12 \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$  ( $F_k$ ) wurde die maximal ausnutzbare Kammerfläche ( $F_{pr}$ ) aus 54 Meßwerten zu  $2140 \text{ m}^2$  ermittelt, am Kanal B mit Schleusen von  $165 \times 10 \text{ m} = 1650 \text{ m}^2$  aus 75 Meßwerten zu  $1520 \text{ m}^2$ , das entspricht zwei Motorgüterschiffen vom Typ "Johann Welker".

Das Verhältnis von belegbarer Kammerfläche ( $F_{pr}$ ) zur gesamten Kammerfläche ( $F_k$ ) ergibt sich demnach am Kanal A zu

$$\frac{F_{pr}}{F_k} = \frac{2140}{2700} = 0,8$$

und am Kanal B zu

$$\frac{F_{pr}}{F_k} = \frac{1520}{1650} = 0,92$$

#### 4.3 Untersuchungen über den Zufluß des Verkehrs an Schleusen

Die Ankunftsverteilung der Schiffe an einer Schleuse wurde unter 2.1 untersucht. Für die weiteren Betrachtungen ist es jedoch erforderlich, Schwankungen des Erwartungswertes der an der Schleuse ankommenden Verkehrsmengen über einen längeren Zeitraum zu kennen und in ihrem Einfluß auf die Leistungsfähigkeit zu beurteilen.

##### 4.3.1 Ganglinien der Ankünfte der Schiffe an einer Schleuse über einen längeren Zeitraum

Voraussetzung dafür, daß bei höheren Auslastungen keine Wartepausen der Schleusen auftreten, ist, daß der Zufluß stationär ist und keine systematische Schwankung auftritt.

Eine solche systematische Schwankung des Erwartungswertes der ankommenden Verkehrsmenge wäre gegeben, wenn z.B. in den frühen Morgenstunden immer sehr wenige Schiffe ankommen würden oder die Verkehrsmenge an einem bestimmten Wochentag jeweils besonders groß wäre.

Als Beispiel für die Ankunftsverteilung der Schiffe an einer Schleuse wurden Auszüge aus den Unterlagen der Eingangshebestelle am Kanal A angefertigt.

Untersucht wurden die Abhängigkeit der Schiffsankünfte von der Tageszeit und vom Wochentag und Häufigkeitsverteilungen über die täglichen Schiffsankünfte. Die Abhängigkeit von der Tageszeit wurde für einen

Monat im Winter (Januar 1966) und einen Monat im Sommer (Juni 1966) dargestellt. Dabei ergab sich, daß die Ankünfte pro Stunde im Sommer um 19 % um den Mittelwert schwanken, während im Winter die Ankünfte in den Stunden von 8<sup>00</sup> bis 16<sup>00</sup> bis zu 57 % über dem Mittelwert liegen, in den Stunden von 6<sup>00</sup> bis 8<sup>00</sup> und von 17<sup>00</sup> bis 20<sup>00</sup> aber erheblich darunter. Die Ursache dafür dürfte darin zu suchen sein, daß die Schifffahrt auf einem freien Strom ohne Radar oder ähnliche Einrichtungen nur bis 1/2 Stunde nach Sonnenuntergang bzw. erst 1/2 Stunde vor Sonnenaufgang erlaubt ist und noch sehr wenig Schiffe, die von einem freien Strom in das Kanalgebiet fahren, mit diesen Hilfsmitteln ausgestattet sind (Abb. 47).

Eine gewisse Unsicherheit bei der Auswertung ergibt sich speziell für den Sommer dadurch, daß die Hebestelle im Untersuchungszeitraum nur von 6<sup>00</sup> bis 20<sup>00</sup> besetzt war, d.h. um zwei Stunden kürzer als die normale Schleusenbetriebszeit (5<sup>00</sup> bis 21<sup>00</sup>) und somit über die ankommenden Verkehrsmengen für die Zeit von 20<sup>00</sup> bis 6<sup>00</sup> keine näheren Angaben gemacht werden können. Außerdem werden erfahrungsgemäß nach 19<sup>00</sup> ankommende Schiffe meist erst am kommenden Morgen an der Hebestelle gemeldet. Alle am Morgen vorliegenden Meldungen werden in der Statistik mit der Zeit 6<sup>00</sup> belegt und wurden in Abb. 47 mit der Angabe 20<sup>00</sup> bis 6<sup>00</sup> dargestellt. Um den tatsächlichen Verhältnissen gerecht zu werden, müßten diese Ankünfte auf die Zeit von 19<sup>00</sup> bis 21<sup>00</sup> und 5<sup>00</sup> bis 6<sup>00</sup> verteilt werden.

Die Ankunftsverteilung bezogen auf den Wochentag ergibt im wesentlichen eine Gleichverteilung mit Schwankungen bis zu 15 % um den jeweiligen Mittelwert, unabhängig von der Jahreszeit (Abb. 48).

Weiterhin wurde eine Verteilung der Häufigkeiten der Schiffsankünfte pro Tag für 190 Tage aufgestellt. Bei einem Mittelwert von 56,6 kamen pro Tag zwischen 25 und 80 Schiffe in der Talfahrt und bei einem Mittelwert von 59,6 zwischen 25 und 90 Schiffe in der Bergfahrt an. In der Bergfahrt kamen jedoch an 74 % aller Tage, in der Talfahrt an 69 % aller Tage zwischen 50 und 70 Schiffe an. Die Auswertung wurde für die Monate September, Oktober, Dezember 1964, Februar, Mai, Juni, September und Oktober 1965 durchgeführt. Es handelt sich dabei also

um Winter- wie Sommermonate, in denen unter Umständen Tage mit extrem schwachem Verkehr durch Eisgang oder Nebel enthalten sein können. Die hohen Belastungen ergeben sich dann gewöhnlich nach Schifffahrtssperren, wenn viele Schiffe zum Beispiel wegen Hochwassers eines Flusses Schutzhäfen aufsuchen mußten und nach Freigabe der Schifffahrt dann plötzlich alle gleichzeitig die Fahrt wieder aufnehmen (Abb. 49).

#### 4.3.2 Leistungsfähigkeit von Schleusen in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit des Berg- und Talverkehrs

Die Leistungsfähigkeit einer Schleuse wird nach früheren Untersuchungen [33] in starkem Maß davon beeinflußt, ob im wesentlichen Kreuzungsschleusungen durchgeführt werden, oder ob der Verkehr aus den beiden Richtungen sehr ungleichförmig ist und deshalb in größerem Umfang Richtungsschleusungen vorkommen.

Aus den Messungen an Schleusen in [2] und aus Auswertungen von Schleusenbüchern der Schleusen 6 am Kanal A, 1 am Kanal C, 3, 4 und 6 am Kanal B konnte ermittelt werden, daß von einem Auslastungsgrad größer als 0,6 an praktisch die Zahl der Leerschleusungen und damit der Richtungsschleusungen gegen Null geht. Dies trifft dann zu, wenn das Verhältnis von Berg-/Talverkehr sich zwischen 0,7 und 1,3 bewegt. Diese Tendenz wird auch durch das Simulationsergebnis für die Einkammerschleuse mit mehreren Schiffen/Kammer bestätigt (s. 4.4.2). Ist die Auslastung geringer als 0,6, so treten naturgemäß Leerschleusungen auf, und zwar auch bei gleichförmigem Verkehr aus beiden Richtungen, da zuweilen aus der einen und dann wieder aus der anderen Richtung Schiffe ankommen. Da jedoch die Fälle, in denen die Auslastung kleiner als 0,6 ist, für die Ermittlung von Leistungsverlusten vernachlässigt werden können, werden im folgenden nur noch die Fälle mit Auslastungen größer als 0,6 untersucht.

Die Gründe für die Abnahme der Leerschleusungen sind darin zu suchen, daß bei hohen Auslastungsgraden vor den Schleusen mindestens immer ein Schiff zur Schleusung wartet. Das bedeutet, daß dann Schleusungen mit geringer Kammerbelegung durchgeführt werden, die aber, wie unter 4.2.1.3 gezeigt wurde, nur wenig kürzer dauern als Schleusungen mit

vollbelegter Kammer. Für verschiedene Schleusen wurde aus den Schleusenbüchern die Zahl der durchgeführten Schleusungen mit Schiff ermittelt und graphisch als Prozentsatz der möglichen Kreuzungsschleusungen in Abhängigkeit von der Auslastung aufgetragen. Dem gegenübergestellt wurde die Zahl der theoretisch notwendigen Schleusungen mit Schiff ebenfalls in Prozent der möglichen Schleusungen (Abb. 50, 51 und 52). Die Zahl der möglichen Kreuzungsschleusungen ergibt sich durch Division der täglichen Betriebszeit durch die Zeit für eine Kreuzungsschleusung. Die Zahl der theoretisch notwendigen Schleusungen ergibt sich aus der Zahl der geschleusten Schiffe dividiert durch die maximale Kammerbelegung. In Abb. 50 ist ein Beispiel eingetragen: Bei einer Auslastung von 50 % hätte die ankommende Verkehrsmenge in 56 % der Schleusenbetriebszeit geschleust werden können, tatsächlich hat jedoch die Schleuse 75 % der Betriebszeit geschleust. Durch die Umrechnung in Prozent ergibt sich eine Vergleichsmöglichkeit von Schleusen verschiedenster Größe und Hubhöhe. Es zeigt sich dabei, daß diese Verhältnisse unabhängig von der Kammergröße sind, und daß die Unterschiede zwischen tatsächlicher Zahl von Schleusungen und dem theoretisch ermittelten Wert bezogen auf die Auslastung immer etwa gleich sind. Bezieht man die Zahl der Leerschleusungen in die Berechnung mit ein, so muß das Verhältnis von Kreuzungsschleusungszeit zu Richtungsschleusungszeit mit berücksichtigt werden, ebenso wie der Prozentsatz der Leerschleusungen. Auf diese Aufteilung wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Um einen Überblick über die leistungsmindernden Einflüsse von Richtungsschleusungen zu bekommen, wurden zwei Diagramme erstellt, aus denen der Einfluss der verschiedenen Parameter zu entnehmen ist. Als Grenzwerte für das Verhältnis  $s_K/s_R$  können die Werte 1/1 und 2/1 angenommen werden. Beim Verhältnis 1/1 würde eine Leerschleusung ebenso lange dauern wie eine Schleusung mit Schiff und die Leistung würde linear mit wachsendem Prozentsatz der Richtungsschleusungen bis auf die Hälfte bei 100 % Richtungsschleusungen absinken. Das Verhältnis 2/1 würde besagen, daß für die Leerschleusung die Zeit gleich 0 ist und die Leistung unabhängig von der Zahl der Richtungsschleusungen ist. Beide Grenzfälle sind unrealistisch; es läßt sich jedoch die Tendenz klar aufzeigen, daß der Einfluss der Richtungsschleusungen auf die Leistung umso geringer ist,



Je größer das Verhältnis  $s_K/s_R$  ist. Aus den Messungen hat sich ein Verhältnis ergeben, das im allgemeinen zwischen 1,4 und 1,6 schwankt.

Ablesebeispiel 1 (Abb. 53):  $s_K$  zu  $s_R$  sei 1,6, der Prozentsatz der Richtungsschleusungen gleich 25 %. Die Leistungsminderung beträgt somit 5 %.

Ablesebeispiel 2 (Abb. 54): Läßt man eine Leistungsminderung um maximal 10 % zu, so dürfen bei einem Verhältnis von  $s_K$  zu  $s_R = 1,4/1$  höchstens 33 % Richtungsschleusungen durchgeführt werden.

#### 4.4 Leistungsfähigkeit von Schleusen als Warteschlangenproblem

In den bisherigen Betrachtungen wurde die Leistungsfähigkeit von Schleusenanlagen lediglich aufgrund der bauartbedingten Schleusungszeiten und verkehrlichen Gegebenheiten beurteilt. Es blieb dabei unberücksichtigt, wie große Wartezeitverluste vor den Schleusen der Schifffahrt in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung entstehen. Im folgenden soll der Verkehrsablauf an Schleusen als Warteschlangenproblem behandelt werden.

In [36] wurde für den einfachen Fall, daß nur in einer Richtung Schiffe ankommen mit Hilfe der Formeln nach [37] eine mathematische geschlossene Lösung angegeben. Ein Vergleich mit den in [36] veröffentlichten Simulationsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung. Für andere Fälle eine mathematisch geschlossene Lösung anzugeben, stieß auf Schwierigkeiten.

Um Kriterien für die Abhängigkeit der Wartezeit von der Auslastung der Schleuse und damit implizit auch von der Schleusungszeit zu bekommen, wurden deshalb 5 Simulationsmodelle für den Betriebsablauf an Schleusen entwickelt.

Für die Untersuchung der Wartezeiten müssen von ihrer Betriebsart her 3 Arten von Schleusen unterschieden werden.

1. Einzelschleusen:

Einzelne Schleusengruppen innerhalb eines längeren Kanals, bei der im Ober- wie im Unterwasser die Schiffe zufallsverteilt ankommen.

Beispiel: Schleusengruppe 2, Kanal C

Der Verkehr kommt hier im Oberwasser aus 4 verschiedenen Kanälen, die nächste Schleuse ist ca. 50 km entfernt; im Unterwasser kommt der Verkehr aus zwei Kanälen, die nächste Schleuse ist ca. 36 km entfernt. (Über Pulkauflösung s. 2.1.3)

2. Eingangsschleusen:

Eingangsschleuse eines Kanals, bei der im Ober- oder Unterwasser die Schiffe zufallsverteilt ankommen, während in der Gegenrichtung die Ankunft der Schiffe durch den Takt der nächsten, meist nahegelegenen Schleuse bestimmt wird.

Beispiel: Schleuse 1, Kanal A

Im Unterwasser herrscht zufallsverteilte Ankunft von einem freien Strom, im Oberwasser ist die Ankunft durch den Takt der Schleuse 2 beeinflusst.

3. Zwischenschleusen:

Schleuse innerhalb eines Kanals, deren Zufluß durch den Takt der ober- und unterhalb liegenden Schleusen bestimmt wird.

Beispiel: Schleuse 2, Kanal A

Der Zufluß wird hier durch den Takt der Schleusen 1 und 3 bestimmt. Der Zufluß kann nur dadurch verändert werden, daß aus Häfen innerhalb der angrenzenden Haltungen Schiffe zufahren bzw. zu diesen Häfen abfahren.

Für die Wartezeitermittlung durch Simulation in der nachfolgend beschriebenen Art eignen sich die Einzelschleusen. Für die Eingangsschleusen können ebenfalls Simulationsprogramme erstellt werden, es muß jedoch dann von anderen charakteristischen Zuflußarten, z.B. dem Pulk-Zufluß, ausgegangen werden. Die Zwischenschleusen werden in dem Kapitel über Koordinierung (5.3) untersucht.

#### 4.4.1 Beschreibung der Modelle für die Simulation des Betriebsablaufes an Schleusen

Bei der Modellbeschreibung wird zunächst davon ausgegangen, daß die Schleusen an Wasserstraßen liegen, bei denen die Ankunftszeiten der Schiffe im Ober- und Unterwasser zufallsverteilt sind, auf den Wasserstraßen also freier Verkehr herrscht. Das Modell für die Einkammerschleuse und jeweils ein Schiff pro Kammer ist in [36] beschrieben. Die 5 Hauptpunkte seien im folgenden wiederholt:

1. Es existiert eine Schleusenkammer, in die jeweils nur ein Schiff einfahren kann.
2. Die Schleusungszeit für Leerschleusungen ist konstant gleich  $s_0$ , für Schleusungen mit Schiff konstant gleich  $s$ .
3. Das Eintreffen der Schiffe an der Schleuse ist ein Poisson-Prozess (Zufallsprozess) mit konstantem Parameter  $\lambda$  (Erwartungswert der eintreffenden Schiffe).
4. Die Schleusung erfolgt nach folgender Strategie: Jedes eintreffende Schiff wird nach der Reihenfolge des Eintreffens möglichst sofort geschleust. Jedoch gilt folgende Ausnahme: ist im Oberwasser ein Schiff oder sind mehrere Schiffe zu schleusen, im Unterwasser aber keines und ist die Schleuse unten, so wird auf die Ankunft eines Schiffes im Unterwasser gewartet, wenn es innerhalb einer Zeit  $h$  in die Schleuse einfahren kann.
5. Es wird die stationäre Lösung der Warteschlangentheorie betrachtet; d.h. die Parameter  $(\lambda, s_0, s, h)$  müssen im Beobachtungszeitraum konstant bleiben, der mittlere Zufluß muß stets kleiner sein als die maximale Leistung der Schleuse  $(\frac{1}{2s})$ , und der Betrachtungszeitraum muß hinreichend lang sein, so daß alle (mit Wahrscheinlichkeit) möglichen Zustände des Systems sich auch einspielen können.

Bei dem Modell für die Zweikammerschleuse und einem Schiff pro Kammer nach [38] wird von den gleichen Grundlagen ausgegangen, ebenso ändert sich die Strategie nicht. Die Auslastung der Anlage ergibt sich zu

$$A = \frac{\lambda}{\frac{1}{s}} = \lambda \cdot s$$

Auf der Basis dieser in [36] und [38] veröffentlichten Modelle wurden weitere möglichst wirklichkeitsnahe Modelle entwickelt. Zunächst wurde von einer Einkammerschleuse ausgegangen, deren Kammer mehrere Schiffe aufnehmen kann. Die Schiffsgrößen sind dabei wie unter 4.2.2.2 beschrieben verteilt. Als zusätzlicher Parameter geht hier die praktisch belegbare Kammerfläche  $F_{pr}$  ein. Infolge des straff korrelativen Zusammenhanges zwischen Schiffsfläche und Schiffstragfähigkeit kann auch ebenso von der belegbaren Kammerfläche entsprechenden Tonnage ausgegangen werden, die sich nach 4.2.2.1 zum 1,54-fachen der Fläche ergibt. Diese Tonnage wird im folgenden kurz ausnutzbare Kammertonnage genannt. Das Modell wurde für zwei Fälle durchgerechnet: die ausnutzbare Kammertonnage wurde in Anlehnung an tatsächlich vorkommende Verhältnisse mit 2600 t (165 x 10 m Schleuse) und 3250 t (225 x 12 m Schleuse) angenommen (s. 4.2.2.3). Hierbei wurde der Wert für die Schleuse am Kanal B nicht durch Multiplikation der belegbaren Kammerfläche mit dem Faktor 1,54 ( $1,54 \cdot 1520 = 2350$ ) sondern aus Beobachtungen der geschleusten Tonnage gewonnen. Die Differenz zwischen den beiden Werten erklärt sich dadurch, daß trotz des straff korrelativen Zusammenhangs zwischen Fläche und Tragfähigkeit, naturgemäß doch Abweichungen von der Regressionsgeraden auftreten.

Zusätzlich zu der in [36] erläuterten Zeit  $h$ , die die Schleuse wartet, wenn innerhalb dieser Zeit ein Schiff ankommt, wurde noch die Zeit  $h_1$  eingeführt, die die Schleuse wartet, wenn bereits ein Schiff eingefahren ist und innerhalb  $h_1$  noch ein Schiff ankommt. Die Auslastung einer Schleuse ergibt sich bei diesem Modell zu

$$A = 2 \lambda s \cdot \frac{\frac{F}{s}}{F_{pr}}$$

wobei  $\frac{F}{s}$  die mittlere Schiffsfläche bedeutet.

Bei dem vierten Modell wurde der Einfluß auf die Wartezeiten untersucht, der sich ergibt, wenn eine betrachtete Schleuse ohne Berücksichtigung des Verkehrsanfalls in konstanten Zeitabständen schleust. Die konstanten Zeitabstände ergeben sich dann aus der Schleusungszeit mit Schiff. Die Größen  $h$ ,  $h_1$ ,  $s_0$  treten nicht mehr auf. Das Modell der Schleusung in

konstantem Takt wurde noch erweitert auf die Zweikammerschleuse, um die Zeitgewinne beim Bau zweiter Kammern auch hier beurteilen zu können. Die Strategie sieht dabei vor, daß, wenn eine Kammer zu Berg, die andere Kammer zu Tal schleust oder umgekehrt. Das ergibt auch die Möglichkeit, bei Wassermangel im Verbundbetrieb zu arbeiten, wodurch die Hälfte der Kammerwassermenge gespart werden kann. Es muß dann nur aus hydraulischen Gründen eine Verlängerung der Füll- und Leerungszeiten und damit der Schleusungszeiten in Kauf genommen werden.

Bei allen Modellen, bei denen die Kammergröße so gewählt wurde, daß jeweils mehr als ein Schiff in die Kammer einfahren kann, wurde die Strategie beibehalten, daß die Schiffe in der Reihenfolge ihrer Ankunft geschleust werden. Insbesondere wurde bei noch freien Restflächen in der Kammer nur abgefragt, ob das nächste Schiff noch in die Kammer passt, nicht aber, ob, falls das nächste Schiff zu groß ist, noch ein kleineres Schiff im Rang liegt, das die Restfläche ausfüllen könnte. Dadurch werden die errechneten mittleren Wartezeiten etwas größer, als es den tatsächlichen Verhältnissen entspricht.

Die Strukturdiagramme für die einzelnen erwähnten Modelle sind in den Abb. 55 bis 59 dargestellt, die darin verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 60 zusammengestellt.

#### 4.4.2 Ergebnisse der Simulation

Die Ergebnisse der Simulation des Betriebsablaufs an Schleusen wurden in Abb. 61 bis 67 graphisch dargestellt.

In den Darstellungen wurden folgende Bezeichnungen verwendet:

$\bar{w}$  = Mittlere Wartezeit

$\lambda_B$  = Zuflußparameter zu Berg

$\lambda_T$  = Zuflußparameter zu Tal

$h$  = Wartezeit der Schleuse auf ein ankommendes Schiff

$s_o$  = Leerschleusungszeit

$s = s_B = s_T =$  Schleusungszeit mit Schiff

$T_{\bar{S}}$  = Mittlere Schiffstonnage

$T_{pr}$  = Ausnutzbare Kammertonnage

$F_{\bar{S}}$  = Mittlere Schiffsfläche

$F_{pr}$  = Ausnutzbare Kammerfläche

Auf der Ordinate der Darstellungen sind jeweils die mittleren Wartezeiten bezogen auf die doppelte Schleusungszeit mit Schiff (Kreuzungsschleusungszeit) aufgetragen. Auf der Abszisse ist der Auslastungsgrad der Anlage aufgetragen.

Zur Berechnung der mittleren effektiven Wartezeit muß dann jeweils der abgelesene Wert mit der Zeit für eine Kreuzungsschleusung multipliziert werden.

Die Ergebnisse zeigen für alle Simulationsmodelle einheitlich ein relativ schwaches Anwachsen der mittleren Wartezeiten bis zu einer bestimmten Auslastung, die je nach Schleusenart bei 0,6 bis 0,7 liegt, und von da an eine starke Zunahme der mittleren Wartezeit.

Wartezeitverkürzungen lassen sich speziell durch Verkürzung der Schleusungszeiten  $s$  erreichen, da dadurch der Wert  $\bar{w}$  kleiner wird und sich gleichzeitig die Auslastung reduziert. Verkürzt man die Leerschleusungszeit  $s_0$ , so wird das Verhältnis von  $s_0/s$  kleiner, und es läßt sich aus den Darstellungen ersehen, daß die Wartezeit bei gleicher Auslastung geringer wird.

Den Einfluß der Zeit  $h$  auf die mittlere Wartezeit zeigt Abb. 62. Es ergibt sich, daß die mittlere Wartezeit am kürzesten wird, wenn  $h = s_0$  gesetzt wird.

Bei den Modellen von Schleusen mit mehreren Schiffen pro Kammer ist der Einfluß der Leerschleusungszeit nur bis zu einem gewissen Auslastungsgrad relevant, da ab diesem praktisch keine Leerschleusungen mehr durchgeführt werden (s. Abb. 68). Das bedeutet, daß auch schon

bei geringer Auslastung eine größere Anzahl Schleusungen mit geringer Kammerbelegung durchgeführt wird und die Kammerbelegung erst mit wachsender Auslastung ihren Maximalwert erreicht. Es zeigt sich somit auch eine gute Übereinstimmung mit den unter 4.3.2 empirisch gewonnenen Werten.

In Abbildung 69 sind die mittleren Wartezeiten bei einer Schleusungszeit von  $s = 0,5$  h für folgende 4 Modelle aufgetragen:

1. Einkammerschleuse, ein Schiff/Kammer
2. Zweikammerschleuse, ein Schiff/Kammer
3. Einkammerschleuse, mehrere Schiffe/Kammer
4. Zweikammerschleuse, mehrere Schiffe/Kammer

Daraus lassen sich die Wartezeitreduzierungen infolge des Baues zweier Schleusenkammern ablesen.

1. Für den Fall der Modelle 1 und 2 beträgt die Wartezeitreduzierung bei einem Zufluß von  $\lambda = 0,6$  Schiffen pro Stunde ca. 78 %. Die Auslastung ergibt sich dann für die Einkammerschleuse zu  $2 \lambda s = 2 \cdot 0,6 \cdot 0,5 = 0,6$  und für die Zweikammerschleuse zu  $\lambda s = 0,6 \cdot 0,5 = 0,3$ .
2. Für den Fall der Modelle 3 und 4, bei denen allerdings nur der Sonderfall: "Schleusung in konstantem Takt" dargestellt wurde, beträgt die Reduzierung bei  $\lambda = 3,0$  ca. 74 %. Die Auslastung beträgt für die Einkammerschleuse ( $T_{pr} = 3250$  t)

$$2 \lambda \cdot s \cdot \frac{T}{T_{pr}} = 2 \cdot 3,0 \cdot 0,5 \cdot \frac{700}{3250} = 0,65$$

und für die Zweikammerschleuse ( $T_{pr} = 3250$  t)

$$2 \lambda \cdot s \cdot \frac{T}{T_{pr}} = 3,0 \cdot 0,5 \cdot \frac{700}{3250} = 0,32$$

Vergleiche der Wartezeiten können entsprechend der Strategie der Simulation (s. 4.4.1) nur in dem Bereich angestellt werden, bei dem der Zufluß kleiner oder gleich ist als die Leistungsfähigkeit der leistungsschwächeren Schleuse, d.h. bei dem Modell der Einkammerschleuse mit

einem Schiff pro Kammer muß

$$\lambda \leq \frac{1}{2s}$$

sein und bei dem Modell mit mehreren Schiffen pro Kammer muß

$$\lambda \leq \frac{T_{pr}}{T_{pr} + 2s} = \frac{3250}{700 \cdot 2s} = \frac{4,65}{2s} \text{ Schiffe/h}$$

sein.

#### 4.4.3 Vergleich der simulierten Wartezeiten vor Schleusen verschiedener Kammergröße und verschiedener Schleusungszeit

Es kann unter Umständen von Interesse sein, ob es vom Standpunkt der kürzest möglichen Wartezeit günstiger ist, schnelle kleine Schleusen oder naturgemäß langsamere große Schleusen zu bauen.

Als Beispiel zur Bewertung dieser Frage wurden aus den Simulationsergebnissen das Modell der Einkammerschleuse mit einem Schiff pro Kammer und das Modell der Einkammerschleuse mit mehreren Schiffen pro Kammer ( $T_{pr} = 3250 \text{ t}$ ) verglichen. Bei dem ersten Modell wird in diesem Fall vorausgesetzt, daß die Kammer so bemessen sei, daß jedes auf der betrachteten Wasserstraße verkehrende Schiff einfahren kann, aber auch kleine Schiffe einzeln geschleust werden. In Abb. 70 wurden die Kurven der mittleren Wartezeiten für die beiden Modelle für folgende Werte von  $s$  aufgetragen:

Einkammerschleuse	
1 Schiff/Kammer	mehrere Schiffe/Kammer
<u>s [h]</u>	<u>s [h]</u>
0,5	1,0
0,25	0,5
0,167	
0,125	



Die Darstellung zeigt, daß die Schleuse mit einem Schiff pro Kammer in allen Fällen dann gleiche oder geringere mittlere Wartezeiten erbringt, wenn die Schleusungszeit  $1/4$  der Schleusungszeit der Schleuse mit mehreren Schiffen pro Kammer beträgt. Im Bereich geringerer Auslastung können jedoch schon mit kleinen Schleusen, wenn die Schleusungszeit  $1/3$  der Schleusungszeit der großen Schleusen beträgt, Wartezeitgewinne erzielt werden.

In Abb. 70 sind zwei Beispiele eingetragen:

1. Der Zufluß betrage  $\lambda = 3$  Schiffe pro Stunde.

Die Wartezeiten betragen für die Einkammerschleuse:

mit 1 Schiff/Kammer:  $s = 0,125$  [h]  $\bar{w} = 0,46$  [h]

mit mehreren Schiffen/

Kammer:  $s = 0,5$  [h]  $\bar{w} = 0,82$  [h]

2. Der Zufluß betrage  $\lambda = 1,5$  Schiffe pro Stunde.

Die Wartezeiten betragen für die Einkammerschleuse:

mit 1 Schiff/Kammer:  $s = 0,25$  [h]  $\bar{w} = 0,90$  [h]

$s = 0,167$  [h]  $\bar{w} = 0,29$  [h]

$s = 0,125$  [h]  $\bar{w} = 0,15$  [h]

mit mehreren Schiffen/

Kammer:  $s = 1,0$  [h]  $\bar{w} = 1,58$  [h]

$s = 0,5$  [h]  $\bar{w} = 0,54$  [h]

#### 4.4.4 Wartezeitmessungen an Schleusen

Im Rahmen der Untersuchungen zu [39] wurden an der Schleuse 1, Kanal A Wartezeitmessungen durchgeführt. Die Messung erfolgte durch Zeitaufschrieb mit Namen der Schiffe bei Einfahrt in den Vorhafen und bei Einfahrt in die Schleusenkammer. Durch Differenzbildung aus diesen beiden Werten konnte die Wartezeit ermittelt werden. Diese Wartezeit ist somit als die Zeitdifferenz zwischen der Durchfahrt durch diese

beiden Querschnitte definiert. Sie beinhaltet dementsprechend auch die notwendige Fahrzeit zwischen diesen beiden Querschnitten (Abb. 71). Die Darstellung ist rein schematisch und sagt nichts über die Vorhafenge-  
staltung aus.

Da für die Strecke von ca. 900 m bei einer Fahrgeschwindigkeit von z.B. 6 km/h eine Fahrzeit von ca. 9 min benötigt würde, wäre die mittlere Wartezeit von 5,17 h um diesen Betrag zu reduzieren. Wie das Beispiel zeigt, verhält sich hier Fahrzeit/Wartezeit wie 1 : 34,5; somit ist die Fahrzeit vernachlässigbar gering. Die Wartezeitmessungen an anderen Schleusen wurden auf ähnliche Weise durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kap. 4.4.5 zusammengestellt und in Abb. 72 bis 74 aufgetragen.

#### 4.4.5 Überprüfung der Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit Werten, die bei praktischen Messungen ermittelt wurden

Um die Brauchbarkeit der Simulation zu überprüfen, wurden die Simulationsergebnisse mit bei Messungen gewonnenen Werten verglichen und in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Schleuse	Schiffsgrößenverteilung	$\bar{w}$ gemessen	$\bar{w}$ simuliert
Schleuse 1 (Kanal A)	$y = 0,077x - 3,85$	5,17	5,6
Schleuse 1 (Fluss N)	$y = 0,072x - 7,15$	2,59	2,82
Schleuse 2 (Fluss M)	$y = 0,77 x - 15,4$ für $0 < x < 0,92$ $y = 2700$ für $0,92 < x < 1,0$	0,12	0,48

Die Ergebnisse an den Schleusen 1, Kanal A und Schleuse 1, Fluss N zeigen eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und den simulierten Werten. Es kann demnach davon ausgegangen werden, daß die Simulationsmodelle für den Betriebsablauf den tatsächlichen Be-

triebsablauf mit hinreichender Genauigkeit wiedergeben.

Die Abweichungen für die Schleuse 2, Fluss M dürfte auf zwei Ursachen zurückzuführen sein:

1. Die Ankunftsverteilung an dieser Schleuse wird durch den Takt der Schleuse 1 mitbestimmt.
2. Auf dem Fluss M werden in gewissem Umfang die Schiffe von Schleuse zu Schleuse vorgemeldet, wodurch sich die Wartezeiten natürlich verkürzen lassen.

Es ist demnach die Modellbedingung verletzt, daß das Eintreffen der Schiffe ein Poisson-Prozess ist (s. 4.4.1).

## 5. Reisezeiten auf kanalisierten Wasserstraßen

### 5.1 Möglichkeiten der Reisezeitverkürzungen auf einer kanalisierten Wasserstraße

Die Reisezeiten auf kanalisierten Wasserstraßen setzen sich aus 4 Anteilen zusammen:

1. Fahrzeit zwischen den Schleusen
2. Wartezeit vor den Schleusen
3. Reine Schleusungszeit
4. Übernachtungszeit

Nimmt man zunächst an, daß auf nicht allzu hoch belasteten Wasserstraßen, deren Betriebsorganisation einwandfrei funktioniert, Wartezeiten vor den Schleusen nur in vernachlässigbar geringem Umfang auftreten, so können Reisezeitverkürzungen nur noch durch Verkürzung der Fahrzeit, d.h. Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, oder durch Verkürzung der reinen Schleusungszeit erzielt werden.

Bezogen auf eine angenommene Strecke von 10 km wurden graphisch die Fahrzeiten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit sowie die Schleusungszeit aufgetragen (Abb. 75). (Beispiel: Sind auf einer 40 km langen Kanalstrecke 5 Schleusen in gleichen Abständen mit zusammen 100 min Schleusungszeit zu durchfahren, so beträgt die mittlere Schleusungszeit pro 10 km 25 min.) Die Addition beider Werte ergibt dann die Reisezeit.

Erhöht man die Fahrgeschwindigkeit von 6 auf 8 km/h, so vermindert sich die Fahrzeit um 0,417 h von 1,667 h auf 1,250 h. Erhöht man aber die Geschwindigkeit von 12 auf 14 km/h, so vermindert sich die Fahrzeit nur um 0,119 h von 0,833 h auf 0,714 h. Bei relativ hoher Ausgangsgeschwindigkeit erzielt eine Steigerung der Geschwindigkeit um ein bestimmtes Maß nur noch einen absolut wesentlich geringeren Gewinn als bei niedriger Ausgangsgeschwindigkeit. In Abb. 75 sind die oben angegebenen Werte als Beispiel eingetragen. Es ergäbe sich somit die Möglichkeit, eine Grenze zu bestimmen, ab der weitere Aus-

baumaßnahmen zur Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit wirtschaftlich nicht mehr vertretbar sind. Eine Schleusungszeitverkürzung schlägt sich dagegen immer in ihrem Absolutbetrag in einer Reisezeitverkürzung nieder.

## 5.2 Das Verhältnis von Fahrzeit zu Gesamtzeit für die Durchfahrt durch einen Kanal unter besonderer Berücksichtigung der Übernachtungen

Eine Untersuchung zu diesem Thema soll dazu beitragen, die Frage der Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit der Einführung der Continu-Schiffahrt auf Kanälen zu beurteilen.

Als Beispiel wurden die Verhältnisse am Kanal A untersucht. Es wurden dabei an vier aufeinanderfolgenden Tagen in der Bergfahrt von Schleuse 1 nach Schleuse 6 113 Schiffe, in der Talfahrt 106 Schiffe in ihrer Fahrt über die 6 Schleusen verfolgt.

Dabei ergab sich, daß von den zu Berg fahrenden Schiffen 89 einmal, 23 zweimal und 1 dreimal übernachtet haben. In der Talfahrt haben 4 Schiffe nicht, 84 einmal und 18 zweimal übernachtet. Betrachtet man als Nachtzeit die Zeit, in der die Schleusen nicht in Betrieb waren, d.h. die Zeit von 21<sup>00</sup> bis 5<sup>00</sup> entsprechend 8 Stunden, so ergibt sich die mittlere Verlustzeit durch Nachtaufenthalt in der Bergfahrt zu  $1,22 \cdot 8 = 9,75$  h und in der Talfahrt zu  $1,13 \cdot 8 = 9,05$  h (s. Abb. 76).

Demgegenüber steht eine mittlere Fahrzeit nach Abzug der Nachtzeit einschließlich aller Schleusenaufenthalte in der Bergfahrt von 19,2 Stunden und in der Talfahrt von 16,3 Stunden. Die Fahrzeit beinhaltet nicht die vor den Schleusen 1 und 6 auftretenden Wartezeiten.

Die mittlere Gesamtreisezeit ergibt sich dann in der Bergfahrt zu 28,95 Stunden und in der Talfahrt zu 25,35 Stunden.

Würde dementsprechend auf dem Kanal A die Nachtfahrt generell eingeführt, und setzt man voraus, daß dann auch alle Schiffe im Continu-Betrieb fahren, so bestünde die Möglichkeit, die Reisezeit auf diesem Kanal im Durchschnitt um ca. 30 % zu verkürzen.

Außerdem wäre die Möglichkeit gegeben, die zwangsläufig notwendigen Aufenthaltsorte nicht durch das Betriebsende der Schleuse, sondern durch wirtschaftliche Überlegungen bestimmen zu lassen.

### 5.3 Die Koordinierung von Schleusenketten

Unter der Koordinierung von Schleusenketten sei verstanden, daß man Schleusungszeiten und Schiffsgeschwindigkeiten so aufeinander abstimmt, daß ein Schiff, das die Eingangsschleuse einer Schleusenkette passiert hat, an den folgenden Schleusen jeweils freie Einfahrt hat und so mit einem Minimum an Fahrzeit die ganze Kette durchfahren kann. Wartezeiten können bei einem so koordinierten System dann im wesentlichen nur an der Eingangsschleuse auftreten. Aufgrund der Charakterisierung der Schleusen (s. 4.4) nach der Verteilung der Ankunftszeiten sind bei der Koordinierung die Typen 2 (Eingangsschleusen) und 3 (Zwischenschleusen) zu betrachten.

Auf deutschen Wasserstraßen können mehrere Arten von Schleusenketten unterschieden werden.

1. Schleusenketten mit einer Kammer gleicher Größe pro Staustufe. Diese Art bietet sich als Musterbeispiel für eine Koordinierung an und soll auch im weiteren untersucht werden (Beispiel: Kanal A im derzeitigen Zustand, Fluss M).
2. Schleusenketten mit 2 und mehr Kammern gleicher Größe sowohl an der einzelnen Staustufe wie über die Kette gesehen. Die Behandlung einer solchen Kette erfolgt ähnlich wie die der ersten Art (Beispiel: Kanal B). Die Kette unterscheidet sich durch die anderen Wartezeitverhältnisse an der Eingangsschleuse. Außerdem ist - bei gleichen Kammerabmessungen - die theoretische Leistungsfähigkeit für die Koordinierung um ein der Zahl der Kammern entsprechendes Vielfaches höher als bei der ersten Art.
3. Schleusenketten mit 2 oder mehreren verschiedenen Kammern pro Stufe, bei denen sich aber die Kammerabmessungen an allen Stufen wiederholen (Beispiel: Kanal A nach Fertigstellung der zweiten Schleusen). Für die Koordinierung wird es bei derartigen Schleusenketten zweck-

mäßig sein, die parallel liegenden Kammern als unabhängige Systeme aufzufassen und Schiffe, die einmal in einem Kammertyp eingefahren sind, über die ganze Kette in diesem Kammertyp zu schleusen.

Ausnahmen von dieser Regel können gemacht werden, wenn die Kapazität der Schleusen nicht ausgenutzt wird.

4. Schleusenketten mit von Staustufe zu Staustufe unterschiedlichen Kammerabmessungen (Beispiel: Teile des Kanals C). Sollte hier eine Koordinierung angestrebt werden, so kann diese nur auf der kleinsten Kammerleistungsfähigkeit innerhalb der Kette aufbauen, wobei kürzere Schleusungszeiten an kleineren Schleusen mit zu berücksichtigen sind.

Die verschiedenen Arten von Schleusenketten sind in Abb. 77 schematisch dargestellt.

#### 5.3.1 Wahl der Koordinierungsgeschwindigkeit

Voraussetzung für die Koordinierung ist die Wahl einer geeigneten Fahrgeschwindigkeit, die den Schiffsführern empfohlen wird. Die Geschwindigkeit muß so gewählt werden, daß alle mit üblichen Motoren ausgerüsteten Schiffe diese auch einhalten können und nur infolge besonderer Bauart extrem langsame Fahrzeuge diese Geschwindigkeit nicht einhalten können. Da die möglichen Geschwindigkeiten sich von Wasserstraße zu Wasserstraße, oft auch von Haltung zu Haltung ändern, müssen für jeden charakteristischen Abschnitt Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden.

Für den Kanal A wurden in der Haltung 1 Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abb. 21 und 22 dargestellt sind. Auf Geschwindigkeitsmessungen in den anderen Haltungen wurde verzichtet, da der Kanal A über die gesamte Länge einen etwa einheitlichen Querschnitt aufweist und im wesentlichen Durchgangsverkehr herrscht, so daß auch der Beladungsgrad über die Strecke etwa konstant ist. Aus den ermittelten Geschwindigkeiten lassen sich dann die notwendigen Reisezeiten von Schleuse zu Schleuse errechnen. Zu beachten ist allerdings, daß es notwendig sein kann, zu den ermittelten Reisezeiten Zuschläge für Langsamfahrstellen zu machen, z.B. an Parallelhäfen oder Engstellen. Auch

diese Zuschläge sind von Fall zu Fall für jede Haltung zu quantifizieren.

Für die weiteren Untersuchungen wird als Koordinierungsgeschwindigkeit der nächste ganzzahlige Wert, der kleiner als der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung ist, gewählt.

Die Wahl dieser Geschwindigkeit besagt demnach, daß bei symmetrischer Geschwindigkeitsverteilung ca. die Hälfte aller Fahrzeuge langsamer fahren muß als ihre bisherige Wunschgeschwindigkeit, während die übrigen Schiffe schneller fahren müssen, soweit sie dazu in der Lage sind, oder aber nicht an der Koordinierung teilnehmen können.

Bei kanalisiertem Flüssen, bei denen bei höherem Wasserstand eine erhebliche Störung auftritt, können noch zusätzliche Erhebungen über die Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Wasserstand und über die Schiffszusammensetzung notwendig sein.

Die dargestellte Methode stelle eine erste Näherung für die Bestimmung der Koordinierungsgeschwindigkeit und gleichzeitig die obere Grenze der möglichen Geschwindigkeit dar. Die so gewählte höchste Koordinierungsgeschwindigkeit ist vom Schiffspark und vom Kanalquerschnitt abhängig, da beide Parameter in die Geschwindigkeitsmeßergebnisse eingehen. Bei einer Veränderung eines der beiden Parameter muß die obere Grenze der möglichen Geschwindigkeit neu bestimmt werden.

Die tatsächliche Geschwindigkeit ergibt sich dann bei Berücksichtigung der Schleusungszeiten der zu koordinierenden Schleusen. Wie sich geometrisch leicht nachprüfen läßt (Abb. 78), muß die Summe der Fahrzeiten zu Berg und zu Tal ganzzahlige Vielfache der Kreuzungsschleusungszeit ergeben.

Es ergibt sich somit:

$$1 \left( \frac{1}{v_B} + \frac{1}{v_T} \right) = t_B + t_T = n (s_B + s_T)$$



$l$  = Abstand der Schleusen

$v_B, v_T$  = Geschwindigkeit zu Berg. bzw. Tal

$t_B, t_T$  = Fahrzeit zu Berg bzw. Tal

$s_B, s_T$  = Zeit für eine Schleusung zu Berg bzw. Tal

Die zuerst für Berg- und Talfahrt ermittelten Fahrzeiten müssen dementsprechend so erhöht werden, daß diese Bedingung erfüllt wird.

Eine Verkürzung der Fahrzeiten von Schleuse zu Schleuse zur Erfüllung der geometrischen Bedingung sollte nur dann der Koordinierung zugrundegelegt werden, wenn sichergestellt ist, daß auch ein hoher Prozentsatz an Schiffen die daraus folgende höhere Geschwindigkeit einhalten kann.

Natürlich wäre es theoretisch auch denkbar, daß für ein bestimmtes Schiff mehrere Schleusenöffnungszeiten zur Verfügung stehen. Diese Wahl scheidet jedoch im Regelfall aus. Die Fahrzeiten in den Haltungen sind im Verhältnis zur Schleusungszeit so kurz, daß bei einer Wahl einer zweiten oder gar dritten möglichen Schleusenöffnungszeiten sich dann unrealisierbar hohe oder unwirtschaftlich niedrigere Schiffsgeschwindigkeiten ergeben. Außerdem müßte dann innerhalb der Haltungen freie Überholmöglichkeit bestehen. Wo das Überholen aber nicht sowieso verboten ist, ist es meist bei den gegebenen Kanalverhältnissen nur unter größerer Gefahr durchführbar (s. 2.5).

### 5.3.2 Wahl der Koordinierungsart

Für eine Koordinierung ergeben sich zwei Möglichkeiten (s. Abb. 78):

1. Alle Schleusen werden wie bisher entsprechend ihrer kürzest möglichen Schleusungszeit betrieben.
2. Alle Schleusen werden entsprechend der Schleusungszeit der langsamsten Schleuse innerhalb der Kette betrieben.

In beiden Fällen arbeiten die Schleusen in konstantem Takt. Konstanter Takt besagt dabei, daß die Zeit für eine Leerschleusung auf die Zeit für eine Schleusung mit Schiff ausgedehnt wird und somit zu bestimmten

Zeitpunkten in konstanten Abständen die Schleuse eine Schleusung in einer Richtung vornimmt. Wird die Koordinierung entsprechend Fall 1 vorgenommen, so ändert sich die empfohlene Geschwindigkeit von Schleusung zu Schleusung innerhalb einer Haltung. Gleiche Fahrgeschwindigkeiten wiederholen sich nach einer bestimmten Anzahl von Schleusungen. Diese Abstände seien Perioden genannt. Die Periodendauer ergibt sich zum kleinsten gemeinsamen Vielfachen aller Kreuzungsschleusungszeiten der zu koordinierenden Schleusen (s. Abb. 78). Im zweiten Fall ist die Fahrgeschwindigkeit innerhalb der einzelnen Haltungen immer gleich, es muß eventuell nur eine Verschiebung des Betriebsbeginns der folgenden Schleusen gegenüber der ersten Schleuse zur Erreichung günstiger Fahrgeschwindigkeiten einmal bestimmt werden.

Ein entscheidender Unterschied in den beiden Verfahren liegt darin, daß bei der zweiten Methode alle Schiffspulks durch die gesamte Kette durchfahren können, während bei der ersten Methode je nach den Verhältnissen der Schleusungszeiten nur ein gewisser Teil der Pulks durch die ganze Kette fahren kann, während andere Durchfahrungsöglichkeiten innerhalb der Kette enden oder erst innerhalb beginnen. Derartige Fälle sind in Abb. 79 gestrichelt eingetragen.

Die Koordinierungsmethode wird also u.a. auch nach den Verkehrsströmen zu wählen sein. Ist ein hoher Prozentsatz an Durchgangsverkehr vorhanden, so ist die zweite Methode als die sinnvollere anzusehen, überwiegt dagegen der Ziel- und Quellverkehr, so ist eine Koordinierung nach der ersten Methode ebenfalls ins Auge zu fassen.

Bei jeder Koordinierungsmethode muß besonders darauf geachtet werden, daß auch Schiffe aus Häfen und Stichkanälen in die Koordinierung einfüßeln können.

Da nach 4.4.2 der Auslastungsgrad für die Zufahrt vom freien Fahrwasser an den Eingangsschleusen von Kanälen möglichst nicht über 0,7 ansteigen sollte, da bei höherer Auslastung wegen der zufallsverteilten Ankunft der Schiffe die Zunahme der mittleren Wartezeiten unverhältnismäßig stark ist, bleibt an den Zwischenschleusen eine Differenz zwischen möglicher und praktischer Leistungsfähigkeit von

30 % und mehr erhalten, die der einfädelnden Schifffahrt zur Verfügung steht.

Sollte in dem betrachteten Kanal Ziel- und Quellverkehr herrschen, so wird durch jedes aus dem Pulk ausfahrende Schiff Kapazität für ein einfahrendes Schiff gleicher Größe frei.

Für die Koordinierung wurde aus dem Simulationsmodell für den Betriebsablauf an einer Einkammerschleuse mit mehreren Schiffen pro Kammer eine Modellvorstellung abgeleitet, die sich auf die speziellen Verhältnisse des Kanals A stützt und die einen Vergleich mit den aus Schleusentagebüchern gewonnenen Reisezeiten erlaubt.

Es wurden dabei die Ankunfts- und Schleusungszeiten für alle Schiffe im Ober- und Unterwasser ausgedruckt. Der Zuflußparameter wurde entsprechend dem gewählt, der bei den Messungen im September 1966 vorhanden war [39]. Die Modellvorstellung wurde dann derart erweitert, daß angenommen wurde, die zufallsverteilte Ankunft trete nicht im Unter- und Oberwasser einer jeden Schleuse auf, sondern die zufallsverteilte Ankunft der Bergfahrer trete im Unterhafen der Schleuse 1, der unteren Eingangsschleuse, und die zufallsverteilte Ankunft der Talfahrer im Oberhafen der Schleuse 6 auf. Da die Schleusungszeit beider Schleusen annähernd gleich war, war der Annahme für die Simulation entsprochen, daß die Schleusungszeit zu Berg und zu Tal gleich sein muß. Die Koordinierungsgeschwindigkeit wurde zu Berg mit max. 8 km/h und zu Tal mit max. 9 km/h entsprechend den Geschwindigkeitsmessungen gewählt (s. Abb. 79, 80).

Die Schleusungszeiten für eine Kreuzungsschleusung wurden wie folgt für die erste Koordinierungsart nach den Ergebnissen nach [2] angenommen:

Schleuse 1	60 Min
Schleuse 2	54 Min
Schleuse 3	60 Min
Schleuse 4	45 Min
Schleuse 5	54 Min
Schleuse 6	60 Min

Für die zweite Koordinierungsart wurden einheitlich 60 Min Schleusungszeit angenommen.

Unter diesen getroffenen Voraussetzungen ließen sich dann die Reisezeiten aus dem Simulationsmodell für beide Koordinierungsarten ermitteln (s. Abb. 79 und 80).

Für die Durchfahrt durch den Kanal A ergab sich bei Koordinierungsart 1 eine mittlere Reisezeit zu Berg von 10,5 und zu Tal von 10 Stunden, bei Koordinierungsart 2 zu Berg 10 Stunden und zu Tal 9 Stunden. Diese Zeiten beinhalten natürlich nicht die Wartezeiten vor den Eingangsschleusen, die von der Auslastung abhängig sind. Die Reisezeiten innerhalb der Kette sind von der Auslastung unabhängig.

Im Vergleich dazu betragen die Reisezeiten, wie sie bei den Messungen im September 1966 ermittelt wurden, in der Bergfahrt 19,2 h und in der Talfahrt 16,3 Stunden, wobei die Zeit, in der die Schleusen nicht arbeiteten, bereits abgezogen ist (Abb. 76). Der Zeitgewinn würde somit in der Bergfahrt 45,3 % bzw. 48 % und in der Talfahrt 38,5 % bzw. 45 % betragen.

### 5.3.3 Nomogramme zur Bestimmung der Fahrzeit, bei der ein Schiff, das gerade eine Schleuse verläßt, die nächste zur Zeit der Einfahrtfreigabe erreicht

Zur vereinfachten Bestimmung der notwendigen Fahrgeschwindigkeiten wurden zwei Nomogramme aufgestellt.

Nomogramm 1 (Abb. 81): Dieses Nomogramm eignet sich speziell dann, wenn mehrere Schleusen gleicher Schleusungszeit koordiniert werden sollen (Koordinierungsfall 2).

Auf der Abszisse ist hierbei die Entfernung zweier Schleusen aufgetragen, auf der Ordinate die Fahrzeit zwischen ihnen. Die Geraden für die daraus resultierenden Geschwindigkeiten sind ebenfalls eingetragen.

Auf der Abszisse des Diagramms rechts sind mögliche Schleusungszeiten eingetragen, auf den zugehörigen Vertikalen die ganzzahligen Vielfachen dieser Schleusungszeiten. Zum Beispiel würde  $n = 2$  bedeuten, daß die Strecke in der Zeit durchfahren wird, in der die folgende Schleuse 2 Kreuzungsschleusungen durchführt. Jeder weitere Wert kann durch Inter- oder Extrapolation gewonnen werden.

Es bestehen nun, je nach den Gegebenheiten, 2 Ablesemöglichkeiten.

1. Die Schleusen beginnen ihren Betrieb alle zur gleichen Zeit in der gleichen Richtung. Es wird dann im Diagramm rechts die zutreffende Schleusungszeit  $s_2$  der nächsten Schleuse gesucht und vom Punkt  $n = 1$  horizontal herübergegangen bis zu einer Vertikalen, die über der Schleusenentfernung errichtet wird. Am Schnittpunkt dieser Geraden läßt sich eine mögliche Geschwindigkeit ablesen. Erscheint diese für die gegebenen Verhältnisse als zu hoch, so muß der Vorgang mit  $n = 2, 3$  oder  $4$  wiederholt werden, bis der Schnittpunkt mit einer möglichen, fahrbaren Geschwindigkeit zusammenfällt.

Ablesebeispiel 1: Die Schleusenentfernung betrage 14 km, die folgende Schleuse habe eine Schleusungszeit  $s_2 = 40$  min. Für  $n = 2$  ergibt sich dann eine Geschwindigkeit von  $v = 10,5$  km/h. Diese sei für den betreffenden Kanal zu hoch. Für  $n = 3$  ergibt sich dann eine realisierbare Geschwindigkeit von  $v = 7$  km/h.

2. Ist die Geschwindigkeit vorgegeben, so wird von der Schleusenentfernung zu der entsprechenden Geschwindigkeitsgeraden hochgegangen und von dort horizontal bis zu der über der entsprechenden Schleusungszeit errichteten Vertikalen. Trifft nun diese Horizontale keinen Punkt mit ganzzahligem  $n$ , so bedeutet das, daß die folgende Schleuse in ihrem Takt um eine Zeit  $a$ , die sich auf der Ordinate zwischen  $n = 1$  und  $n = 1 + 1$  als Abstand von  $n = 1$  ablesen läßt, verschoben arbeiten muß.

Ablesebeispiel 2: Die Schleusenentfernung sei 12 km, die vorgegebene Geschwindigkeit 10 km/h. Die Schleusungszeit der folgenden Schleuse betrage 55 min. Daraus ergibt sich dann, daß die Schleuse 2 im Takt um  $55/3$  min  $\sim 18$  min gegenüber Schleuse 1 verschoben arbeiten muß.

Nomogramm 2 (Abb. 82): Dieses Nomogramm kann seine Verwendung dann finden, wenn Schleusen koordiniert werden sollen, die keine gleiche Schleusungszeit haben und bei denen es nicht sinnvoll ist, die Schleusungszeiten der schnelleren Schleusen so zu dehnen, daß sie mit den langsameren übereinstimmen (Koordinierungsfall 1). Mit Hilfe von Nomogramm 2 kann sofort die Fahrzeit und Fahrgeschwindigkeit zur folgenden Schleuse abgelesen werden. Das Nomogramm ist nur für jeweils eine Entfernung brauchbar; für andere Schleusenentfernungen wären entsprechende Nomogramme aufzutragen. Auf der Abszisse des Nomogramms ist  $n$  eingetragen und auf den Ordinaten die Geschwindigkeit und die Fahrzeit.

Die Kurven sind für verschiedene Schleusungszeiten  $s_2$  der folgenden Schleuse eingetragen.

Das Nomogramm wurde für eine Entfernung von  $l = 15$  km aufgestellt.

Die Ablesung kann wieder nach 2 Methoden erfolgen:

1. Es wird von einem ganzzahligen  $n$  hochgegangen bis zum Schnitt mit der entsprechenden Schleusungszeitkurve (evtl. Interpolation) und auf der Horizontalen durch den Schnittpunkt die mögliche Fahrgeschwindigkeit oder Fahrzeit abgelesen.

Ablesebeispiel 1: Es sei  $n = 2$  und die Schleusungszeit der folgenden Schleuse 40 min. Daraus ergibt sich eine geeignete Fahrgeschwindigkeit von  $v = 11$  km/h.

2. Bei vorgegebener Fahrgeschwindigkeit wird von dieser horizontal bis zur entsprechenden Schleusungszeitkurve gegangen und auf der Vertikalen durch diesen Schnittpunkt  $n$  und die Taktverschiebung  $a$  der folgenden Schleuse abgelesen.

Ablesebeispiel 2: Die vorgeschriebene Fahrgeschwindigkeit sei 9 km/h, die Schleusungszeit der folgenden Schleuse 40 min. Es ergibt sich somit, daß Schleuse 2 um  $s_2/2 = 20$  min gegenüber Schleuse 1 im Takt verschoben arbeiten muß.

Bei Schleusen verschiedener Schleusungszeit ändert sich jedoch die Taktverschiebung von Schleusung zu Schleusung, so daß die Ablesung im allgemeinen wie unter 1 beschrieben, durchgeführt werden muß, wo-

bei die Taktverschiebung a jeweils dem gewählten n zuzuaddieren ist.

Die Taktverschiebung kann entweder durch Plan oder durch laufende Meldung der nächsten Schleuse bekannt gemacht werden.

Durch die Eintragung der Kurven für verschiedene Schleusungszeiten kann das Nomogramm für jede Schleusungszeit Anwendung finden, auch wenn diese durch Wasserstandsschwankungen variabel ist.

#### 5.4 Darstellung einer Möglichkeit zur teilweisen Koordinierung des Verkehrs auf Wasserstraßen

Auf Wasserstraßen mit geringer Verkehrsbelastung kann es sinnvoll sein, die Schleusen nicht während der gesamten Betriebszeit in festem Takt schleusen zu lassen, sondern nur zu bestimmten Zeiten sogenannte Festzeitfahrten [6] einzurichten. Für die Schifffahrt würde das bedeuten, daß ihr zu gewissen Zeiten die Möglichkeit gegeben wird, ohne Wartezeiten an den Zwischenschleusen die gesamte Wasserstraße zu passieren.

Im einzelnen müßte eine solche Koordinierungsart auf folgender Basis aufgebaut werden:

1. Es wird eine zu bestimmende Anzahl von Schleusungen, die an jedem Tag zur gleichen Zeit liegen, freigehalten. Zwischen diesen Zeiten arbeitet die Schleuse nach Bedarf. Zu diesen festen Zeiten ist die Schleuse für Schiffe freizuhalten, die sich an der Eingangsschleuse zur Durchfahrt durch einen bestimmten Teil der Kanalstrecke gemeldet haben und auf dieser Strecke keinen Zwischenhalt machen wollen.
2. Diese freigehaltenen Schleusungszeiten werden so aufeinander abgestimmt, daß die verkehrenden Schiffe mit möglichst optimaler Geschwindigkeit (Koordinierungsgeschwindigkeit) die Schleusenkette durchfahren können.
3. Die zeitlichen Abstände der Festzeitfahrten sollten sich zu einem ganzzahligen Vielfachen der Schleusungszeit der langsamsten Schleuse ergeben. Falls Bedarf herrscht bzw. die Verkehrsbelastung zunimmt, können so zusätzliche Festzeitfahrten zwischengeschaltet werden, ohne daß grundsätzliche Änderungen notwendig sind.

5.5 Gesichtspunkte, die beim Entwurf neuer Wasserstraßen oder beim Umbau bestehender Wasserstraßen im Hinblick auf eine schnelle Verkehrsabwicklung und evtl. Koordinierung Berücksichtigung finden sollten

Wie bereits erwähnt, wurden Wasserstraßen bisher fast ausschließlich nach Gesichtspunkten geplant, die sich aus der Topographie des Geländes oder ähnlichen äußeren Gegebenheiten ergaben.

Bei der Neuanlage von Wasserstraßen sollte jedoch ein reibungsloser Betriebsablauf besonders berücksichtigt werden. Im folgenden werden zwei Punkte behandelt, die besondere Beachtung finden sollten.

5.5.1 Die Zeitdauer zur Überwindung des Höhenunterschiedes an Schiffshebeanlagen

In [40] wurden Vergleiche über die Schleusungszeiten an Staustufen großer Hubhöhe durchgeführt.

Es wurden bei dieser Untersuchung

1. Schleusentreppen mit Kammerlängen zwischen 85 und 250 m
  2. Senkrechte Hebewerke mit Troglängen zwischen 85 und 170 m
  3. Längsgeneigte Ebenen mit Troglängen zwischen 85 und 170 m
- verglichen.

Die Berechnungen basieren auf gemessenen Zeiten für die einzelnen Schiffshebeanlagen. Bei der Untersuchung wurden auch große Schiffsverbände mitbetrachtet, die nicht in einem Hubvorgang geschleust, bzw. gehoben werden können, da die Kammer- bzw. Trogrgröße nicht ausreicht.

In Abb. 83 wurden für 170 m Kammer- bzw. Troglänge die Vergleichswerte der verschiedenen Schiffshebeanlagen aufgetragen. Die hier ermittelten Zeiten beinhalten jedoch nur den Fall, daß der ganze Schiffsverband in einem Hubvorgang geschleust werden kann. Die Darstellung zeigt, daß



Hebewerke und längsgeneigte Ebenen die Hubvorgänge in wesentlich kürzerer Zeit bewältigen können als Schleusentreppen.

#### 5.5.2 Untersuchungen über die Wahl günstiger Schleusenabstände beim Entwurf von Kanalbaustrecken

Zur Minimierung von Wartezeiten vor Schleusen innerhalb einer Kette wurden in [41] am Beispiel des geplanten Main-Donau-Kanals theoretische Überlegungen angestellt. Vorausgesetzt wurde dabei eine mögliche Fahrgeschwindigkeit von 9 km/h über die ganze Kanalstrecke. Die Untersuchung ergab, daß z.B. durch geringfügige Verlegung einzelner Schleusen, selbst wenn dadurch die Gesamtkanalstrecke etwas länger wird, die Reisezeiten verkürzt werden können. Das Ergebnis zeigt, daß die Länge der Haltungen so auf den Schleusenrythmus abgestimmt werden sollte, daß die Fahrzeit bei der gewählten Geschwindigkeit einem Vielfachen der Schleusungszeit entspricht.

Ist z.B. innerhalb einer Haltung von 36 km Länge eine Schleuse zu errichten, deren Zeit für eine Kreuzungsschleusung eine Stunde betrage, so ist es bei einer vorgegebenen Koordinierungsgeschwindigkeit von 9 km/h zweckmäßig, die Schleuse in einen Punkt zu legen, zu dem die Fahrzeit von beiden Enden der Haltung ein ganzzahliges Vielfaches der Schleusungszeit beträgt. In dem gewählten Beispiel wäre die Anlage der Zwischenschleuse demnach bei km 9, km 18 oder km 27 sinnvoll.

6. Technische, verwaltungsmäßige und juristische Maßnahmen, die zur Verwirklichung der vorgeschlagenen Betriebsänderungen notwendig sind

6.1 Notwendige Änderungen und Zusätze zur Binnenschiffahrtsstraßenordnung zur Erreichung einer optimalen Koordinierung

Im Falle der Koordinierung von Schleusen muß gewährleistet werden, daß das Angebot, durch alle Schleusen ohne Aufenthalt fahren zu können, nicht durch individuelles Verhalten der Schiffsführer gestört wird. Es müßten deshalb folgende Änderungen und Zusätze der BSchSO erwogen werden:

1. Zu § 103: Im Gegensatz zu der bisherigen Regelung, daß die Schiffe in der Reihenfolge ihres Eintreffens geschleust werden, sollte innerhalb einer Schleusenkette der durchgehende Verkehr vor dem aus Häfen u.ä. einbiegenden Verkehr Vorrang haben. Dies gilt nicht für die Eingangsschleuse einer Kette.
2. Schiffe, die die vorgeschriebene Fahrgeschwindigkeit nicht einhalten können oder wollen, verlieren das Recht, an der folgenden Schleuse sofort geschleust zu werden und müssen warten, bis Schleusenkapazität frei ist.
3. Schiffe, die innerhalb einer Kette aus Häfen o.ä. einbiegen, werden entsprechend freier Schleusenkapazität für einen bestimmten Zeitpunkt eingeteilt. Der Zeitpunkt freier Kapazität kann bei Voranmeldung vorab z.B. telefonisch durch die Schleusen mitgeteilt werden.
4. Alle Schleusen einer Kette schleusen zu bestimmten Zeiten, die veröffentlicht werden. Die Schleusungszeiten der einzelnen Schleusen werden so eingerichtet, daß sich eine für die Fahrt zwischen den Schleusen entsprechend der Wasserstraße geeignete Schiffsgeschwindigkeit ergibt. Die Geschwindigkeit wird so gewählt, daß entsprechend durchzuführenden Messungen ein zu bestimmender Prozentsatz von Schiffen diese Geschwindigkeit einhalten kann.
5. Zur Erleichterung der Schifffahrt werden geeignete Anzeigeeinstrumente am Ufer entwickelt oder den Schiffsführern graphische Hilfsmittel

an Hand gegeben. Bei Einhaltung dieser Angaben hat der Schiffsführer die Gewähr, daß er die folgende Schleuse bei "Einfahrt frei" erreicht (s. 6.2).

6. An der Eingangsschleuse einer Schleusenkette hat der Schiffsführer anzugeben, auf welche Strecke er die koordinierte Schleusenkette in Anspruch zu nehmen beabsichtigt, damit frühzeitig eine Einteilung der Schiffe für die folgenden Schleusen vorgenommen werden und der Quellverkehr aus den Häfen rechtzeitig eingegliedert werden kann, so daß diesem möglichst geringe Wartezeiten entstehen. Hier ist speziell auch anzugeben, ob ein Schiff vorzeitig (vor Ende der Schleusenbetriebszeit) zu übernachten beabsichtigt, wodurch es entsprechend Punkt 2 seinen Rang verlieren würde.
7. Vor der Eingangsschleuse sollten Startplätze ausreichender Größe eingerichtet werden, damit dem Aufruf zur nächsten Schleusung rechtzeitig das Bereitmachen zur nächsten Einfahrt folgen kann. Auf diese Weise kann verhindert werden, daß die Ausfahrt der Schiffe aus der vorhergehenden Schleusung durch vor der Einfahrt manövrierende Schiffe behindert wird. Das Bereitlegungsmanöver findet dann während der vorhergehenden Schleusung statt.

#### 6.2 Hilfsmittel zur Einhaltung empfohlener Geschwindigkeiten

Bei der Koordinierung von Schleusen ist es erforderlich, daß der Schiffsführer eine ihm vorgegebene Geschwindigkeit einhält, damit er zum richtigen Zeitpunkt an der nächsten Schleuse ankommt und so nicht bis zur Einfahrtfreigabe im Vorhafen anlegen muß.

Die Bestimmung von Schiffsgeschwindigkeiten über Grund ist im Gegensatz zur Bestimmung der Geschwindigkeit gegen Strom direkt nicht möglich. Es kann also die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund nur indirekt bestimmt werden.

Als einfachstes Hilfsmittel könnte ein Diagramm dienen, das es ohne Rechnung erlaubt, aus der Fahrzeit über einen Kilometer, die durch Stoppen der Zeit zwischen zwei Kilometermarkierungen ermittelt wird, die gefahrene Geschwindigkeit zu bestimmen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dem Schiffsführer einen graphischen Fahrplan für die Fahrt bis zur nächsten Schleuse an die Hand zu geben, aus dem die Abfahrzeit an der Schleuse und Durchfahrzeiten an charakteristischen Stellen der Strecke hervorgehen, so daß er jeweils feststellen kann, ob er zu schnell oder zu langsam ist, und wenn ja, um wieviel. Der Schiffsführer hätte dann nur die Fahrzeiten zu der Uhrzeit zu addieren und erhielte so die tatsächlichen Uhrzeiten der Durchfahrt an diesen Punkten (Abb. 83).

Die dritte Möglichkeit besteht in Anzeigergeräten, die am Ufer angebracht werden.

Hierfür seien 2 Beispiele angegeben.

1. In Form einer Uhr mit 2 Zeigern, die fest verbunden sind und deren Öffnungswinkel die Schleusungszeit der folgenden Schleuse angibt. Der Abstand zum Nullpunkt zeigt die Zeit, bei deren Einhaltung das Schiff die nächste Schleuse bei "Einfahrt frei" erreicht. Aufgabe des Schiffsführers wäre es dann, sich je nach der Geschwindigkeit für die nächste oder übernächste Schleusung zu entscheiden, wobei sich in aller Regel aus den möglichen Fahrgeschwindigkeiten nur eine sinnvolle Einfahrzeit in die folgende Kammer ergibt. Voraussetzung ist dazu, daß bei der Uhr auch die jeweilige Entfernung zur Schleuse angegeben wird (Abb. 84).

Bei großen Schleusenentfernungen kann es notwendig sein, daß an der Uhr auch mehr als 2 Zeiger angebracht werden, da es nicht unbedingt möglich sein muß, daß die Fahrzeit kleiner oder gleich 2 Schleusungszeiten ist.

2. Bei dieser Form zeigt das Anzeigeeinstrument direkt das Maß an, um das das Schiff zu früh oder zu spät ist oder ob es genau rechtzeitig ist. Anhand der Zusatztafel kann der Schiffsführer sich ein Bild machen, um wieviel er beschleunigen oder verzögern muß, um die nächste Schleuse zur richtigen Zeit zu erreichen (Abb. 84).

Beide Uferanzeigerinstrumente setzen voraus, daß sie in möglichst kurzen Abständen wiederholt werden, in denen die zu korrigierenden Abweichungen noch gering sind, um dem Schiffsführer die Kontrolle seiner Fahrgeschwindigkeit zu erleichtern.

Bei jeder Art des Fahrplanfahrens auf Wasserstraßen wird es auf jeden Fall günstig sein, wenn alle Schiffe mit Funksprechgeräten ausgerüstet sind, über die sie sich mit der nächsten Schleuse in Verbindung setzen können, um so Informationen erhalten oder solche weitergeben zu können. Nur so kann eine Schleusenanlage optimal ausgenutzt werden, da dann ein Schiff, das zur nächsten Schleusung vorgemeldet ist und aus irgendwelchen Gründen diese nicht rechtzeitig erreichen kann, sich abmelden und so seinen Platz einem Schiff zur Verfügung stellen kann, das zwischenzeitlich aus einem Hafen zur Schleuse gefahren ist und sonst auf eine Lücke im durchgehenden Strom warten müßte.

Als Beispiel für die Praktikabilität einer sehr umfangreichen Steuerung und Regelung des Verkehrs auf Wasserstraßen durch Signalisierung und Meldesystem sei auf die Verkehrsregelung auf dem Nord-Ostsee-Kanal hingewiesen [42].

## 7. Schlußbemerkungen

Im Rahmen dieser Arbeit sollte das Verkehrssystem Binnenwasserstraßen in Bezug auf seine Leistungsfähigkeit und seinen Betriebsablauf untersucht werden. Als Grundlage zu dieser Arbeit konnten die umfangreichen Meßergebnisse dienen, die im Rahmen von [2], [6], [19] und [39] gewonnen wurden.

Die Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse:

1. Der Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen kann mit den Methoden der mathematischen Statistik beschrieben werden.
2. Die Reisezeiten auf Wasserstraßen mit wechselnden Fließgeschwindigkeiten hängen stark vom Wasserstand ab.  
Für ein Beispiel wurde die Abhängigkeit zwischen Wasserstand und notwendiger Anzahl von Schiffen zur Bewältigung eines Transportvorgangs über eine bestimmte Strecke in einer bestimmten Zeit dargestellt.
3. Zur Bestimmung einer praktischen Leistungsfähigkeit von Schleusen wurde die Wartezeit als Kriterium mit herangezogen. Die Einflußfaktoren wurden aus Messungen gewonnen. Die mittleren Wartezeiten wurden mit Hilfe von Simulationsmodellen ermittelt.
4. Durch Koordinierung lassen sich die Wartezeiten vor Zwischenschleusen von Schleusenketten vermeiden.  
An einem Beispiel wurde gezeigt, daß sich die Reisezeiten durch Koordinierung reduzieren lassen.

Durch solche Maßnahmen wird mit Sicherheit die Individualität der Binnenschifffahrt teilweise verloren gehen. Der Fahrplan für Binnenschiffe, der sich durch die Koordinierung ergibt, wird dafür aber auch die Möglichkeit eines Zusammenspiels von Hafen und Strecke ergeben, d.h. der Betriebsablauf im Hafen kann auf den Betriebsablauf auf der Strecke abgestimmt werden und umgekehrt.

Es wird auf diese Weise möglich sein, den Verkehr auf den Wasserstraßen zu beschleunigen und der Binnenschifffahrt Gelegenheit zu geben, ihrer Bedeutung als wesentlichem Verkehrsträger in unserem Gesamtverkehrssystem gerecht zu werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Der Bundesminister für Verkehr Die Verkehrswege in der Bundesrepublik Deutschland  
Harbeke Verlag, München 1964
- [2] Leutzbach, W., Koehler, R. Generalverkehrsplan NW, Bestandsaufnahme Binnenwasserstraßennetz, 1965/66
- [3] Wiener, F. Untersuchung über die Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse auf der Mittelrheinstrecke Mannheim - St. Goar  
Binnenschifffahrtsverlag Duisburg
- [4] Mosonyi, E. Einfluß von Staustufen auf die Schifffahrt  
Die Wasserwirtschaft Dez. 1958
- [5] Fuchs, H. Die Donaustaustufe Jochenstein und ihr Einfluß auf die Schifffahrt  
Binnenschifffahrtsnachrichten Okt. 1956
- [6] Leutzbach, W., Koehler, R., Leutwein, B. Untersuchungen über den Verkehrsablauf auf der Mosel  
Gutachten im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums 1966/67
- [7] Renner, E. Der Strukturwandel des Binnenschiffsverkehrs nach dem Kriege  
Schriftenreihe des Zentralvereins für Deutsche Binnenschifffahrt e.V., Heft 73/1955
- [8] David, R. Verkürzung der Reisezeiten durch Continu-Schub-Schifffahrt und Hindernisse für diese Verkürzung im Rhein-stromgebiet  
Schriftenreihe der IHK Karlsruhe, Band 3/1967
- [9] Arbeitskreis III des Bundesverbands f. deutsche Binnenschifffahrt Beschleunigung des Umlaufs  
Zeitschrift für Binnenschifffahrt, Heft 2/1967

- [10] Steer, D.T., Page, A.C.C. Feasibility and Financial Studies of a Port Installation  
Operational Research Quarterly, Vol. 12 No 3, September 1961
- [11] Guitonneau, R. Recherches Theoriques sur quelques Problemes Poses par l'Extension du Port de Dunkerque  
Annales des Ponts et Chaussees, Janv./Fevr. 1961
- [12] Schulze, G. Mathematische Durchdringung des Hafensbetriebs  
Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden, 11/1964, Heft 3
- [13] Thomä, H. Statistische Untersuchungen der Liegezeiten in den Binnenhäfen  
unveröffentlicht
- [14] Greenshields, B.D., Weida, F.M. Statistics with Applications to Highway Traffic Analysis  
The Eno Foundation, 1952
- [15] Leutzbach, W. Ein Beitrag zur Zeitlückenverteilung gestörter Straßenverkehrsströme  
Dissertation TH Aachen, 1956
- [16] Schuhl, A. The Probability Theory Applied to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highways  
The Eno Foundation, 1955
- [17] - Umdruck des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe  
Blatt VII 3.1 WS 1967/68
- [18] Konen, H. Physikalische Plaudereien  
Verlag der Buchgemeinde, Bonn 1938
- [19] Leutzbach, W., Koehler, R. Mathematisch-statistische Verkehrscharakteristiken des Binnenwasserstraßenverkehrs  
Forschungsbericht im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft; auszugsweise veröffentlicht als vorläufiger Bericht Nr. 1 des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Februar 1964



- [20] Graf, U., Henning, H.J.                    Statistische Methoden bei  
textilen Unternehmungen  
Springer-Verlag Berlin, 1960
- [21] Leutzbach, W., Bexelius, S.                Probleme der Kolonnenfahrt  
Straßenbau und Straßenverkehrs-  
technik, Heft 44, Bundesverkehrs-  
ministerium Bonn, 1966
- [22] Wiedemann, R.                                Verkehrsablauf hinter Licht-  
signalanlagen  
Dissertation Universität  
Karlsruhe, 1968, im Druck
- [23] Daeves, K., Beckel, A.                    Großzahl-Methodik und Häufig-  
keitsanalyse  
Verlag Chemie, Weinheim 1958
- [24] Egert, Ph.                                    Die mathematischen Grundlagen  
einer Statistik des Straßenverkehrs  
Techn. und volkswirtsch. Berichte  
des Wirtschafts- und Verkehrs-  
ministeriums NW, Nr. 30, 1954
- [25] Korte, J.W., Leutzbach, W.,  
Mäcke, P.A.                                    Zur Frage des Überholens im  
Straßenverkehr  
Straße und Autobahn, Heft 8/1955
- [26] Leutzbach, W., Egert, Ph.                Overtaking in Free Traffic  
Proceedings of the Second Inter-  
national Symposium on the Theory  
of Traffic Flow, Paris 1965
- [27] -    Baubeschreibungen, Gewichts Berech-  
nungen und Konstruktionszeichnungen  
für MS Typ IV Johann Welker  
Schriftenreihe des Zentralvereins  
f. deutsche Binnenschifffahrt Heft 60
- [28] Arbeitsgemeinschaft der  
Rheinschifffahrt e.V.                        Stellungnahme der Arbeitsgemein-  
schaft der Rheinschifffahrt zur  
derzeitigen wirtschaftlichen  
Lage der Rheinschifffahrt, Duis-  
burg - Ruhrort, Juni 1965

- [29] Fekete, G. Vergleich verschiedener Binnenwasserstraßen aufgrund der möglichen Tragfähigkeitsausnutzung (TN-Faktor, TK-Faktor)  
Mitteilungen des Franzius-Instituts der TH Hannover, Heft 24/1964
- [30] Speidel, F.W. Erfahrungen und Wünsche eines Schifffahrtstreibenden auf dem Neckar  
Schriftenreihe der IHK Karlsruhe, Bd. 3, 1967
- [31] Mistol, G. Die Leistungsfähigkeit von Fluss- und Kanalschleusen  
Die Bautechnik, 10. Jhrg., Heft 16/17
- [32] Poggensee, H. Die Grundformel zur Bestimmung der Schleusenleistung  
Die Wasserwirtschaft, 1954, S. 201
- [33] Seifert, H., Röhnisch, A. Die Leistungsfähigkeit von Schleusen  
Deutsche Berichte zum XVIII Internat. Schifffahrtskongress, Rom 1953
- [34] Oesterhaus, M., Colly, L. Bericht der Schweiz zum XVIII Internat. Schifffahrtskongress, Rom 1953
- [35] Leutzbach, W., Koehler, R., Leutwein, B. Generalverkehrsplan NW, Schiffsbewegungsstatistik, 1967
- [36] Leutzbach, W., Lenz, K.-H. Wartezeiten an Schleusen  
Transportation Research, Vol. 1, No 4, New York 1968
- [37] Saaty, T.L. Elements of Queueing Theory  
Mc. Graw-Hill Book Company, New York 1961
- [38] Lenz, K.-H. Die Warteschlangentheorie und ihre Anwendung auf den Verkehr an Schleusen  
Schriftenreihe der IHK Karlsruhe, Band 3, 1967
- [39] Leutzbach, W., Koehler, R., Leutwein, B. Generalverkehrsplan NW, Systemanalyse Binnenwasserstraßen - Betriebsablauf 1966/67

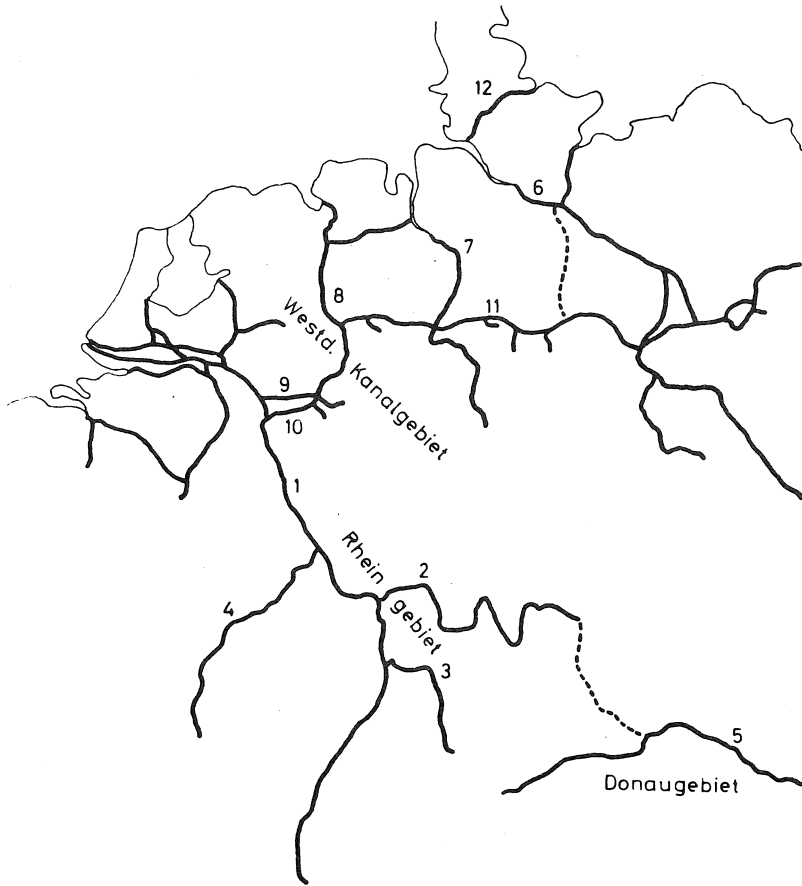
- [40] Dietrichs, E. Die Zeitdauer zur Überwindung des Höhenunterschiedes an Schiffshebeanlagen  
Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden, 35 (1966), Heft 1
- [41] Seidel, H.-P. Erläuterungen zu den graphischen Fahrplänen für die Teilstrecke Nürnberg-Kelheim des Main-Donau-Kanals  
unveröffentlicht
- [42] Schade, B. Verkehrsregelung auf dem Nord-Ostsee-Kanal  
Schriftenreihe der IHK Karlsruhe Band 3, 1967
- [43] Hoffmann, G. Die Auswirkung von Steigungsstrecken auf den Verkehrsablauf auf Autobahnen  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 63, 1967







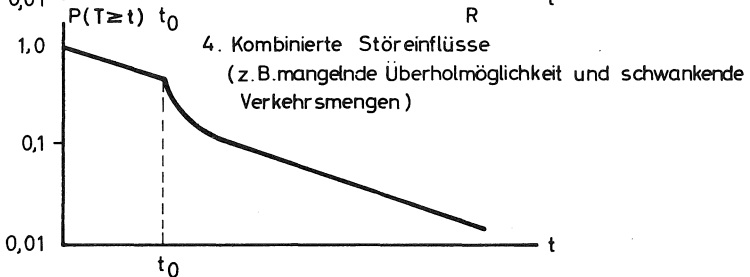
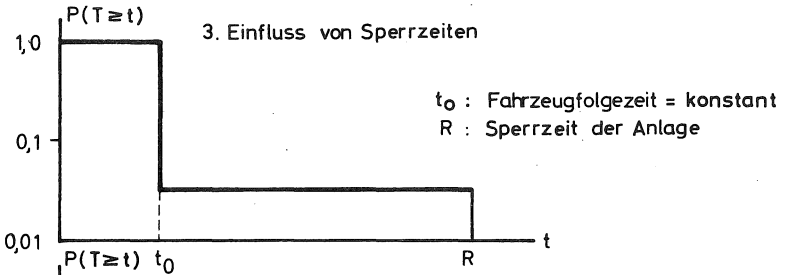
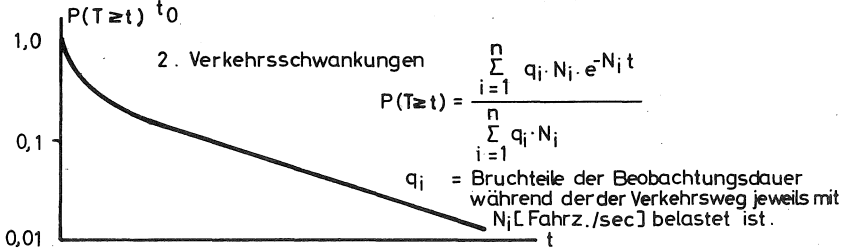
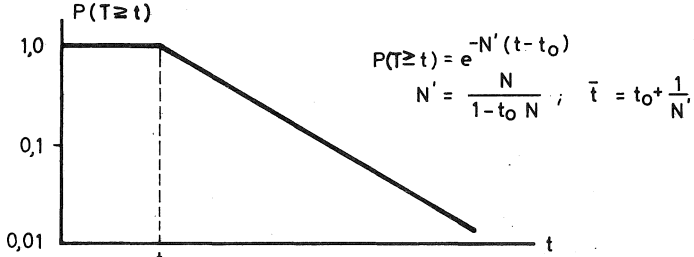
# MITTELEUROPÄISCHES WASSERSTRASSENNETZ



- |          |                           |
|----------|---------------------------|
| 1 Rhein  | 7 Weser                   |
| 2 Main   | 8 Dortmund - Ems - Kanal  |
| 3 Neckar | 9 Wesel - Datteln - Kanal |
| 4 Mosel  | 10 Rhein - Herne - Kanal  |
| 5 Donau  | 11 Mittellandkanal        |
| 6 Elbe   | 12 Nord - Ostsee - Kanal  |

# GESTÖRTE ZEITLÜCKENVERTEILUNGEN

## 1. Mangelnde Überholmöglichkeit



Quelle [17]



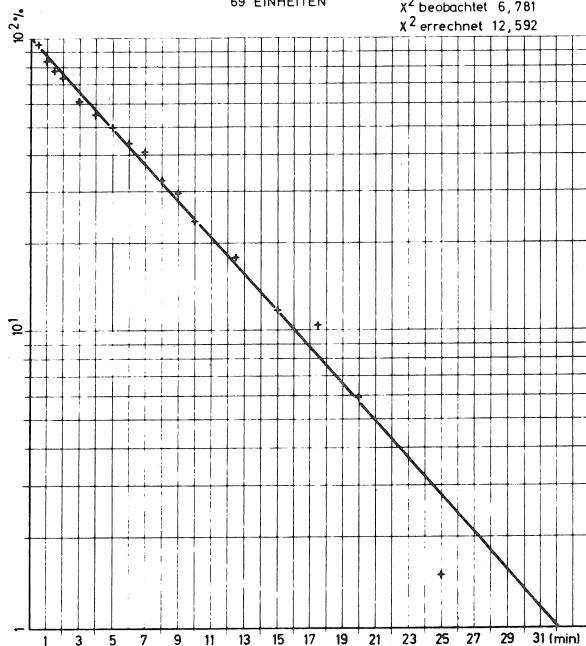
ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 13. 4. 1962 VON 9<sup>30</sup> - 17<sup>30</sup> UHR

BERGFAHRT

69 EINHEITEN

$\chi^2$  beobachtet 6,781  
 $\chi^2$  errechnet 12,592



3

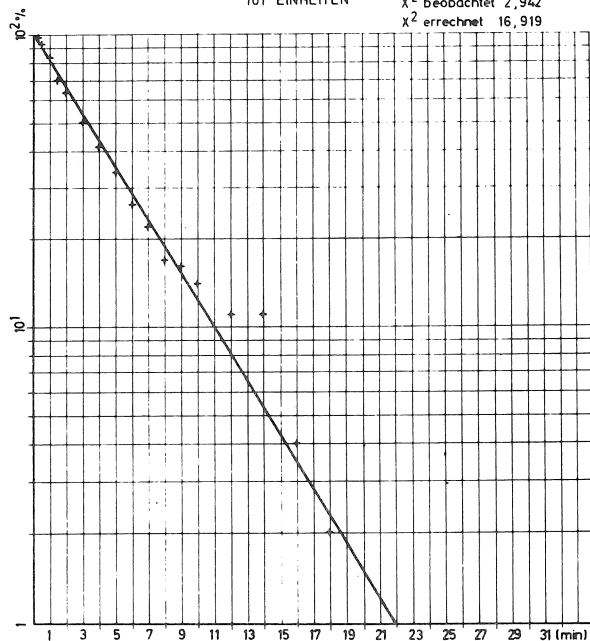
ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 13. 4. 1962 VON 9<sup>30</sup> - 17<sup>30</sup> UHR

TALFAHRT

101 EINHEITEN

$\chi^2$  beobachtet 2,942  
 $\chi^2$  errechnet 16,919



4

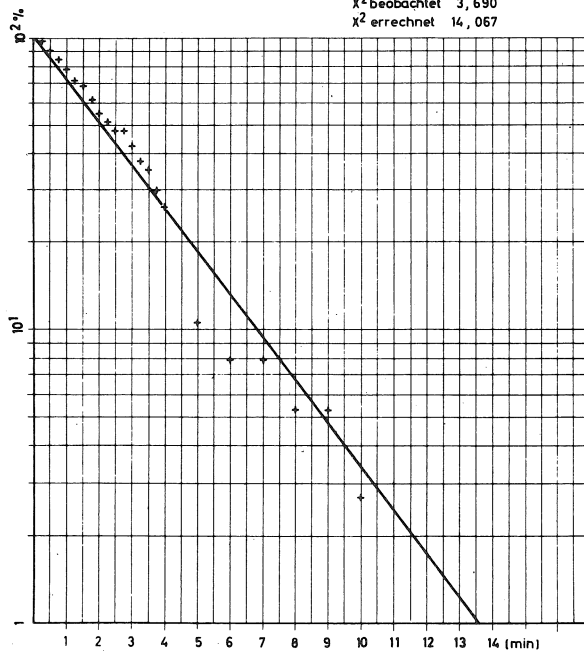
ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 16. 5. 1962 VON 12<sup>15</sup> - 14<sup>15</sup> UHR

BERGFAHRT

38 EINHEITEN

$\chi^2$  beobachtet 3,690  
 $\chi^2$  errechnet 14,067



5

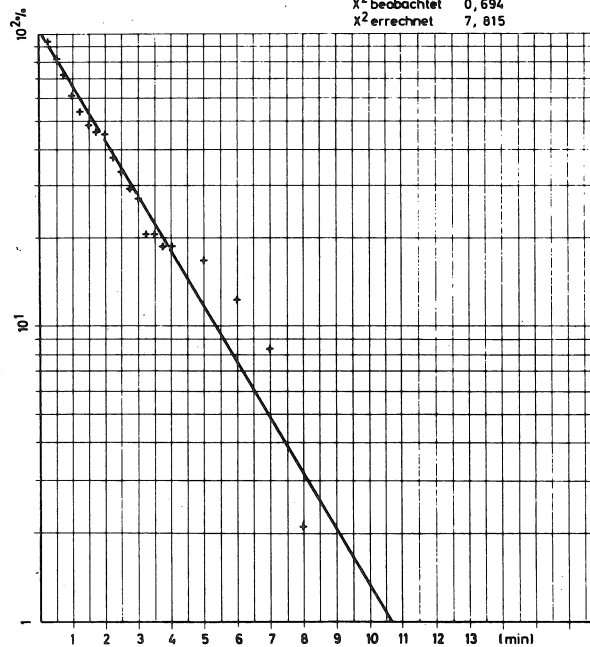
ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 16. 5. 1962 VON 12<sup>15</sup> - 14<sup>15</sup> UHR

TALFAHRT

48 EINHEITEN

$\chi^2$  beobachtet 0,694  
 $\chi^2$  errechnet 7,815



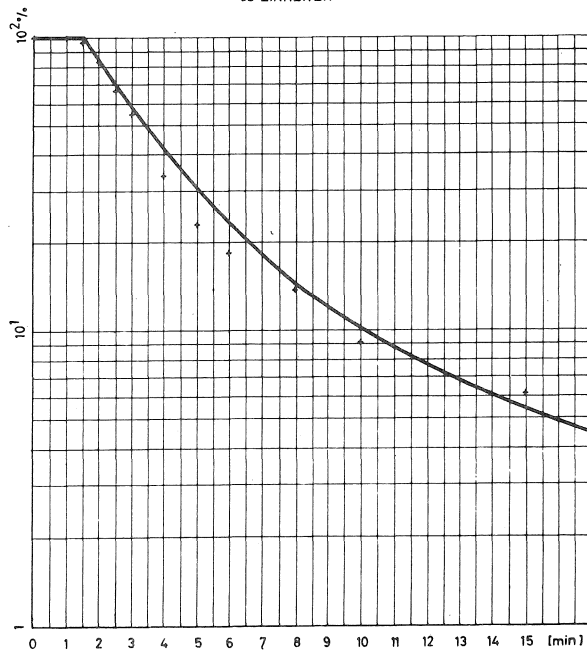
6

ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 18.10.1962 VON 11<sup>04</sup> - 18<sup>04</sup> UHR

BERGFAHRT

65 EINHEITEN



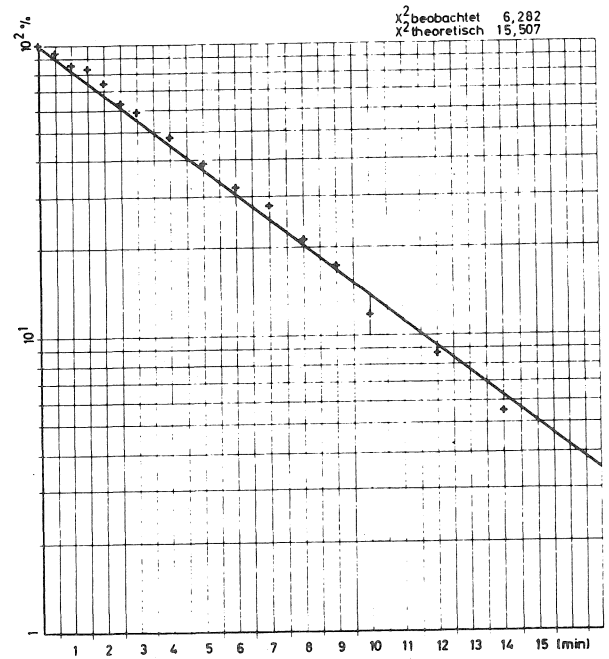
7

ZEITLÜCKENMESSUNG AM FREIEN STROM

AM 3. JULI 1963 VON 10<sup>00</sup> - 18<sup>00</sup> UHR

BERGFAHRT

91 EINHEITEN

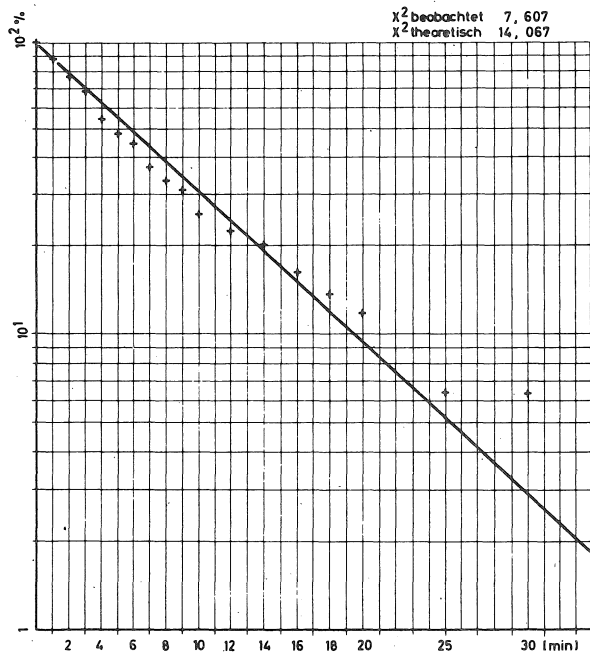


8

ZEITLÜCKENMESSUNG AM KANAL C  
AM 9. MAI 1963 VON 9<sup>30</sup> - 19<sup>30</sup> UHR

BERGFAHRT

65 EINHEITEN

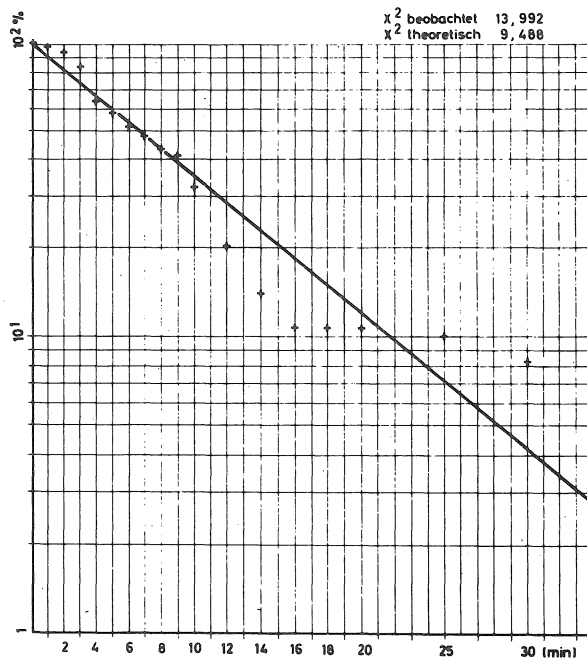


9

ZEITLÜCKENMESSUNG AM KANAL C  
AM 9. MAI 1963 VON 9<sup>30</sup> - 19<sup>30</sup> UHR

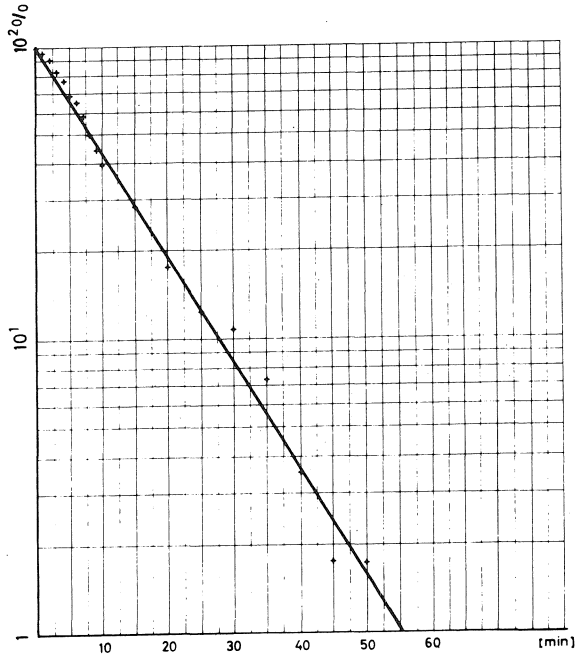
TALFAHRT

60 EINHEITEN



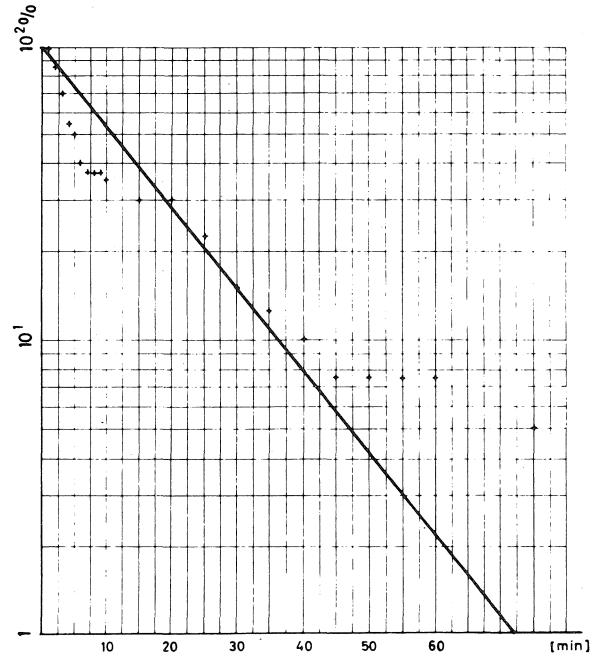
10

ZEITLÜCKENVERTEILUNG DER SCHIFFSANKÜNFTE IM UNTERWASSER DER  
SCHLEUSE 1 DES KANALS A, ZUFAHRT VOM FREIEN STROM  
61 EINHEITEN



11

ZEITLÜCKENVERTEILUNG DER SCHIFFSANKÜNFTE IM OBERWASSER DER  
SCHLEUSE 1 DES KANALS A, ZUFAHRT VON DER SCHLEUSE 2  
38 EINHEITEN



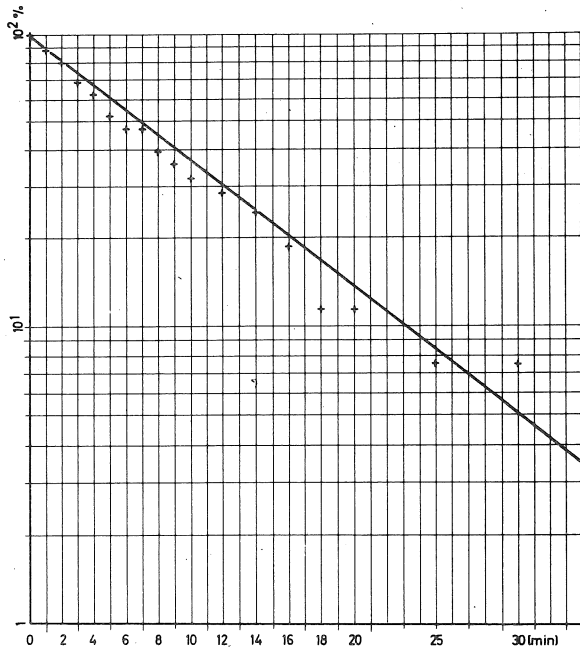
12

ZEITLÜCKENMESSUNG AM FLUSS N

20. 6. 1963 VON 8<sup>00</sup> - 17<sup>30</sup> UHR

BERGFAHRT

53 EINHEITEN



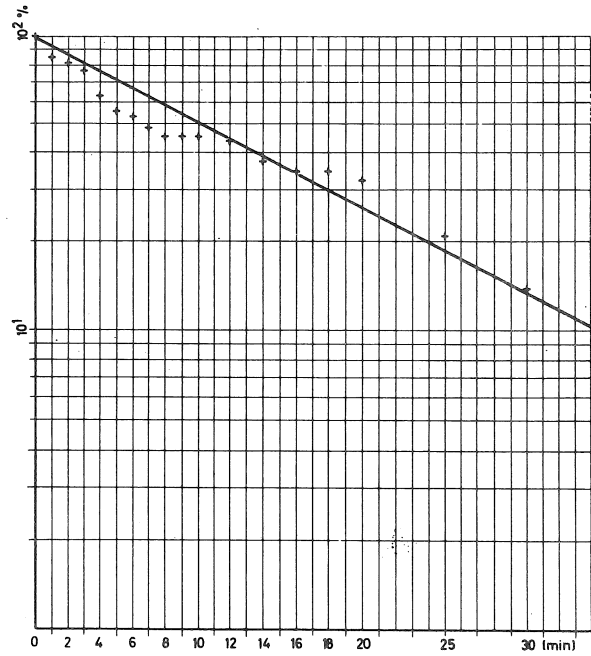
13

ZEITLÜCKENMESSUNG AM FLUSS N

AM 20. 6. 1963 VON 8<sup>00</sup> - 19<sup>00</sup> UHR

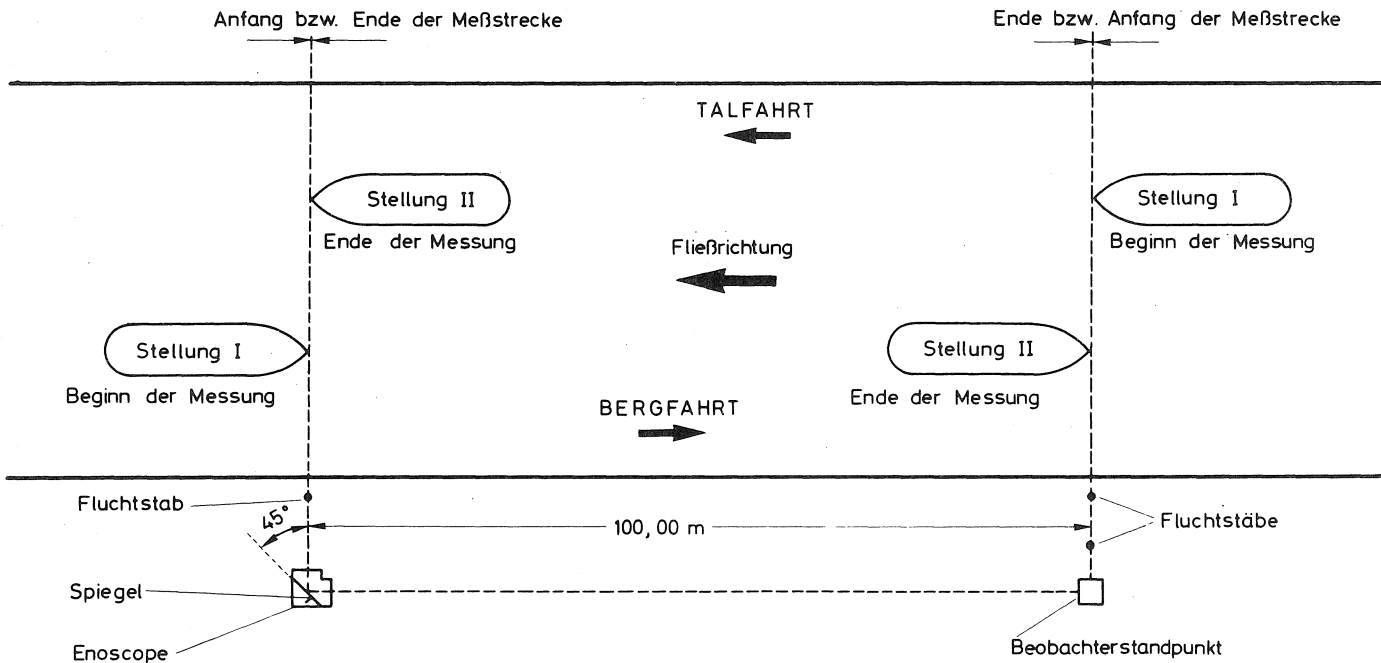
TALFAHRT

43 EINHEITEN



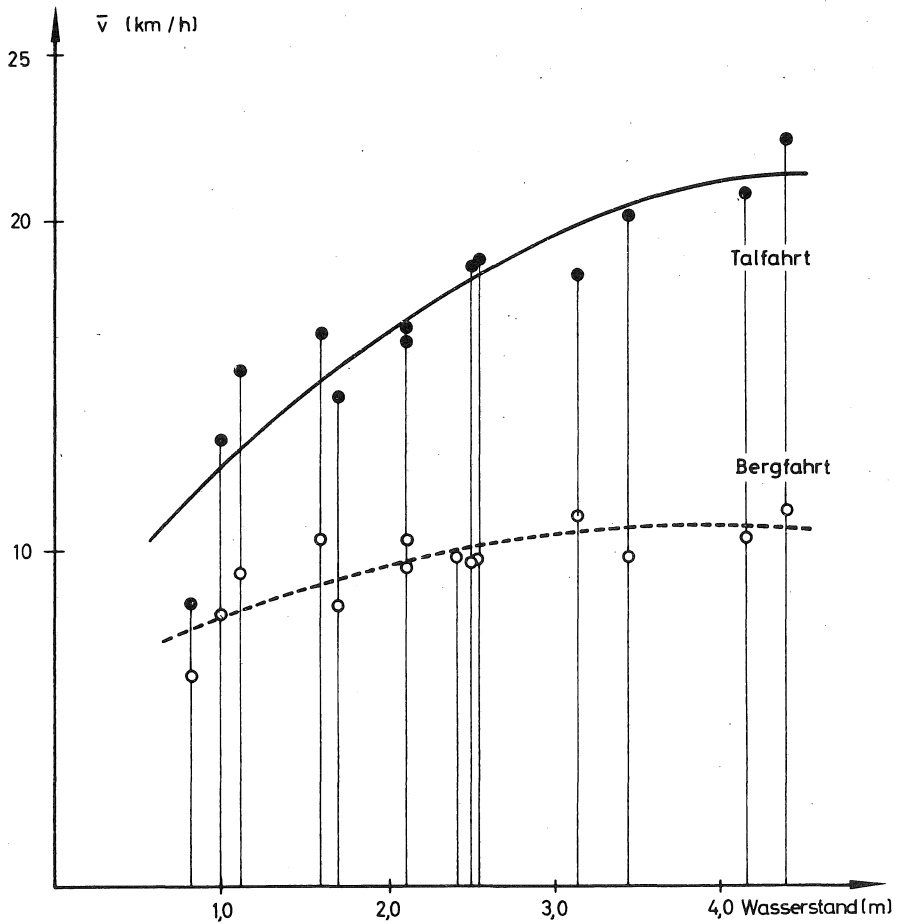
14

# ANORDNUNG FÜR GESCHWINDIGKEITSMESSUNG



# GESCHWINDIGKEITSMESSUNG AM FREIEN STROM

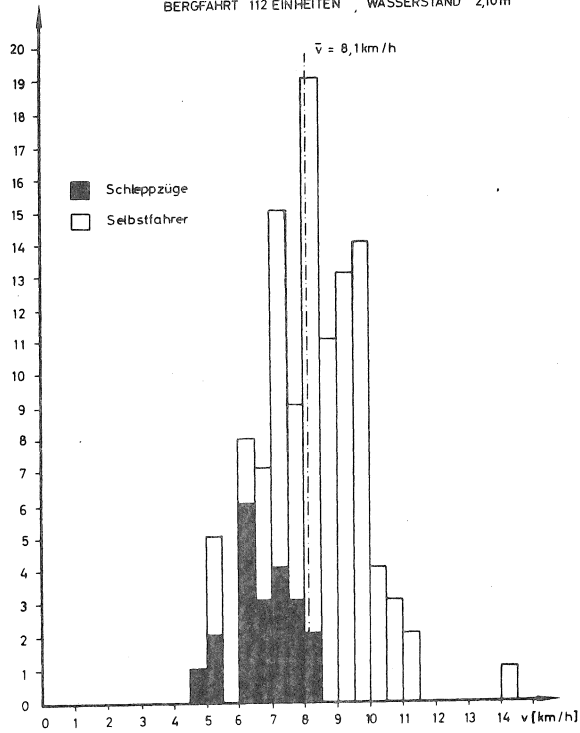
Abhängigkeit zwischen Wasserstand und mittlerer Geschwindigkeit





GESCHWINDIGKEITSMESSUNG AM FREIEN STROM

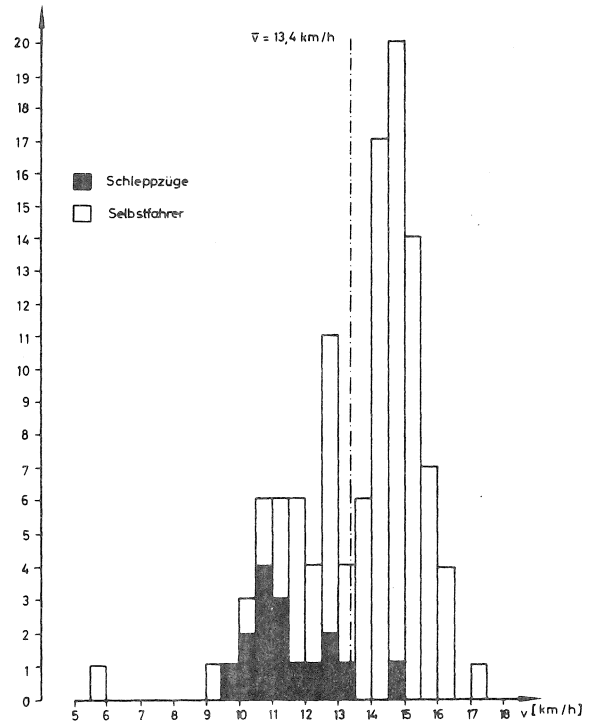
BERGFAHRT 112 EINHEITEN , WASSERSTAND 2,10m



17

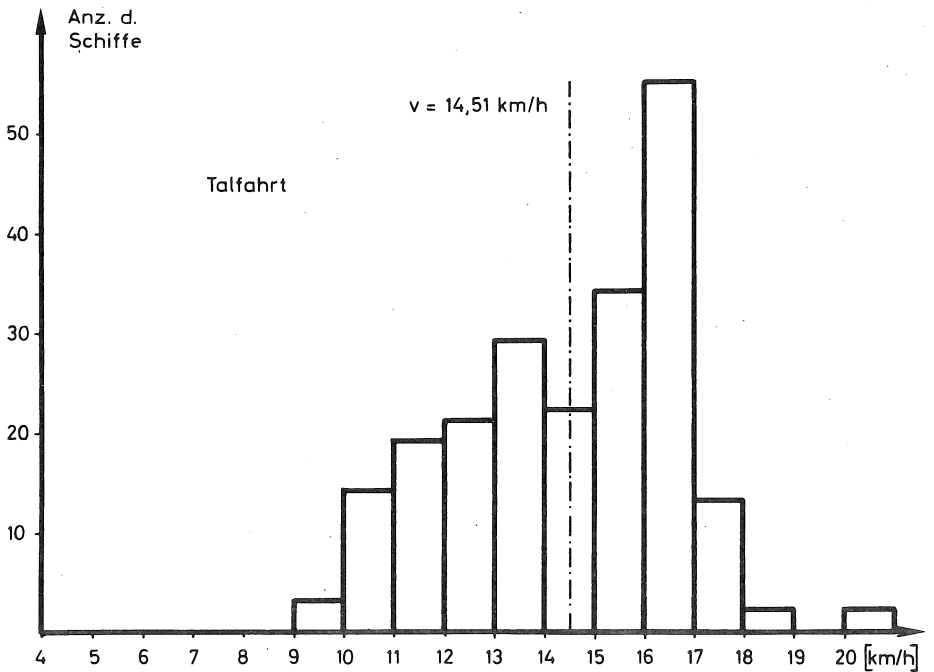
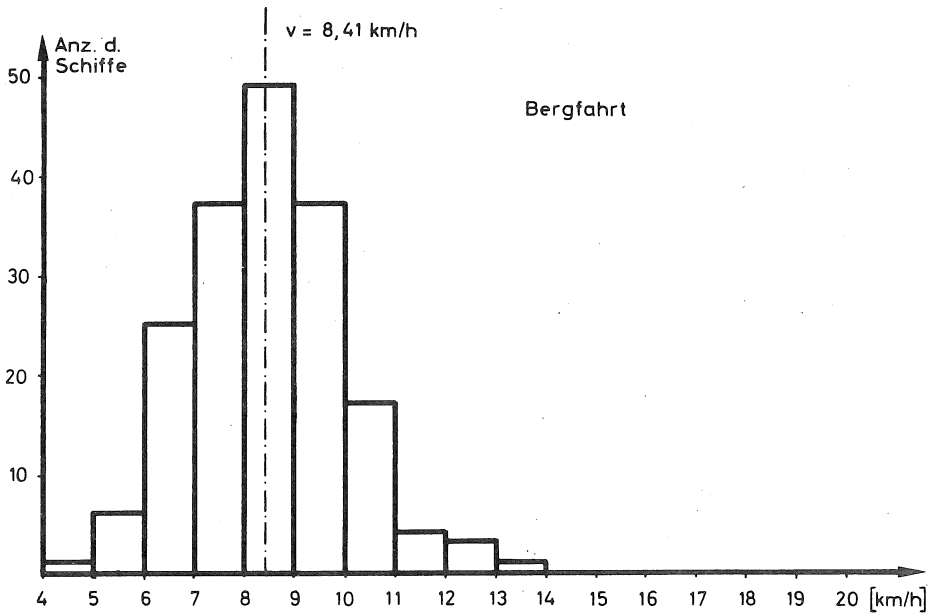
GESCHWINDIGKEITSMESSUNG AM FREIEN STROM

TALFAHRT 112 EINHEITEN , WASSERSTAND 2,10m



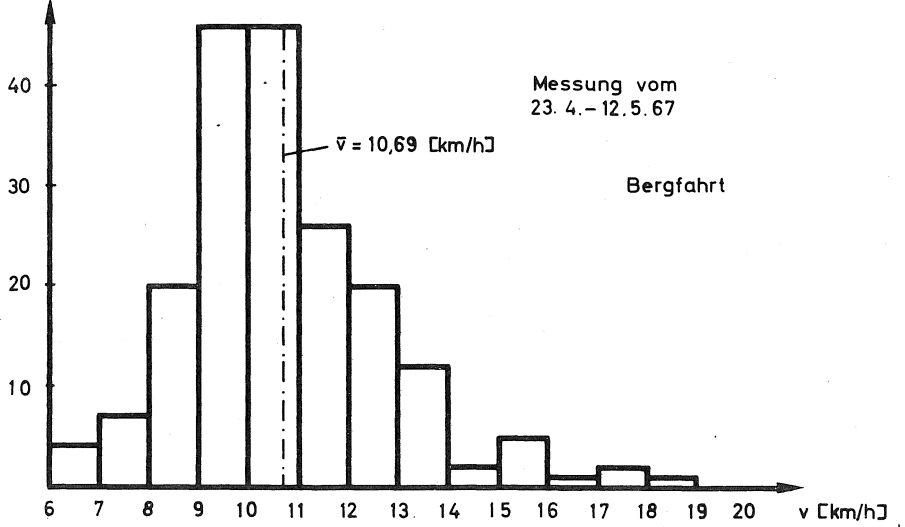
18

# GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG AM FLUSS N

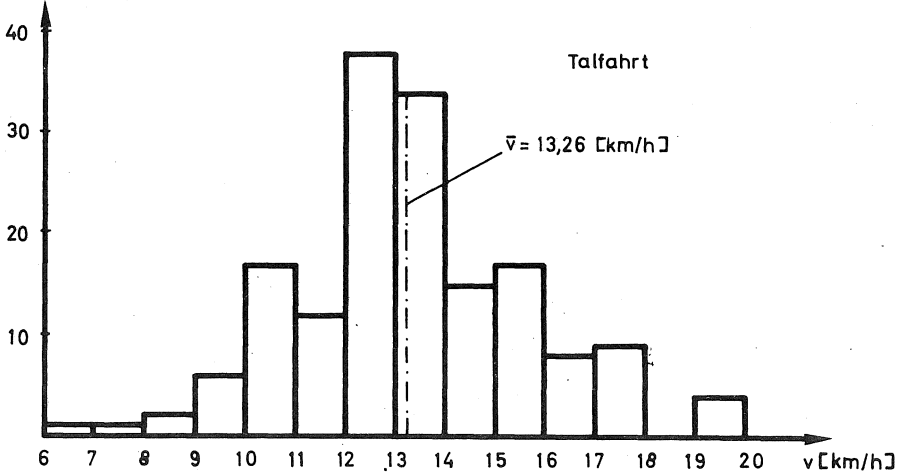


Anz. d.  
Schiffe

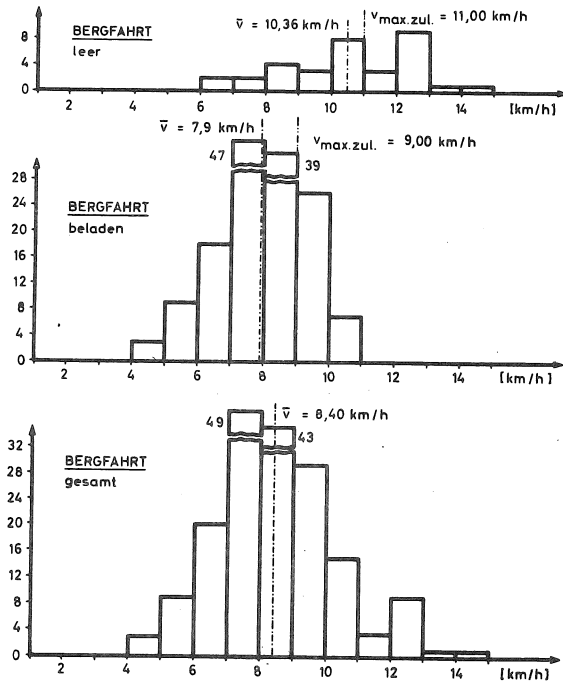
### HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEITEN AN DER MESSTELLE P, FLUSS M, HALTUNG 5



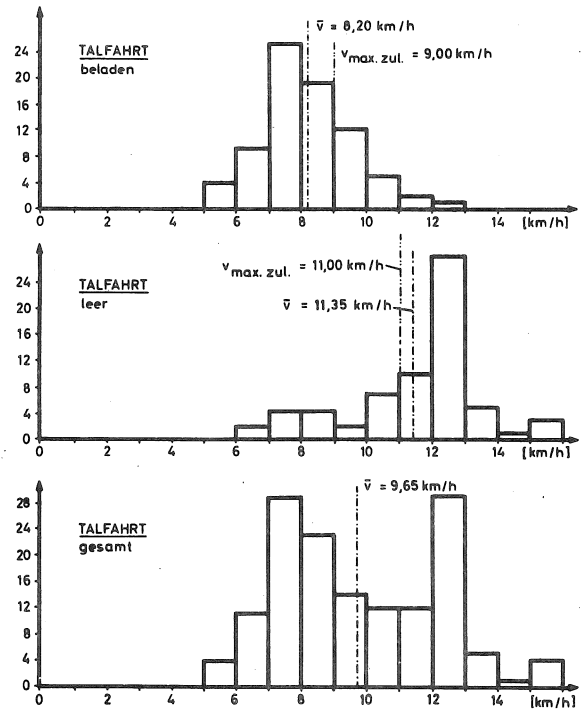
Anz. d.  
Schiffe



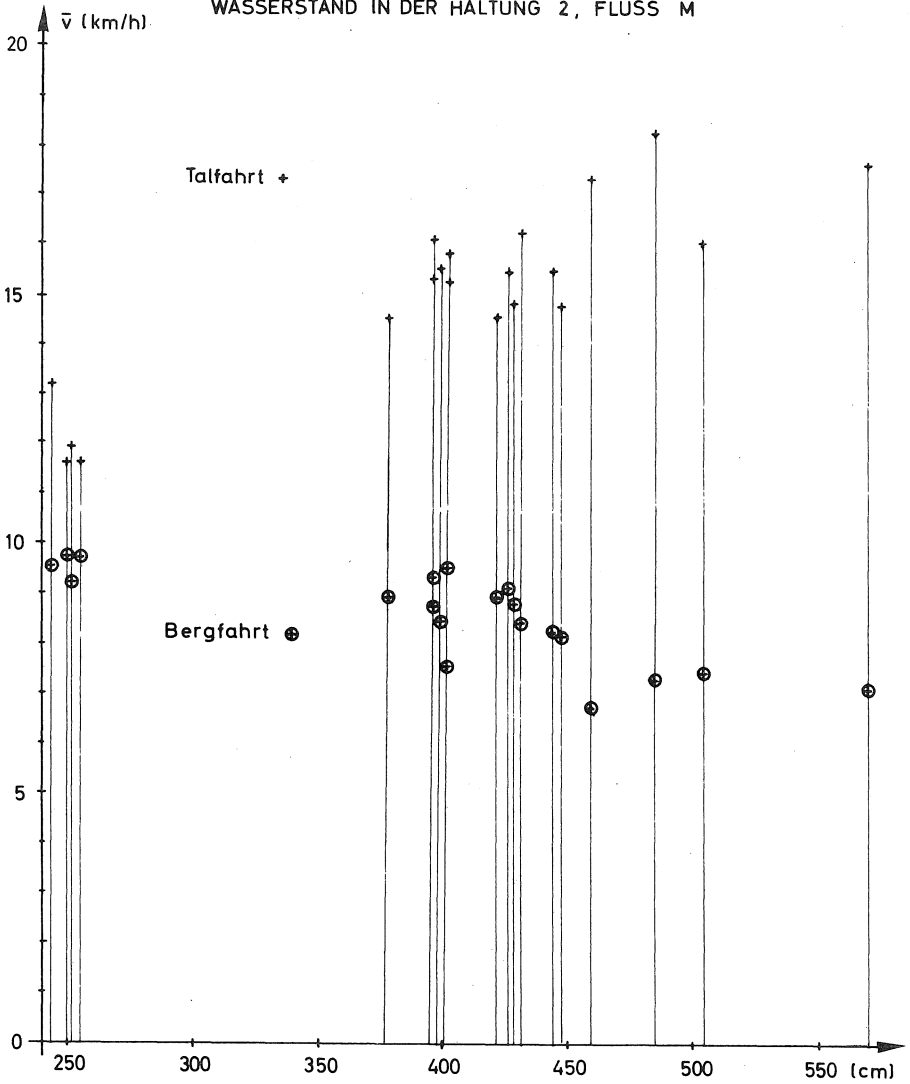
HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEITEN AM KANAL A



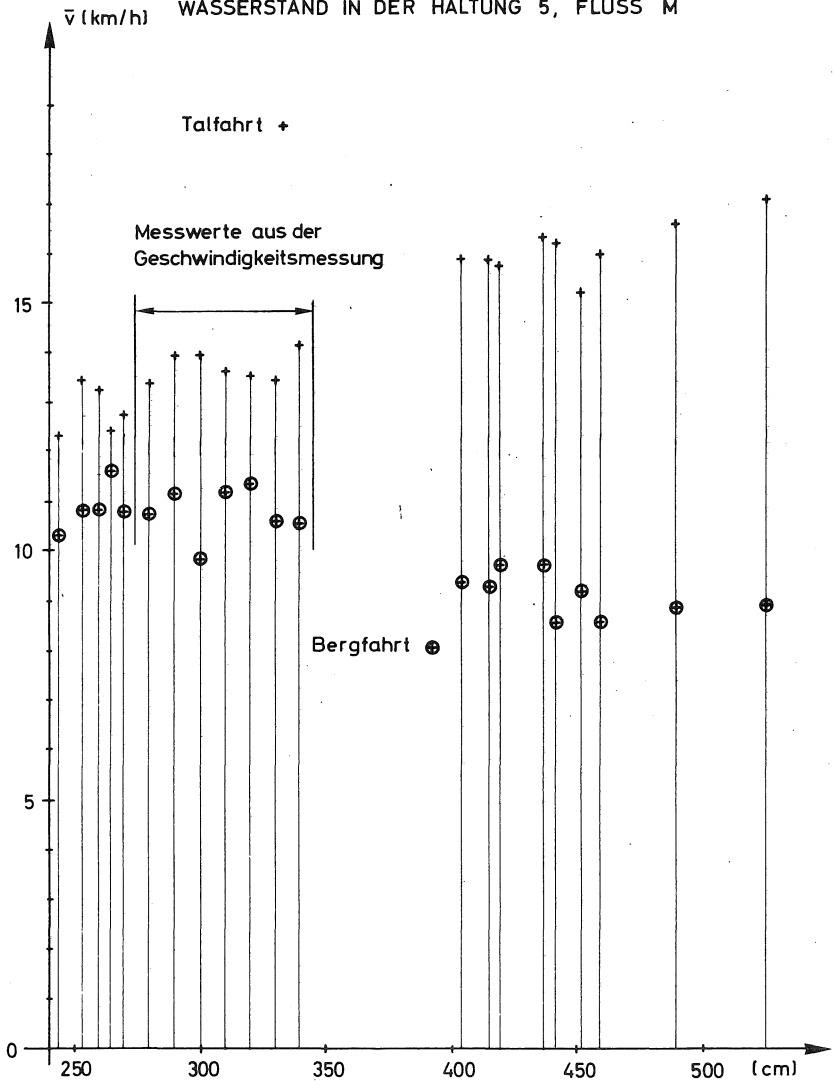
HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER GESCHWINDIGKEITEN AM KANAL A



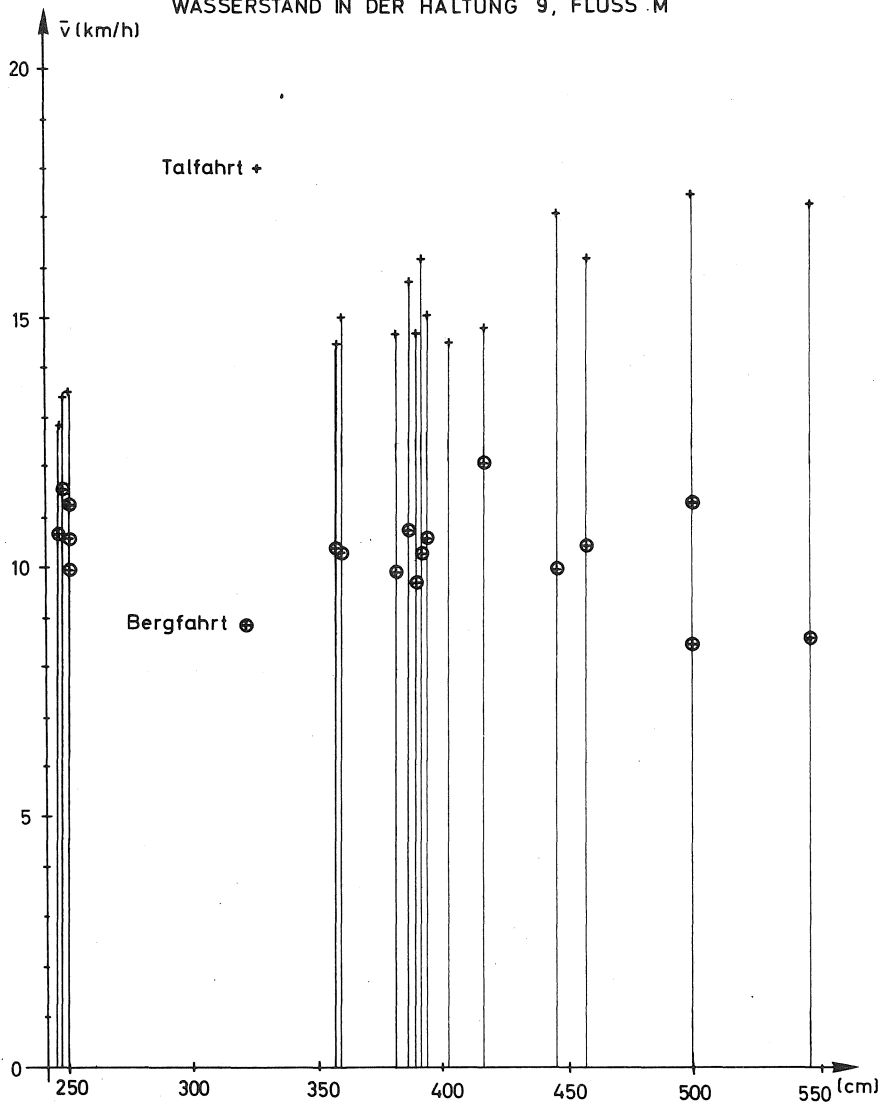
MITTLERE GESCHWINDIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM  
WASSERSTAND IN DER HALTUNG 2, FLUSS M



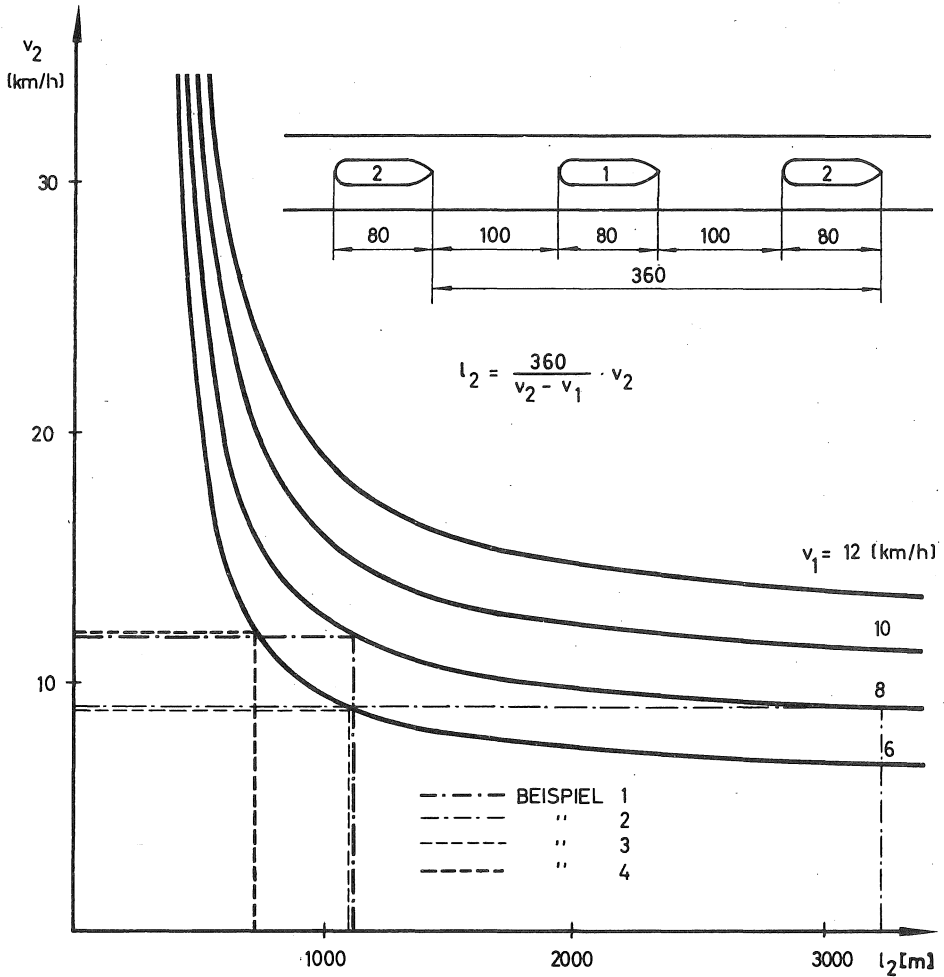
MITTLERE GESCHWINDIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM  
WASSERSTAND IN DER HALTUNG 5, FLUSS M



MITTLERE GESCHWINDIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM  
WASSERSTAND IN DER HALTUNG 9, FLUSS M

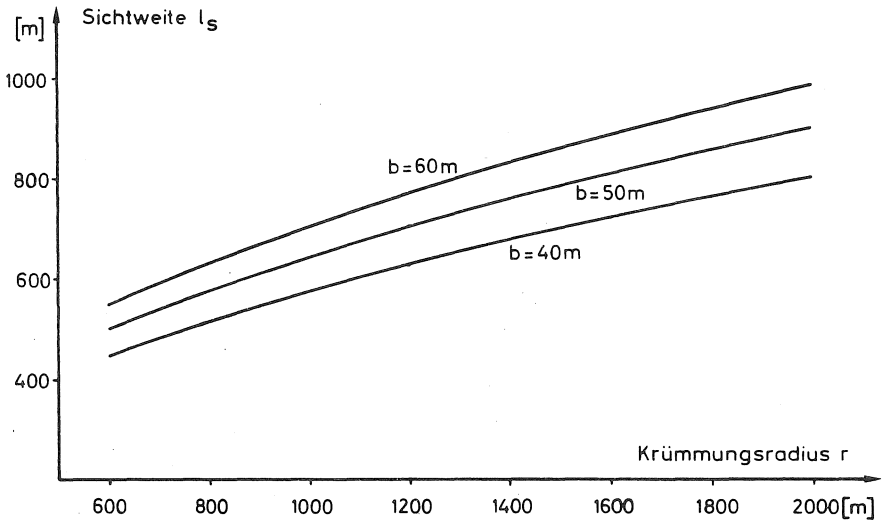
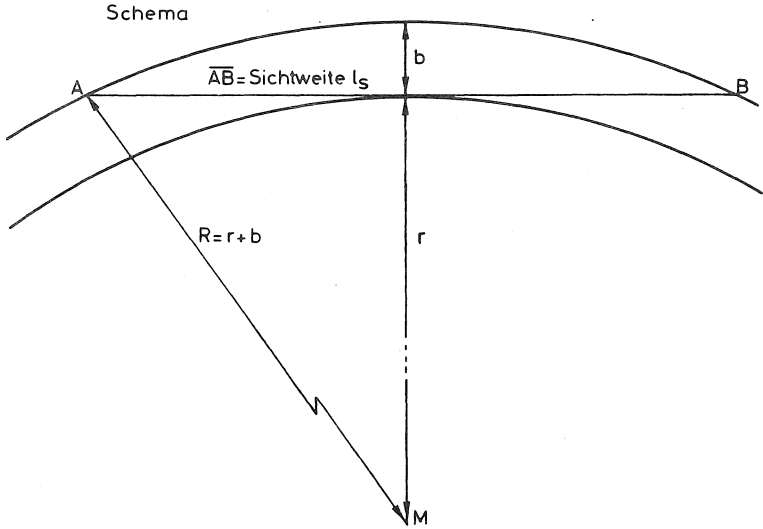


ÜBERHOLWEGE VON SCHIFFEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN  
GESCHWINDIGKEITEN

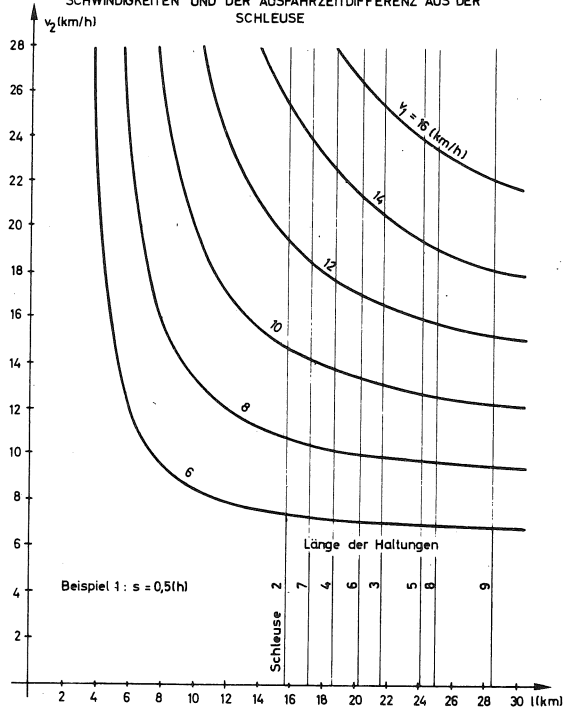




# SICHTWEITEN IN KANALKRÜMMUNGEN

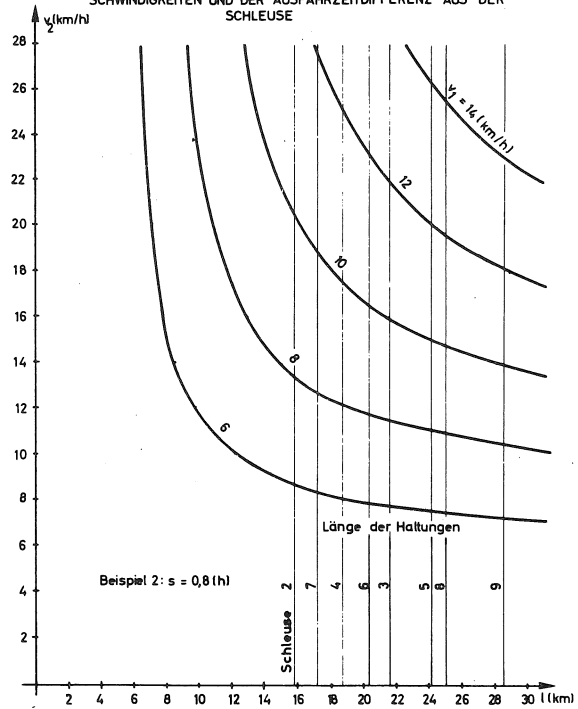


EINHOLWEGE VON SCHIFFEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN GESCHWINDIGKEITEN UND DER AUSFAHRTZEITDIFFERENZ AUS DER SCHLEUSE



28

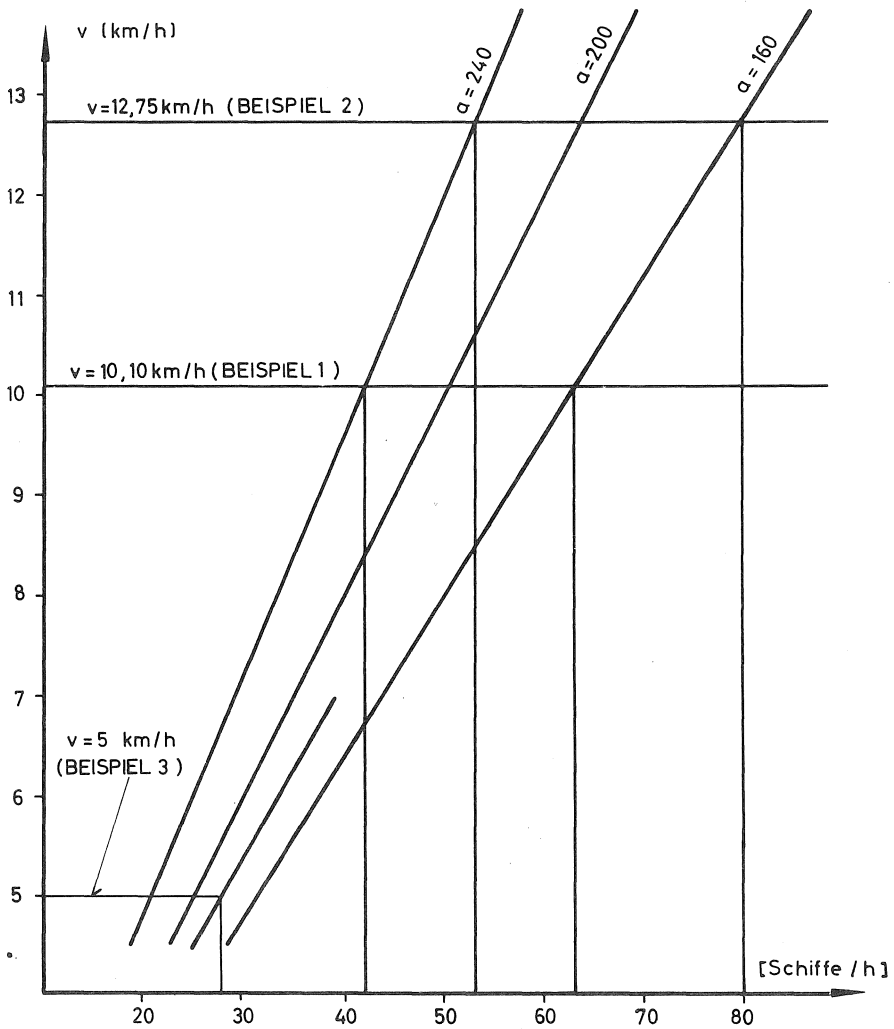
EINHOLWEGE VON SCHIFFEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN GESCHWINDIGKEITEN UND DER AUSFAHRTZEITDIFFERENZ AUS DER SCHLEUSE



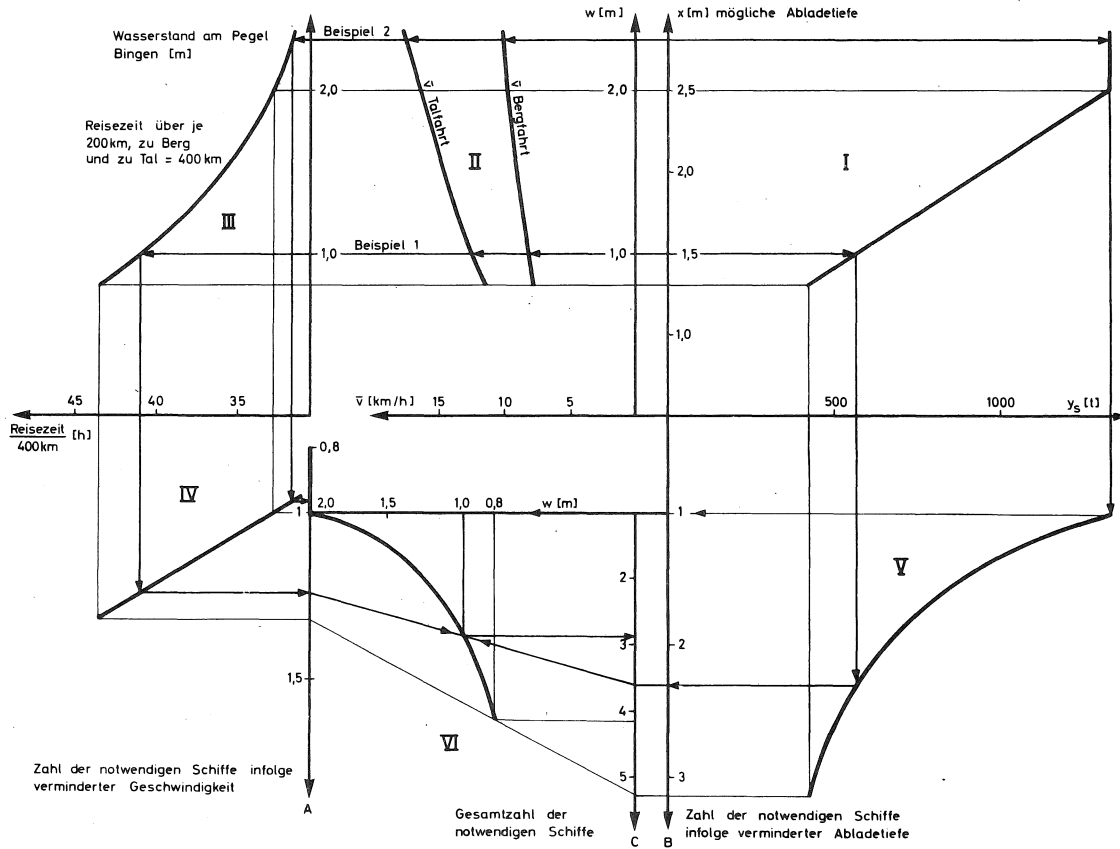
29

LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER FREIEN STRECKE FÜR DIE BRUTTOABSTÄNDE

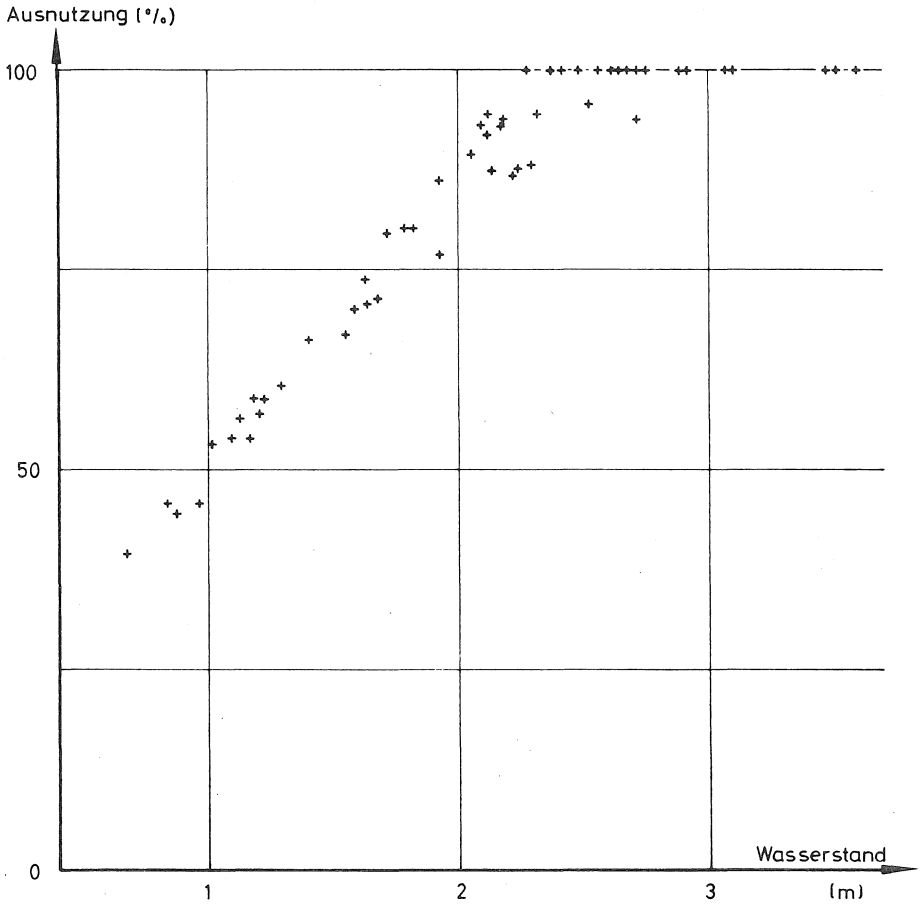
$a = 160, 200, 240$  m BEI EINER SCHIFFSLÄNGE VON  $l = 80$  m



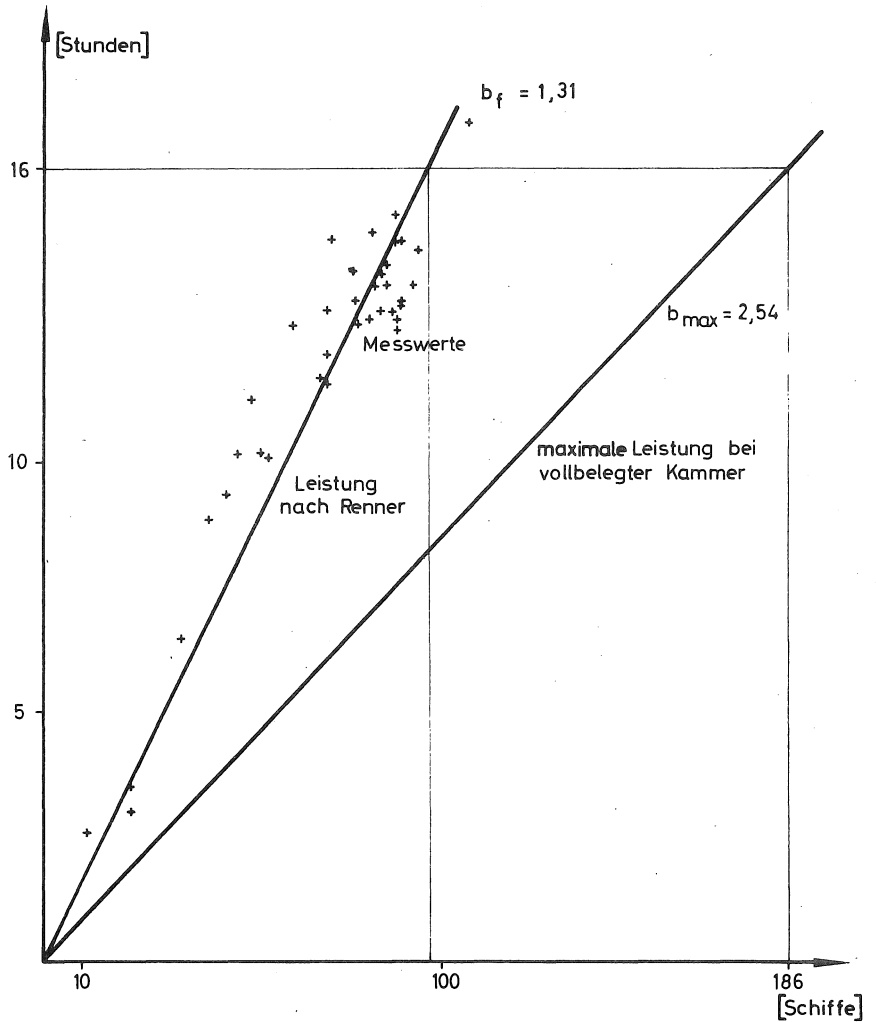
ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WASSERSTAND UND ZAHL DER SCHIFFE, DIE ZUR BEWÄLTIGUNG EINES TRANSPORTVORGANGES ÜBER EINE STRECKE VON 200km, ZU BERG UND ZU TAL = 400 km, NOTWENDIG SIND, DAMIT PRO ZEITEINHEIT DIE GLEICHE GÜTERMENGE AN - BZW. ABTRANSPORTIERT WERDEN KANN



AUSNUTZUNG DES EINZELSCHIFFES AUF EINER NICHT KANALISIERTEN  
WASSERSTRASSE IN % IN ABHÄNGIGKEIT VOM WASSERSTAND

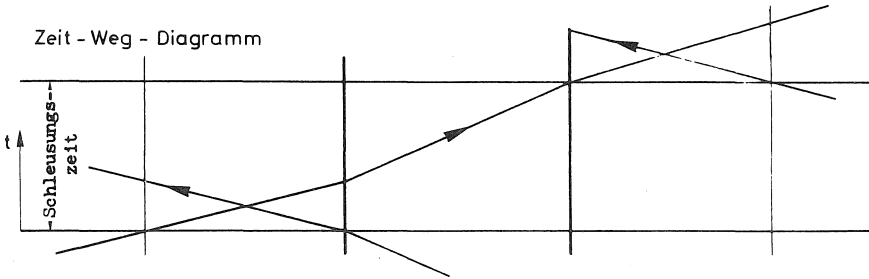
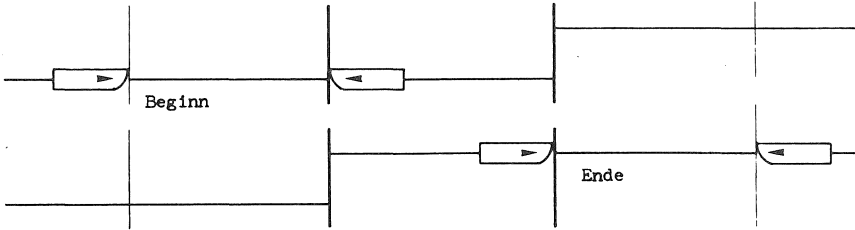


KANAL C SCHLEUSE 1 : VERGLEICH DER LEISTUNG NACH DER FORMEL  
VON RENNER MIT MESSWERTEN UND MAXIMALER LEISTUNG

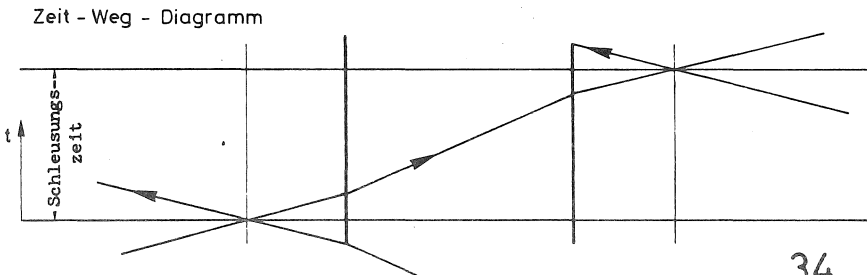
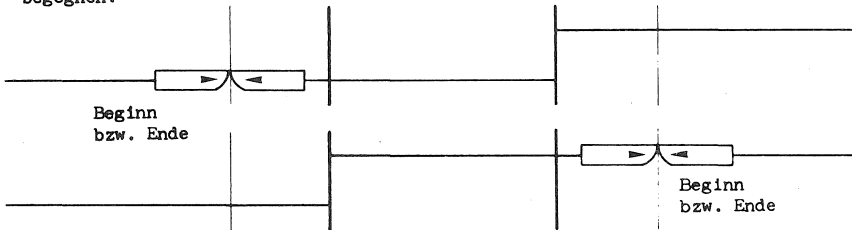


# MESSANORDNUNG ZUR SCHLEUSUNGSZEITBESTIMMUNG

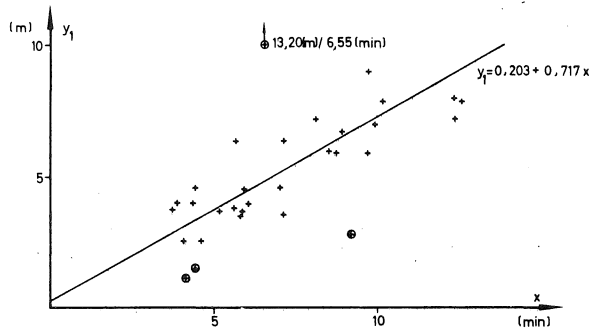
Längsschnitt für die angewandte Messmethode  
 Beginn der Messung, wenn das einfahrende Schiff den "gedachten Querschnitt"  
 durchfährt, und das ausfahrende Schiff die Torlinie passiert.



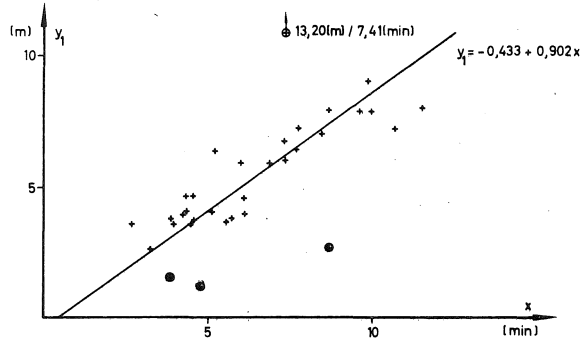
Längsschnitt  
 Beginn bzw. Ende der Messung, wenn Ein- und Ausfahrendes Schiff sich  
 begegnen.



ZUSAMMENHANG ZWISCHEN HUBHÖHE UND FÜLLZEIT

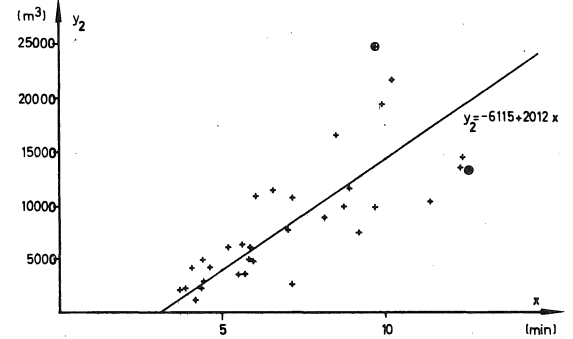


ZUSAMMENHANG ZWISCHEN HUBHÖHE UND LEERUNGSZEIT

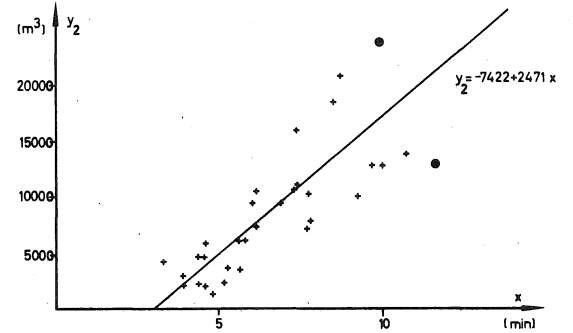


● Werte, die von der theoret. Geraden stark abweichen

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN KAMMERVOLUMEN UND FÜLLZEIT

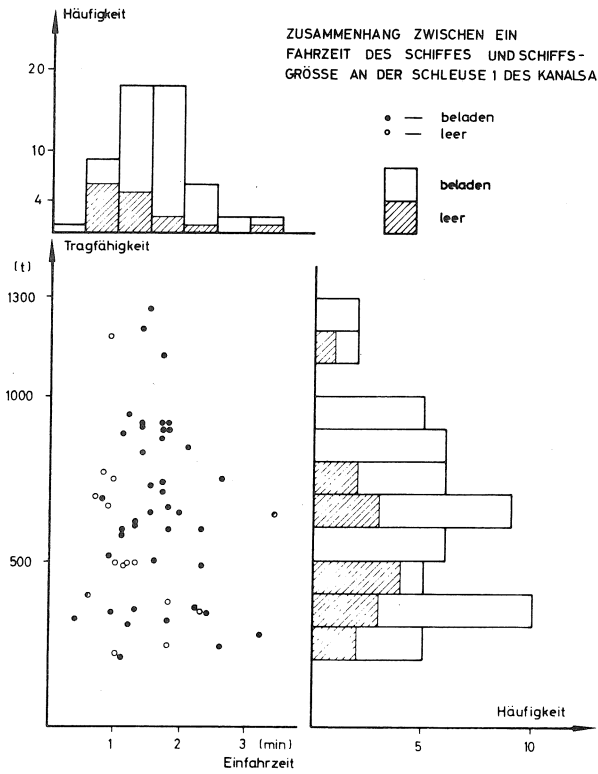


ZUSAMMENHANG ZWISCHEN KAMMERVOLUMEN UND LEERUNGSZEIT

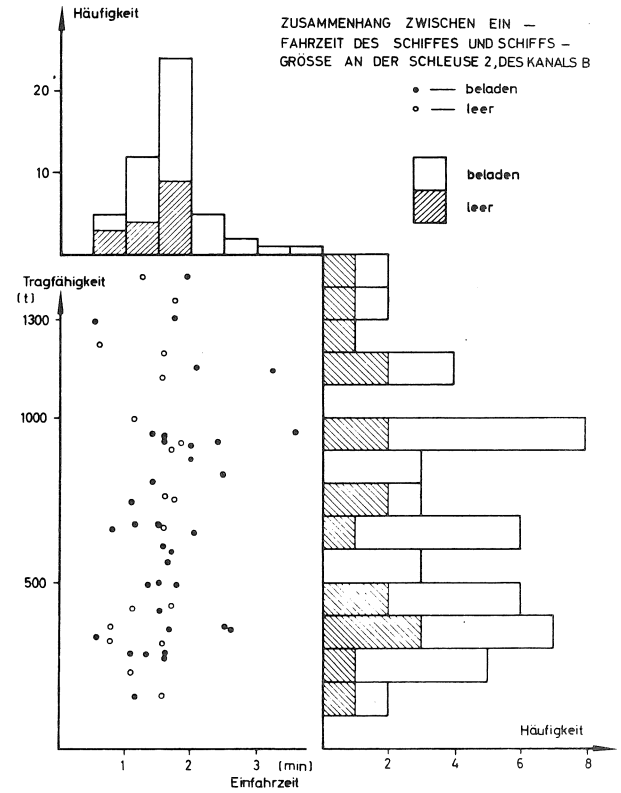


● Werte, die von der theoret. Geraden stark abweichen



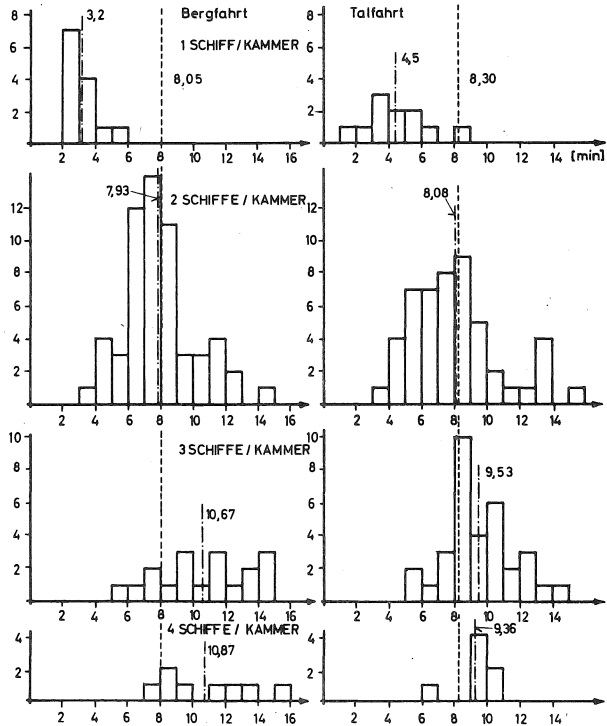


37

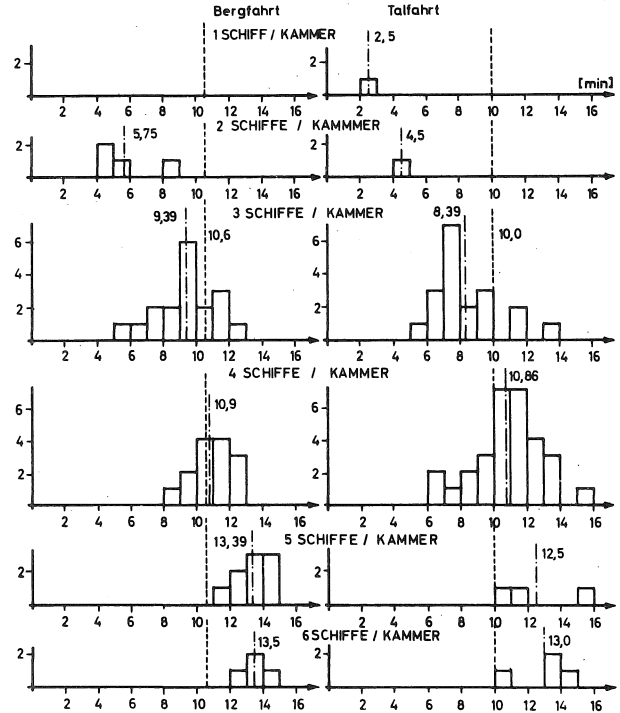


38

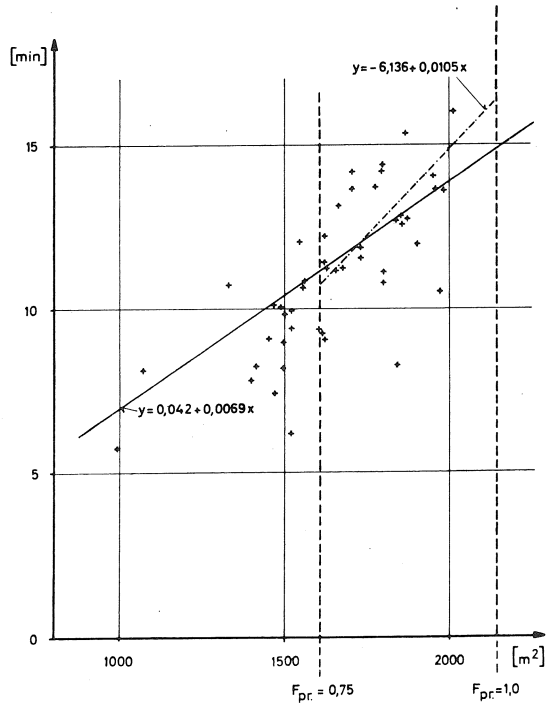
HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER GESAMTEINFAHRZEITEN AM KANAL B IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZAHL DER SCHIFFE / KAMMER



HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER GESAMTEINFAHRZEITEN AM KANAL A IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZAHL DER SCHIFFE / KAMMER

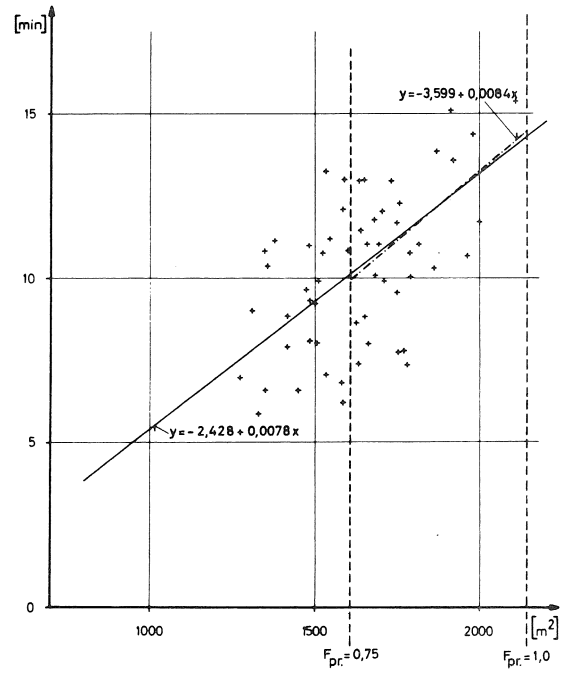


ZUSAMMENHANG ZWISCHEN EINFahrZEIT UND FLÄCHENMÄSSIGER KAMMERBE-  
LEGUNG AM KANAL A IN DER BERGFahrT



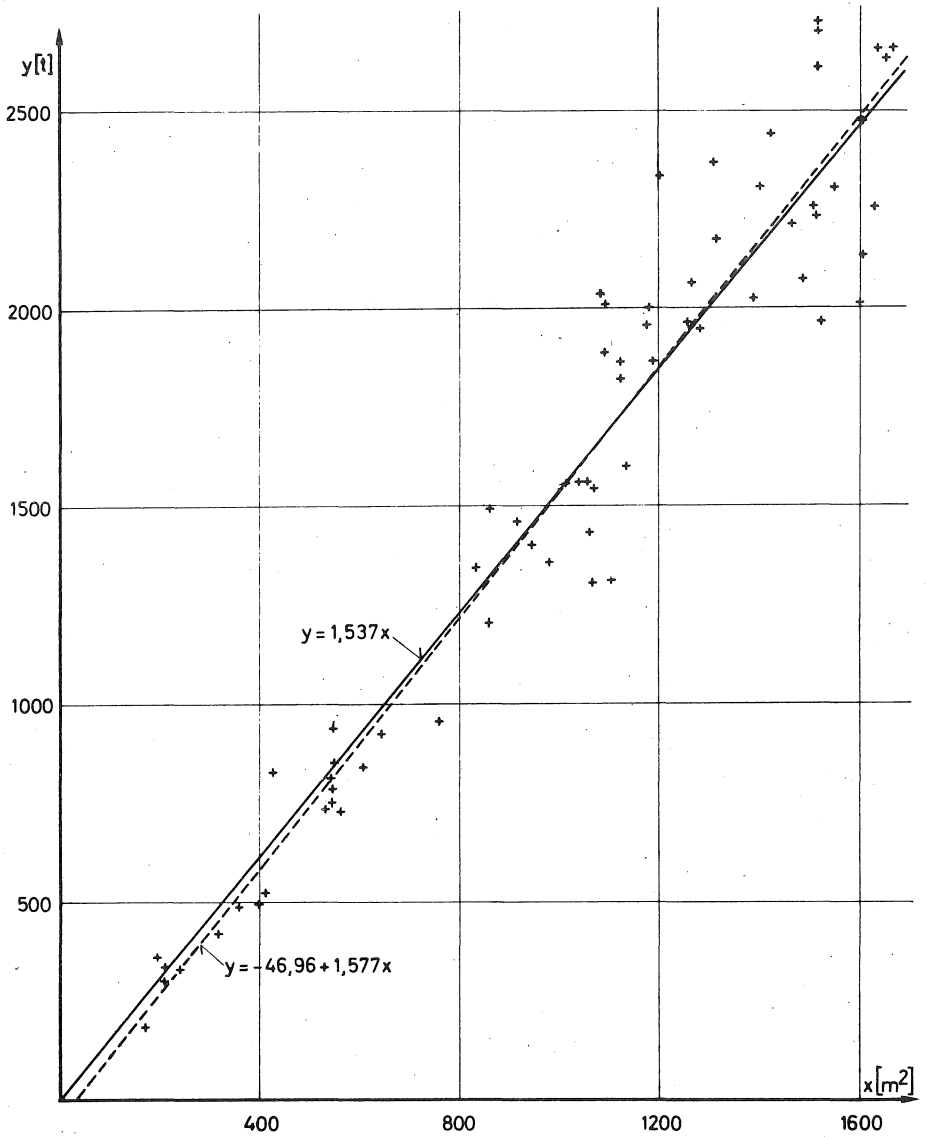
41

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN EINFahrZEIT UND FLÄCHENMÄSSIGER KAMMER-  
BELEGUNG AM KANAL A IN DER TALFAHRT

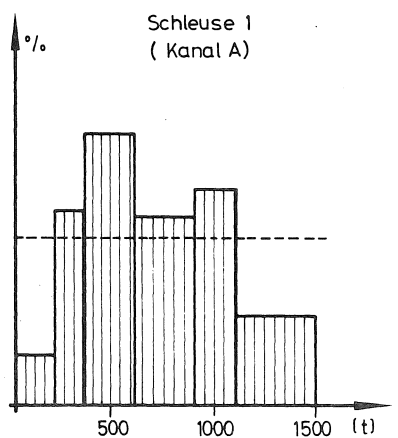
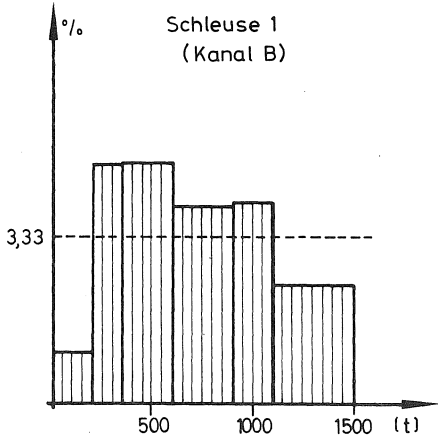
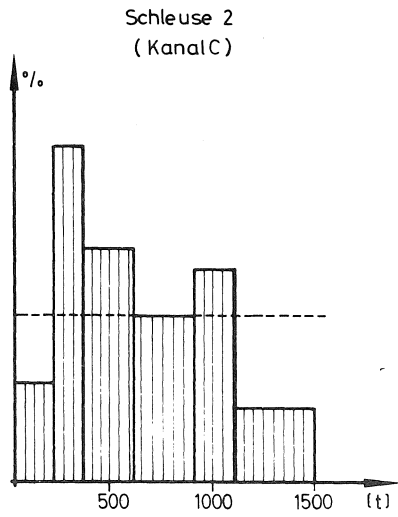
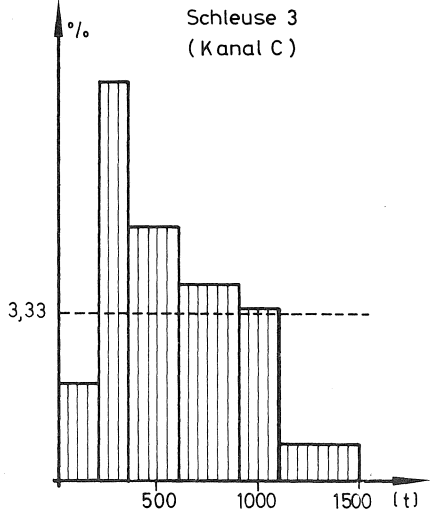


42

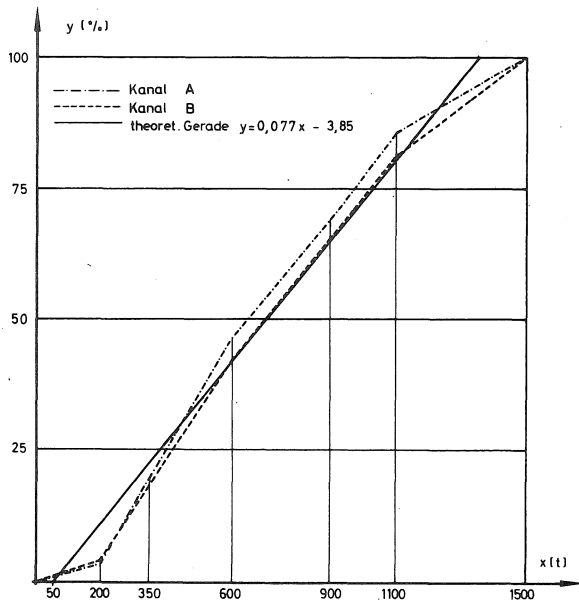
ABHÄNGIGKEIT VON SCHIFFSGRUNDFLÄCHE UND TONNAGE: MESSWERTE  
UND REGRESSIONSGERADEN



RELATIVE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER SCHIFFSGRÖSSEN AN 4 SCHLEUSEN

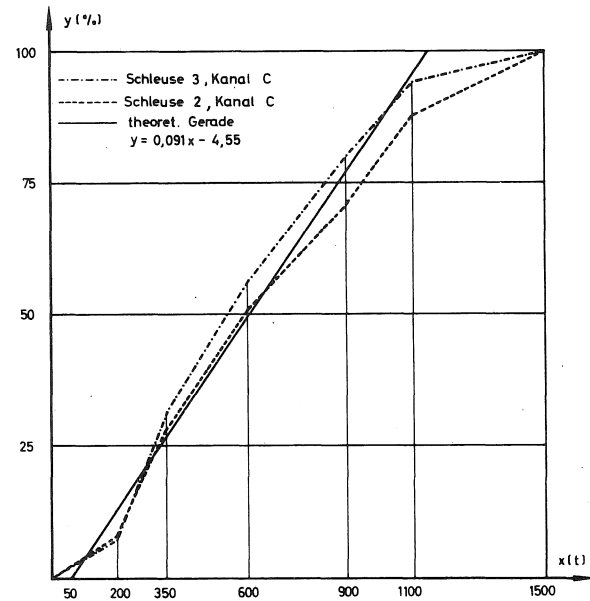


SUMMENVERTEILUNG DER SCHIFFSGRÖSSEN  
AM KANAL A UND B



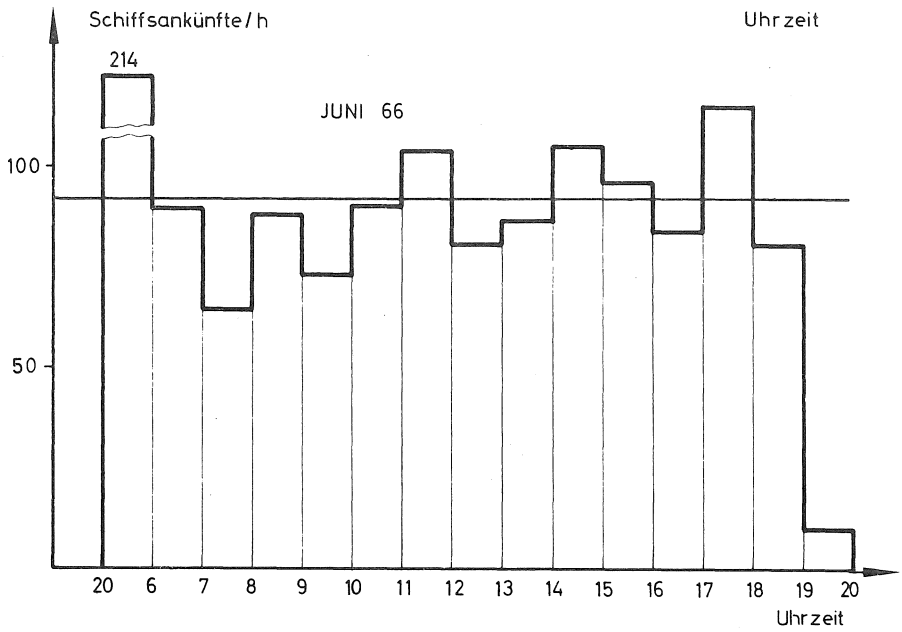
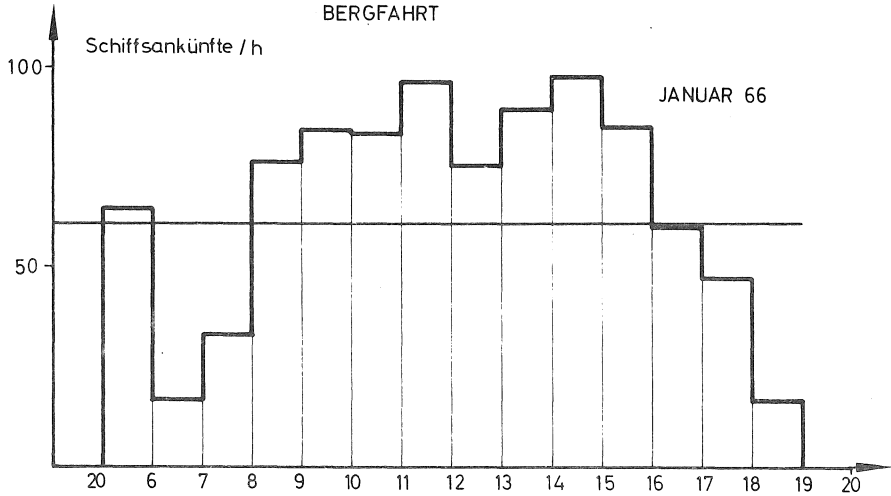
45

SUMMENVERTEILUNG DER SCHIFFSGRÖSSEN AM KANAL C

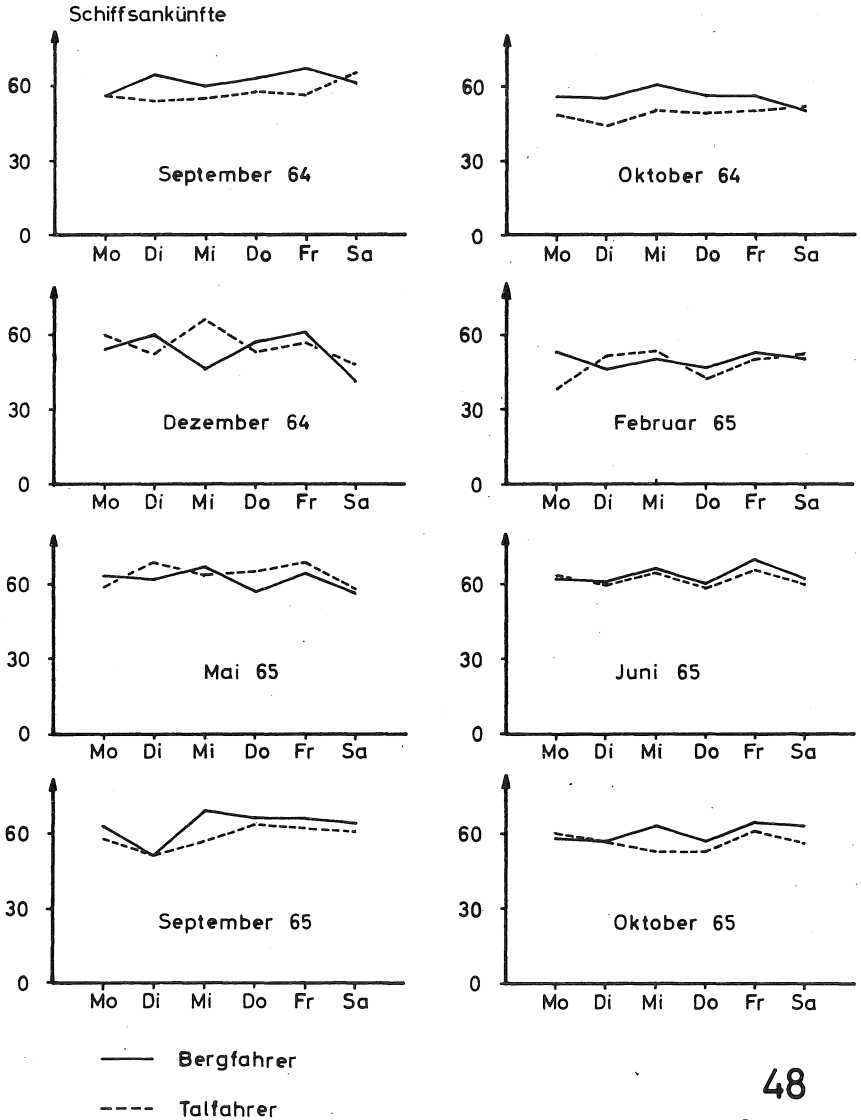


46

GANGLINE DER SCHIFFSANKÜNFTEN AN DER SCHLEUSE 1, KANAL A IN DER BERGFAHRT

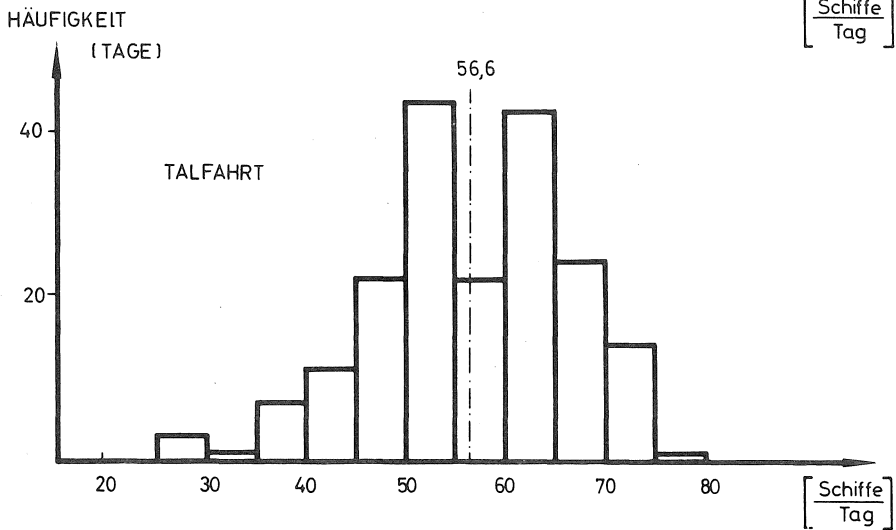
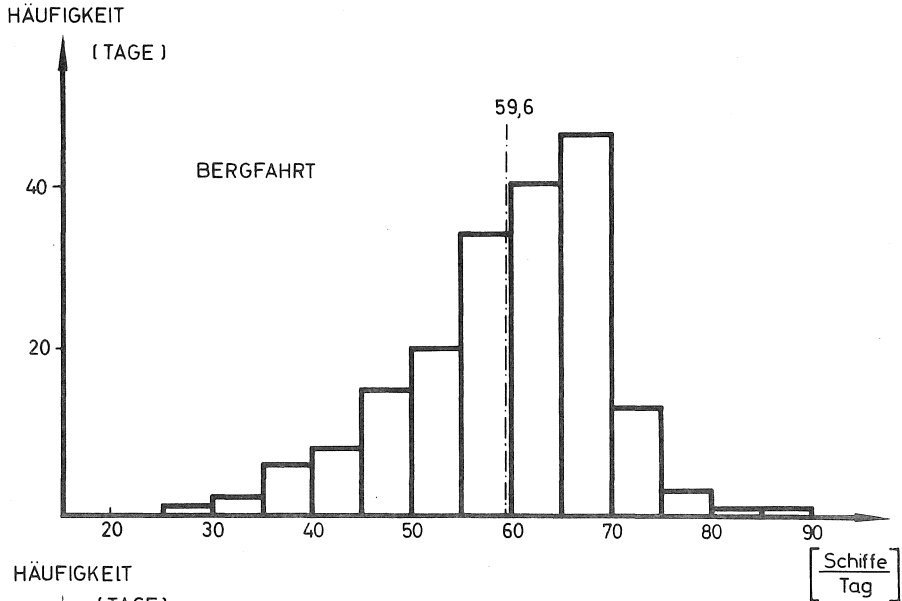


ZAHL DER SCHIFFSANKÜNFTE IN BEZUG AUF DEN WOCHENTAG AN DER SCHLEUSE I  
KANAL A

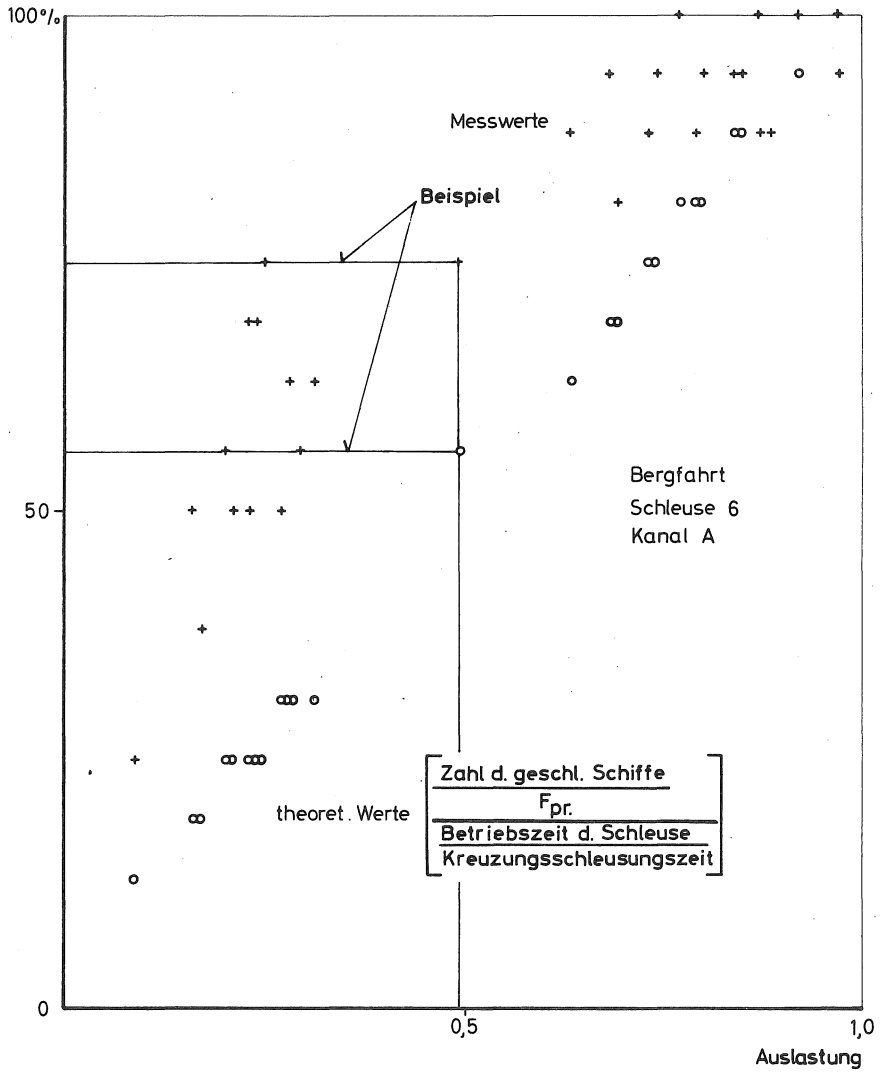




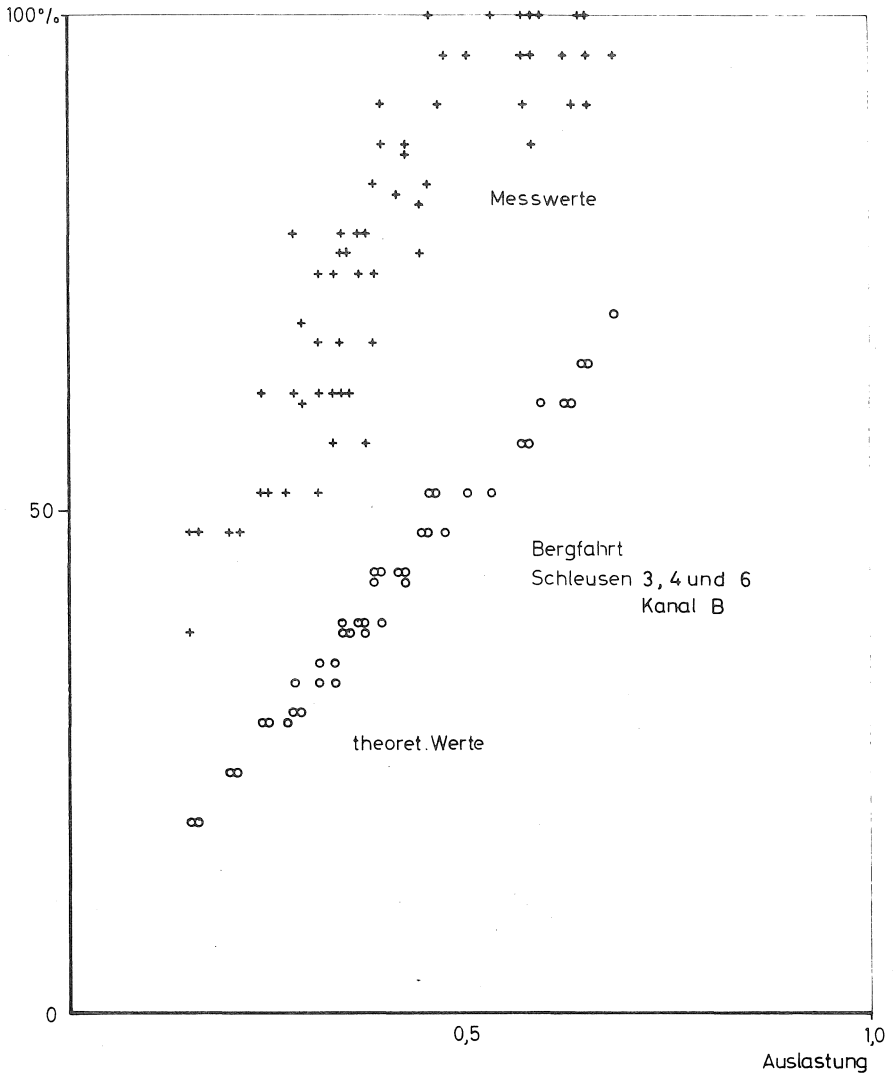
HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER SCHIFFSANKÜNFTEN AN DER SCHLEUSE 1  
KANAL A AN 190 TAGEN



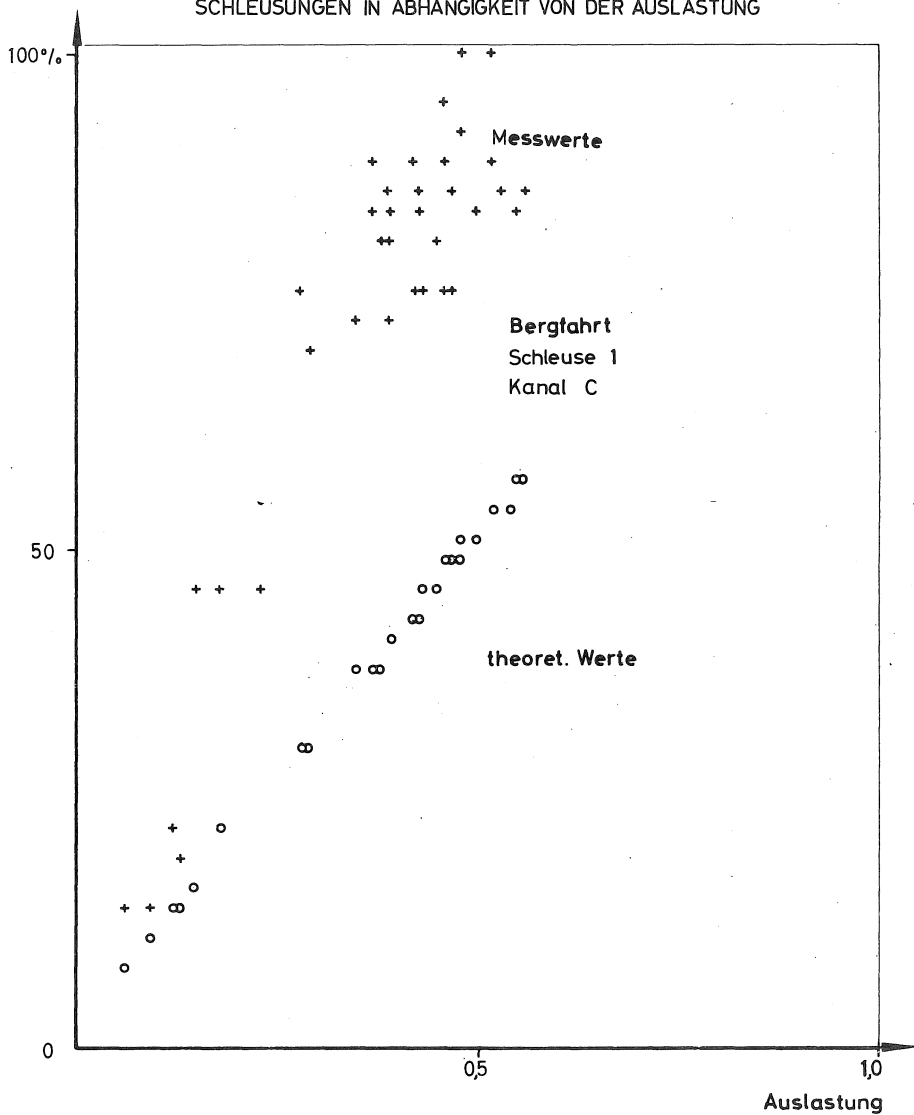
VERHÄLTNISS VON GESAMTZAHL DER SCHLEUSUNGEN ZUR ZAHL DER MÖGLICHEN SCHLEUSUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER AUSLASTUNG



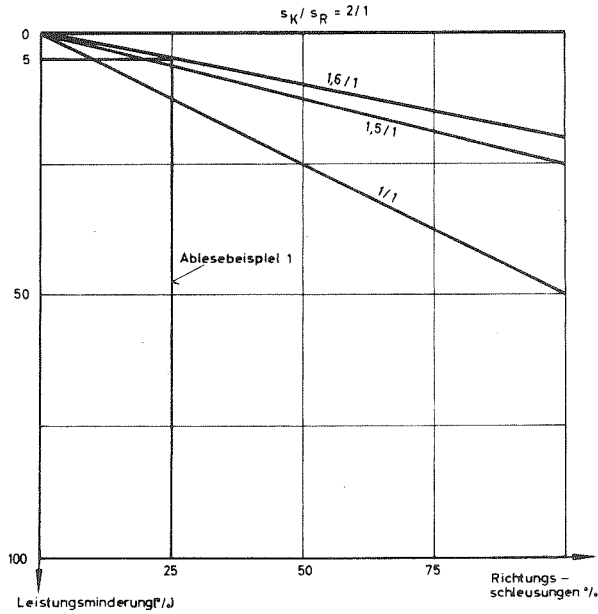
VERHÄLTNIS VON GESAMTZAHL DER SCHLEUSUNGEN ZUR ZAHL DER MÖGLICHEN  
SCHLEUSUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER AUSLASTUNG



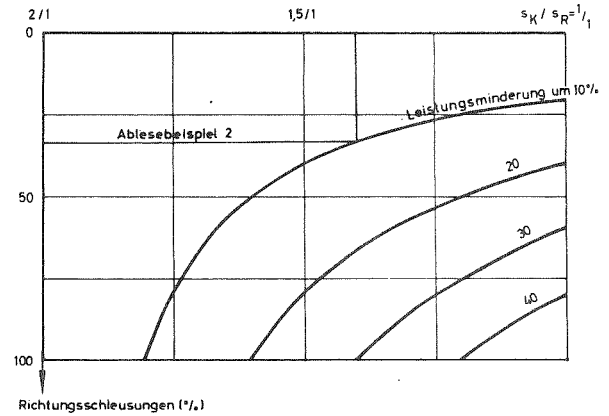
VERHÄLTNIS VON GESAMTZAHL DER SCHLEUSUNGEN ZUR ZAHL DER MÖGLICHEN SCHLEUSUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER AUSLASTUNG



LEISTUNGSMINDERUNG EINER SCHLEUSENANLAGE IN ABHÄNGIGKEIT VOM VERHÄLTNIS  $s_K / s_R$  INFOLGE RICHTUNGSSCHLEUSUNGEN

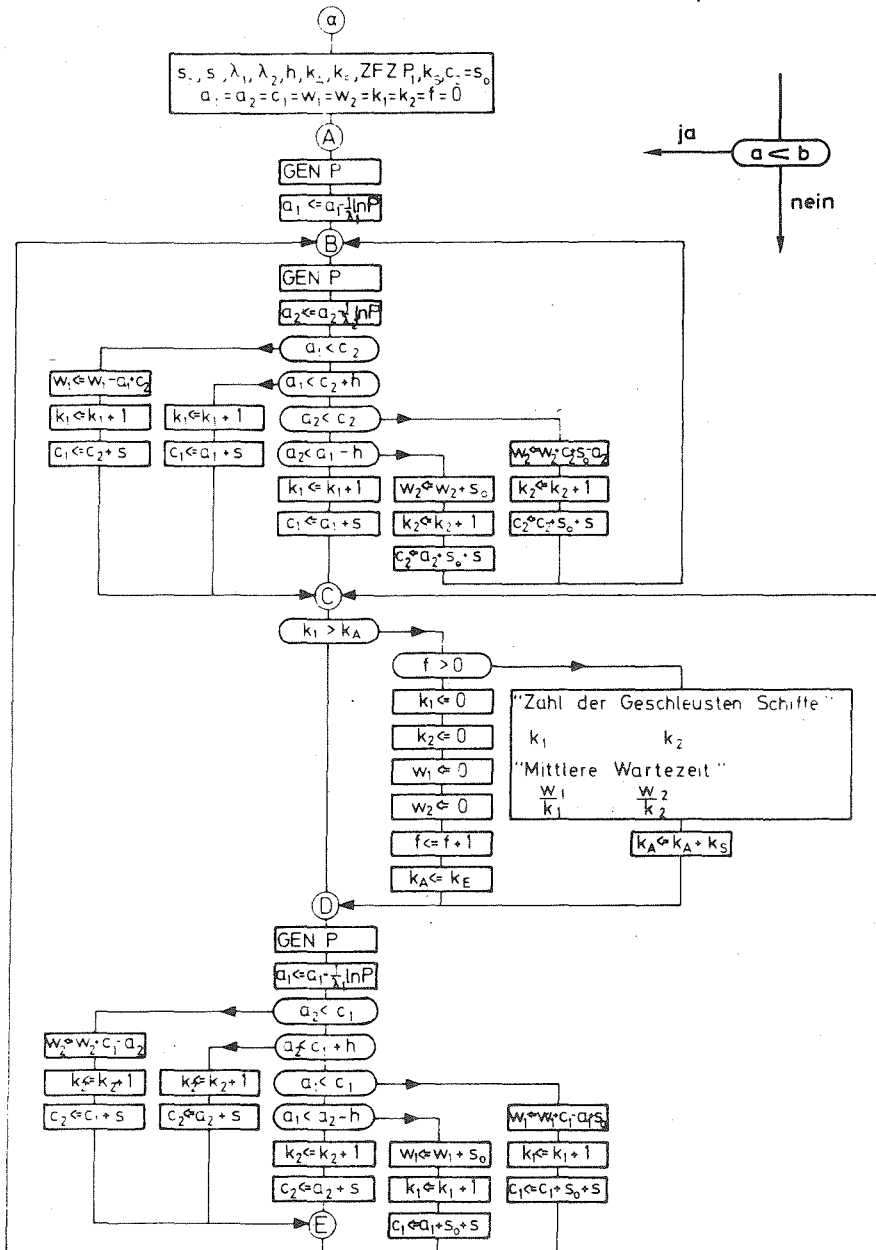


LEISTUNGSMINDERUNG EINER SCHLEUSENANLAGE IN ABHÄNGIGKEIT VOM VERHÄLTNIS  $s_K / s_R$  INFOLGE RICHTUNGSSCHLEUSUNGEN



# STRUKTURDIAGRAMM

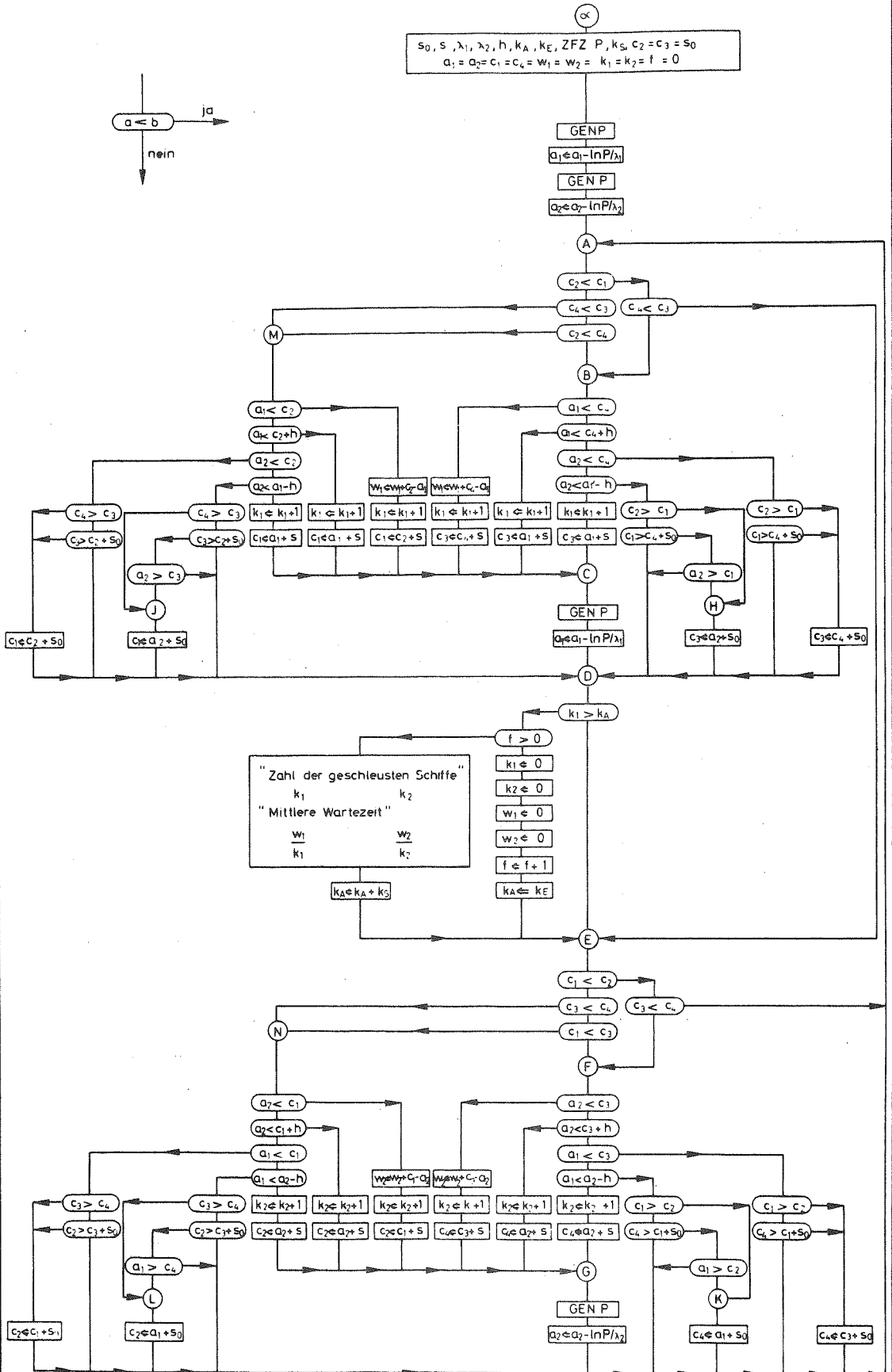
$\bar{w}$  - stationär für Einkammerschleuse und ein Schiff pro Kammer



Quelle [36]

# STRUKTURDIAGRAMM

W-STATIONAR FÜR ZWEIKAMMERSCHLEUSE UND EIN SCHIFF PRO KAMMER

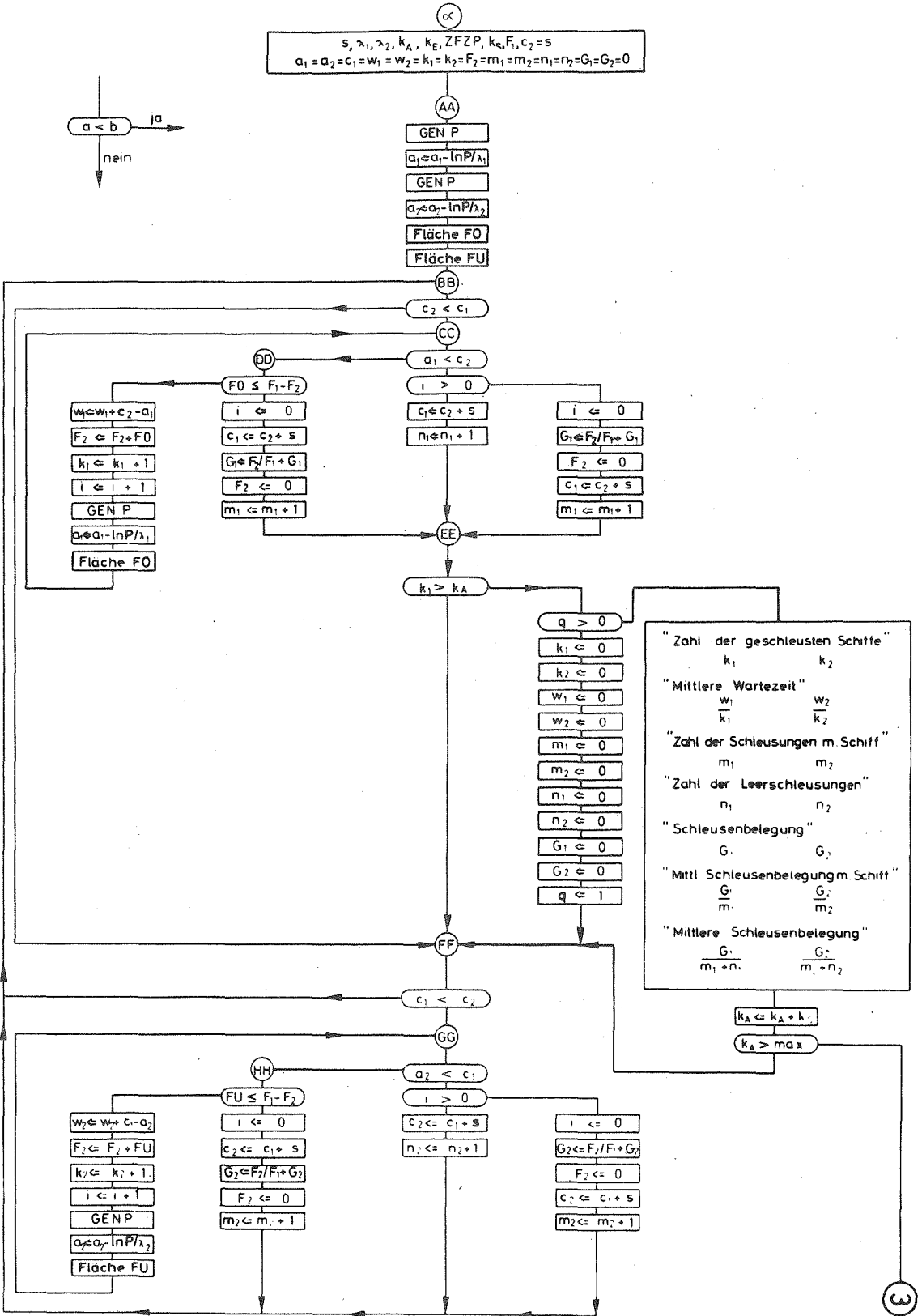






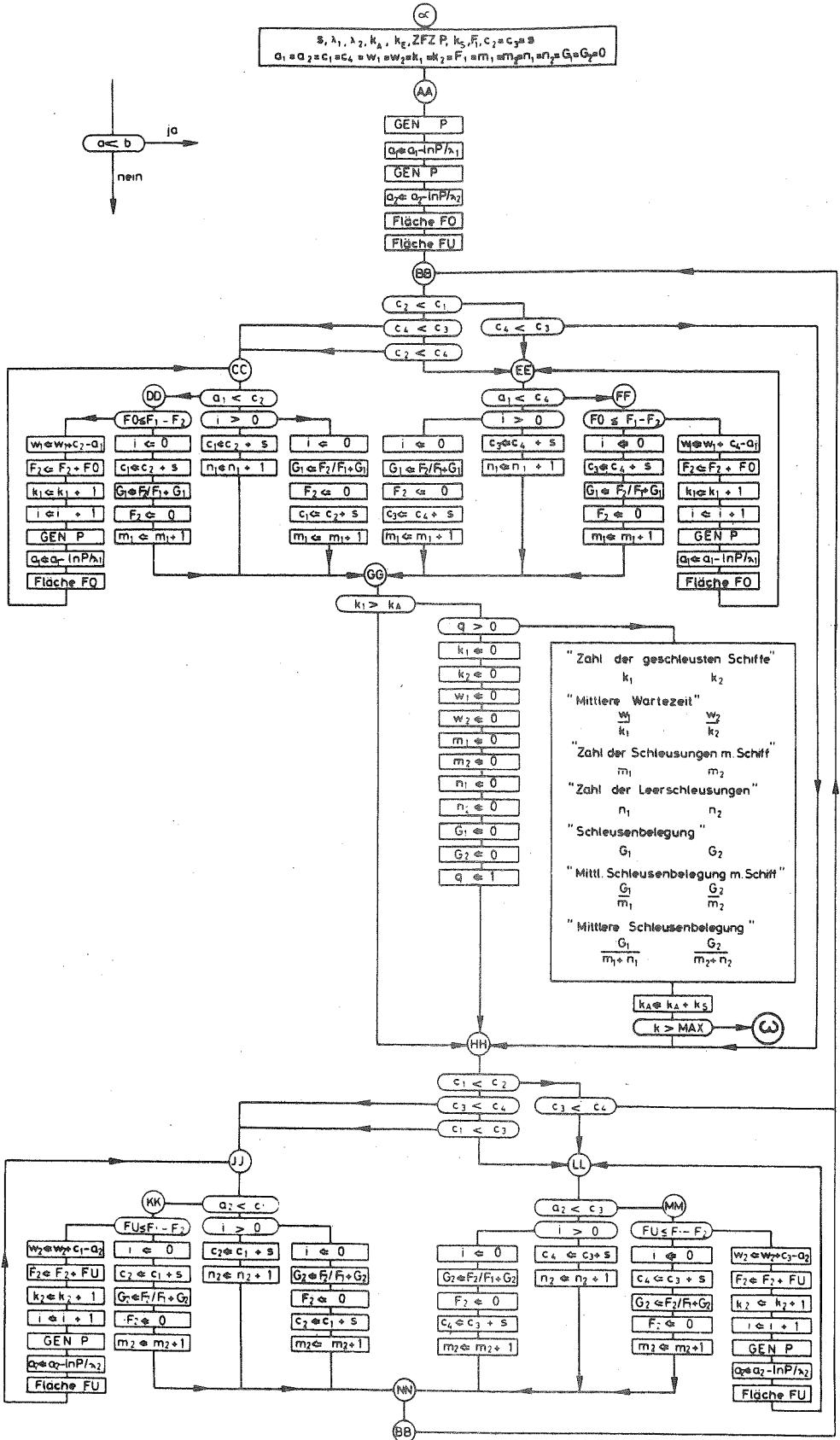
# STRUKTURDIAGRAMM

W-STATIONÄR EINKAMMERSCHLEUSE UND MEHRERE SCHIFFE PRO KAMMER, SCHLEUSUNG IN KONSTANTEM TAKT



# STRUKTURDIAGRAMM

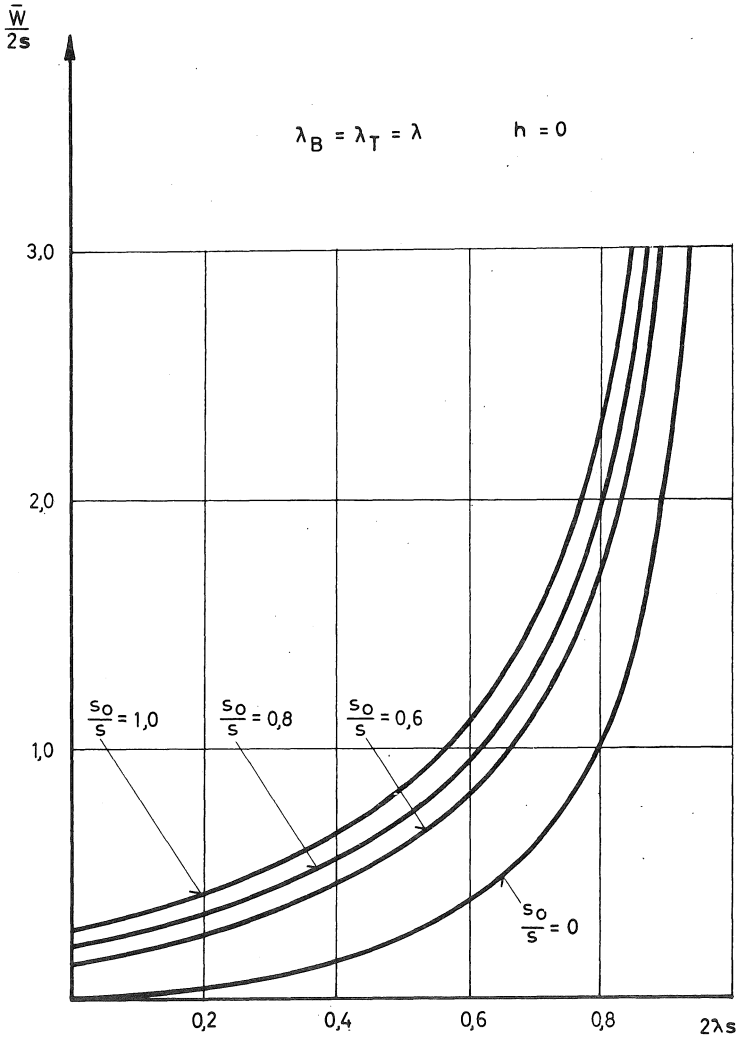
W-STATIONAR ZWEIKAMMERSCHLEUSE UND MEHRERE SCHIFFE PRO KAMMER SCHLEUSUNG  
IN KONSTANTEM TAKT



# BEZEICHNUNGEN ZU DEN STRUKTURDIAGRAMMEN

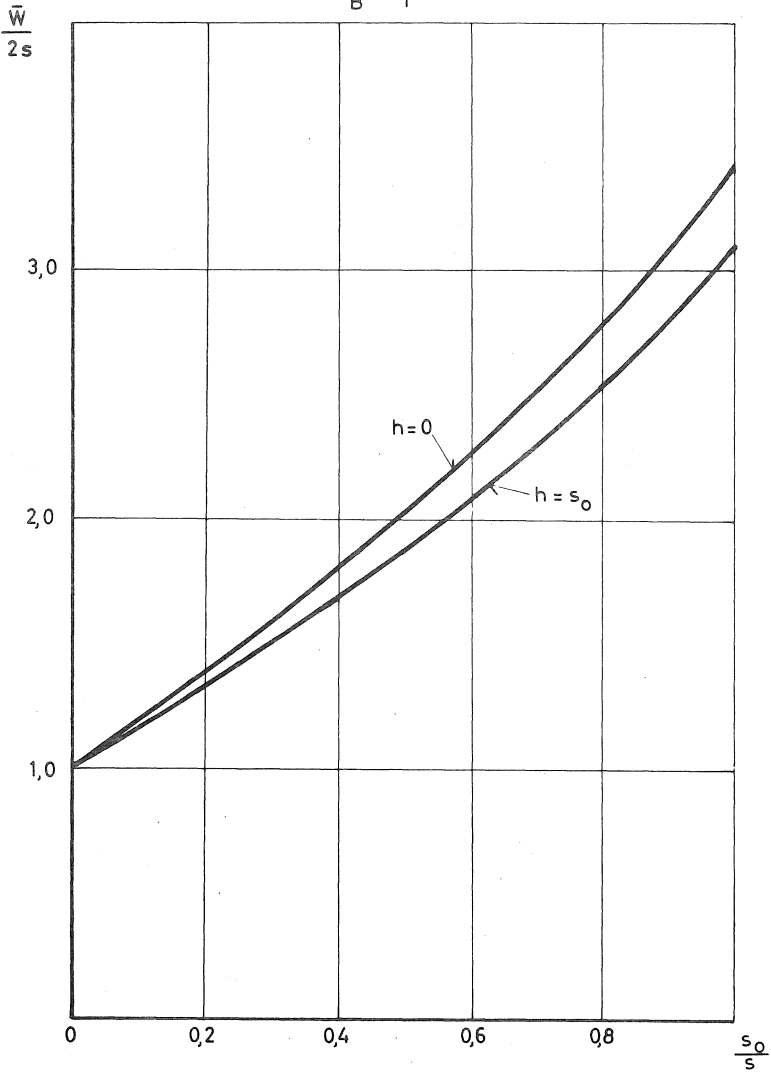
- $s$  = Schleusungszeit mit Schiff
- $s_0$  = Schleusungszeit bei Leerschleusung
- $\lambda_1$  = Erwartungswert der Zahl der eintreffenden Schiffe im Oberwasser
- $\lambda_2$  = Erwartungswert der Zahl der eintreffenden Schiffe im Unterwasser
- $k_A$  = Beginn der stationären Lösung
- $k_E$  = Abfrage der mittleren Wartezeit, wenn  $k_E$  Schiffe geschleust wurden
- $k_S$  = Schrittweite von  $k_E$
- $a_1$  = Ankunftszeitpunkt eines Schiffes im Oberwasser
- $a_2$  = Ankunftszeitpunkt eines Schiffes im Unterwasser
- $F_0$  = Fläche eines zu Tal zu schleusenden Schiffes
- $F_U$  = Fläche eines zu Berg zu schleusenden Schiffes
- $c_1/c_3$  = Zeitpunkt der Einfahrtsfreigabe in die Schleuse für Schiffe aus dem Unterwasser
- $c_2/c_4$  = Zeitpunkt der Einfahrtsfreigabe in die Schleuse für Schiffe aus dem Oberwasser
- $k_1$  = Zahl der geschleusten Schiffe zu Tal
- $k_2$  = Zahl der geschleusten Schiffe zu Berg
- $m_1$  = Zahl der Schleusungen mit Schiff zu Tal
- $m_2$  = Zahl der Schleusungen mit Schiff zu Berg
- $n_1$  = Zahl der Leerschleusungen zu Tal
- $n_2$  = Zahl der Leerschleusungen zu Berg
- $f, g, i$  = Zählindex
- $h$  = Zeit, die die Schleuse maximal in dem momentanen Zustand verharrt, um auf ein gemeldetes Schiff zu warten, das dann sofort geschleust werden kann, obwohl in der Gegenrichtung Schiffe zur Schleusung vorliegen
- $h_1$  = Zeit, die die Schleuse auf ein gemeldetes Schiff wartet, wenn die Kammer bereits teilweise belegt ist
- $w_1$  = Summe der Wartezeit der Schiffe im Oberwasser
- $w_2$  = Summe der Wartezeit der Schiffe im Unterwasser
- $F_1$  = Kammerfläche
- $F_2$  = Belegte Kammerfläche
- $G_1$  = Kammerbelegung zu Tal
- $G_2$  = Kammerbelegung zu Berg
- GEN P = Erzeugung einer Zufallszahl
- ZFZ P = Anfangszufallszahl

$\bar{W}$  - STATIONÄR FÜR EINKAMMERSCHLEUSE UND EIN SCHIFF PRO KAMMER

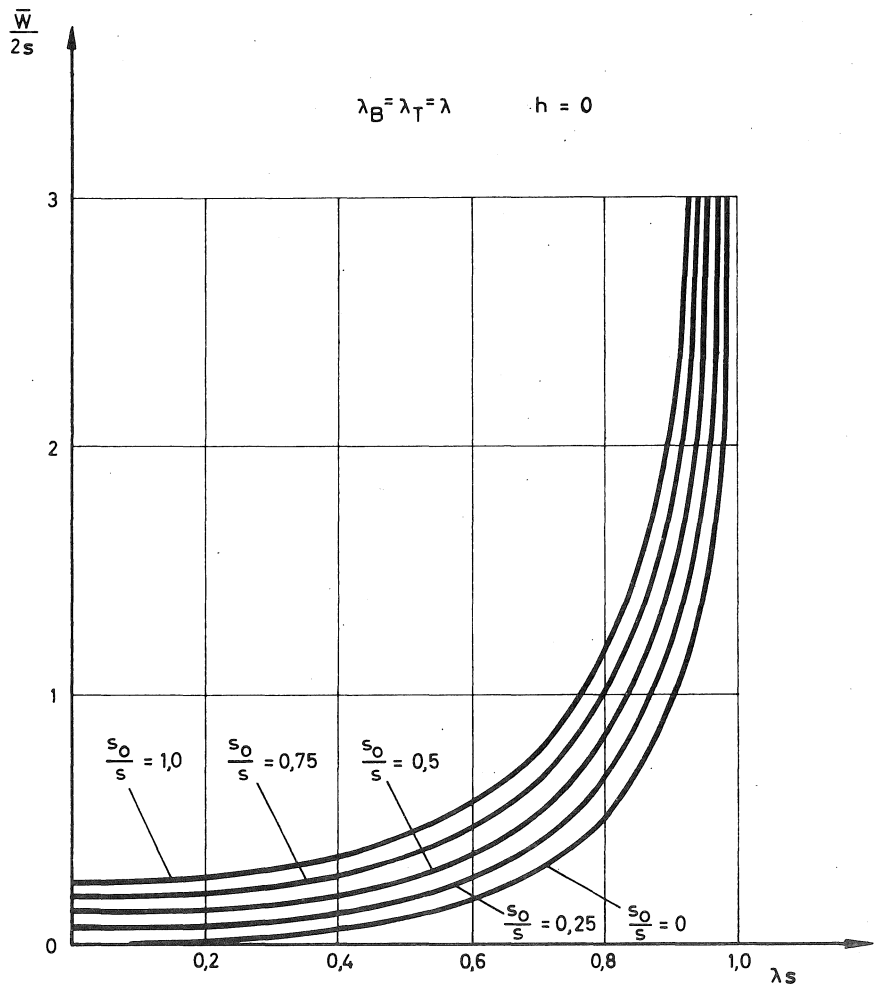


$\bar{W}$ -STATIONÄR FÜR EINKAMMERSCHLEUSE UND EIN SCHIFF. PRO KAMMER

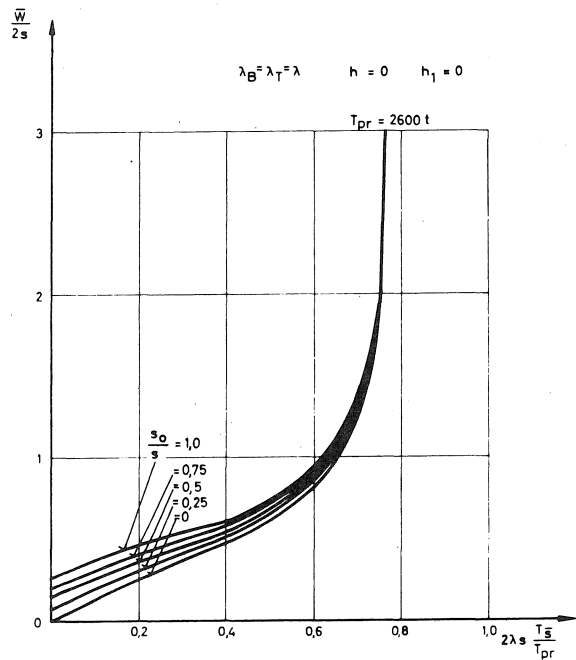
$2\lambda s = 0,5$   
 $\lambda_B = \lambda_T = \lambda$



$\bar{W}$  - STATIONÄR FÜR ZWEIKAMMERSCHLEUSE , EIN SCHIFF PRO KAMMER

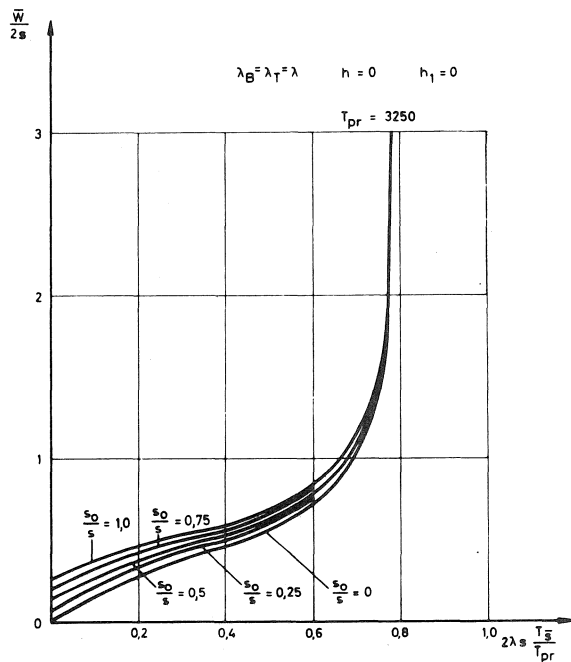


$\bar{W}$ -STATIONÄR FÜR EINKAMMERSCHLEUSE MIT MEHREREN SCHIFFEN PRO KAMMER



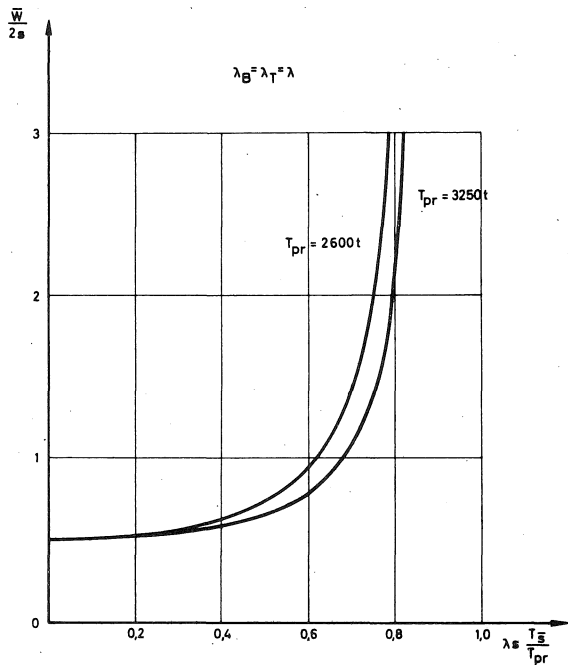
64

$\bar{W}$ -STATIONÄR FÜR EINKAMMERSCHLEUSE, MEHRERE SCHIFFE PRO KAMMER



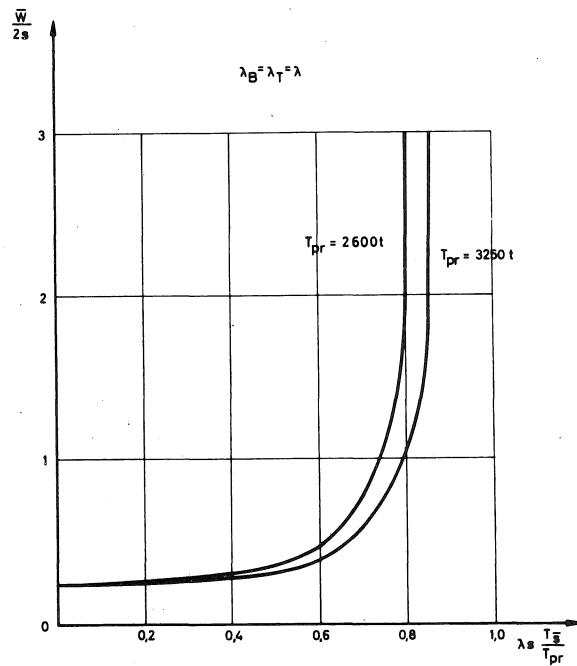
65

$\bar{W}$ -STATIONÄR FÜR EINKAMMERSCHLEUSE MIT MEHREREN SCHIFFEN PRO KAMMER  
SCHLEUSUNG IN KONSTANTEM TAKT



66

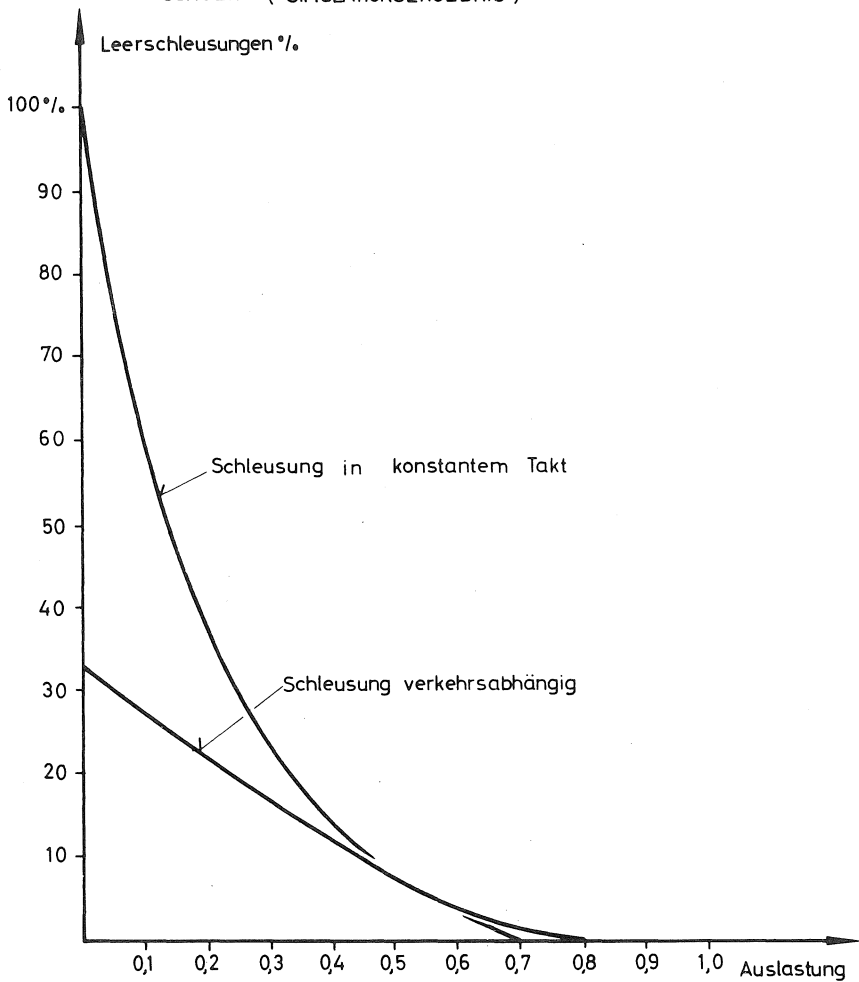
$\bar{W}$ -STATIONÄR FÜR ZWEIKAMMERSCHLEUSE MIT MEHREREN SCHIFFEN PRO KAMMER  
SCHLEUSUNG IN KONSTANTEM TAKT



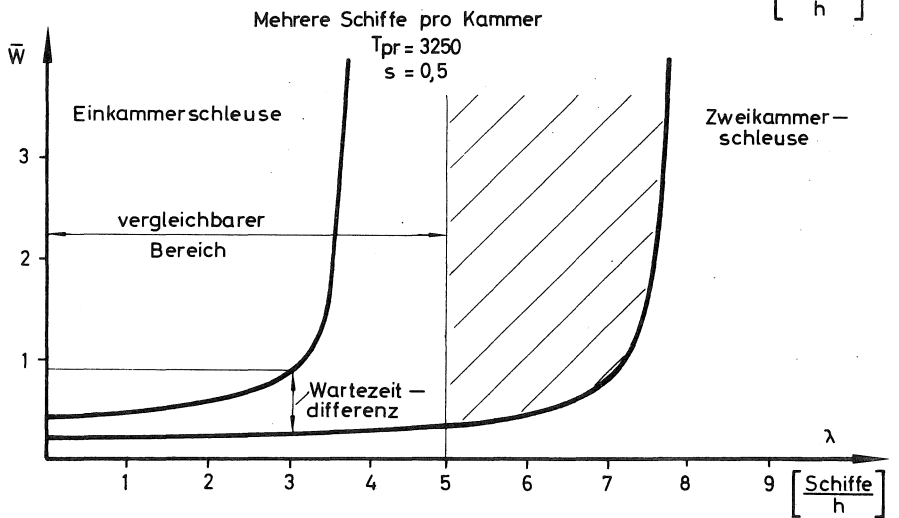
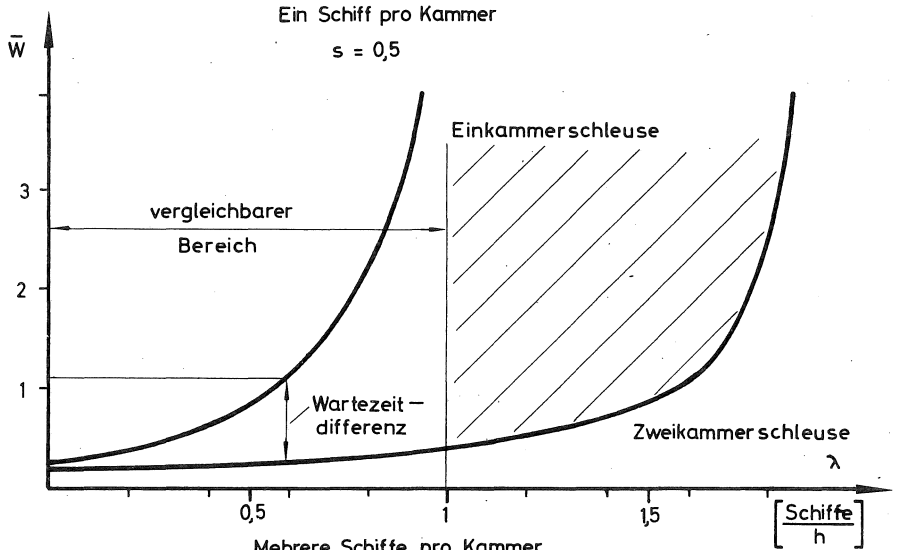
67



ABHÄNGIGKEIT ZWISCHEN DER AUSLASTUNG UND DER ZAHL DER LEERSCHLEU-  
SUNGEN ( SIMULATIONSERGEBNIS )

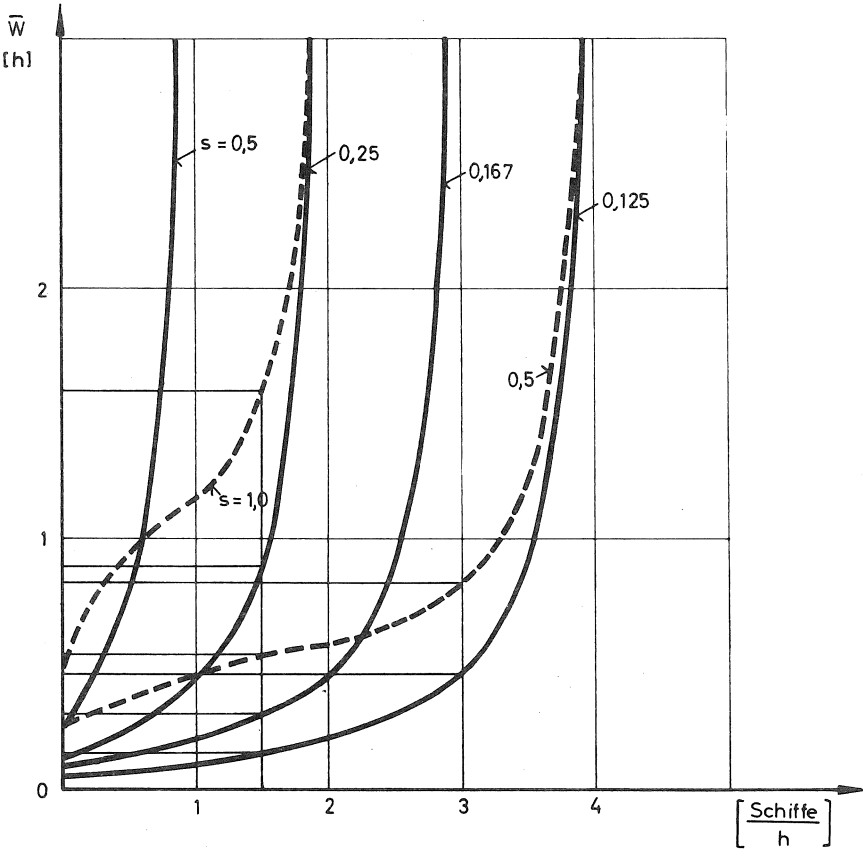


UNTERSCHIEDE DER WARTEZEIT BEI EINER UND BEI ZWEI KAMMERN UND GLEICHEM ZUFLUSS

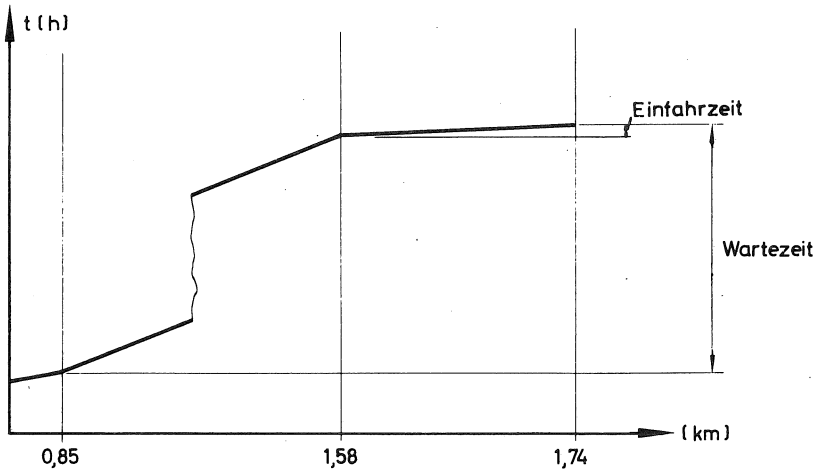
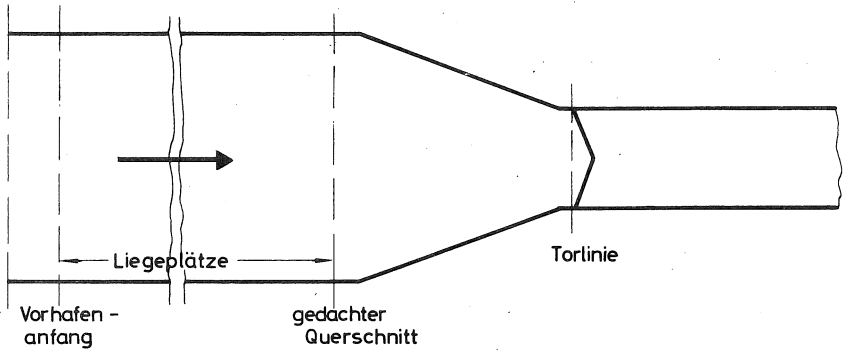


VERGLEICH DER WARTEZEITVERHÄLTNISS E AN GROSSEN UND KLEINEN EIN -  
KAMMERSCHLEUSEN MIT VERSCHIEDENER SCHLEUSUNGSZEIT

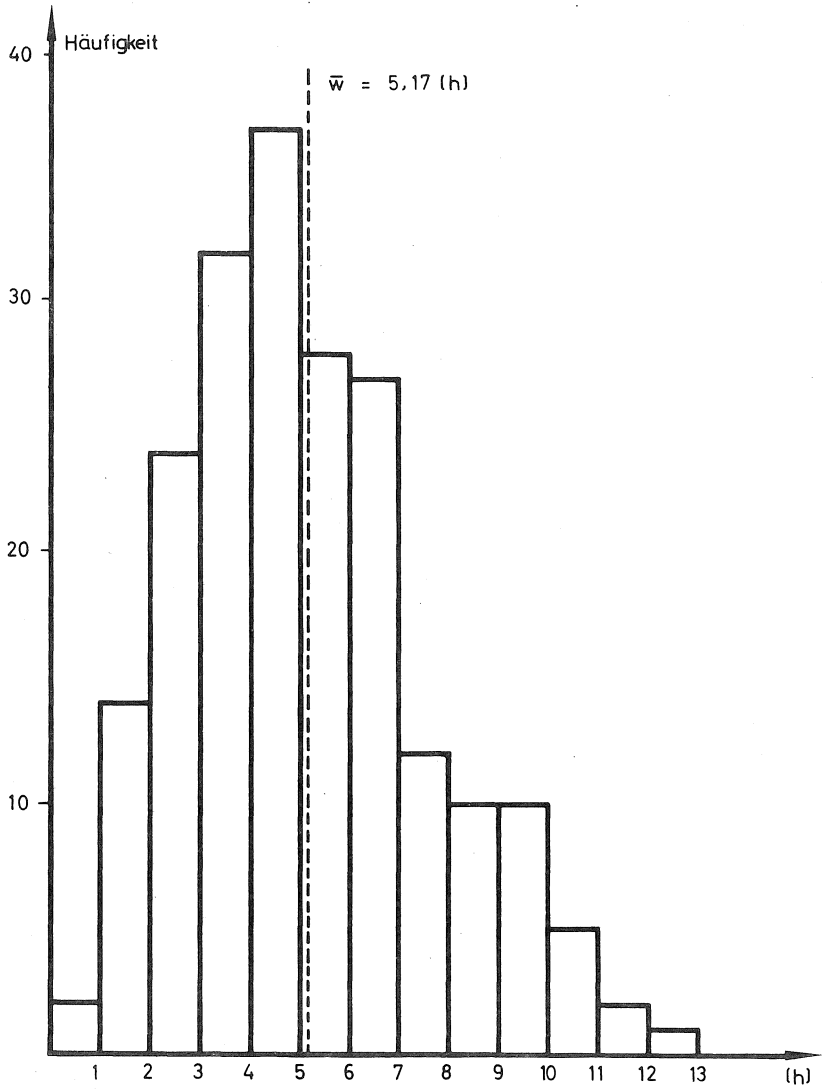
Einkammerschleuse , ein Schiff pro Kammer  
 " ,  $T_{pr} = 3250 t$ ,  $T_s = 700 t$



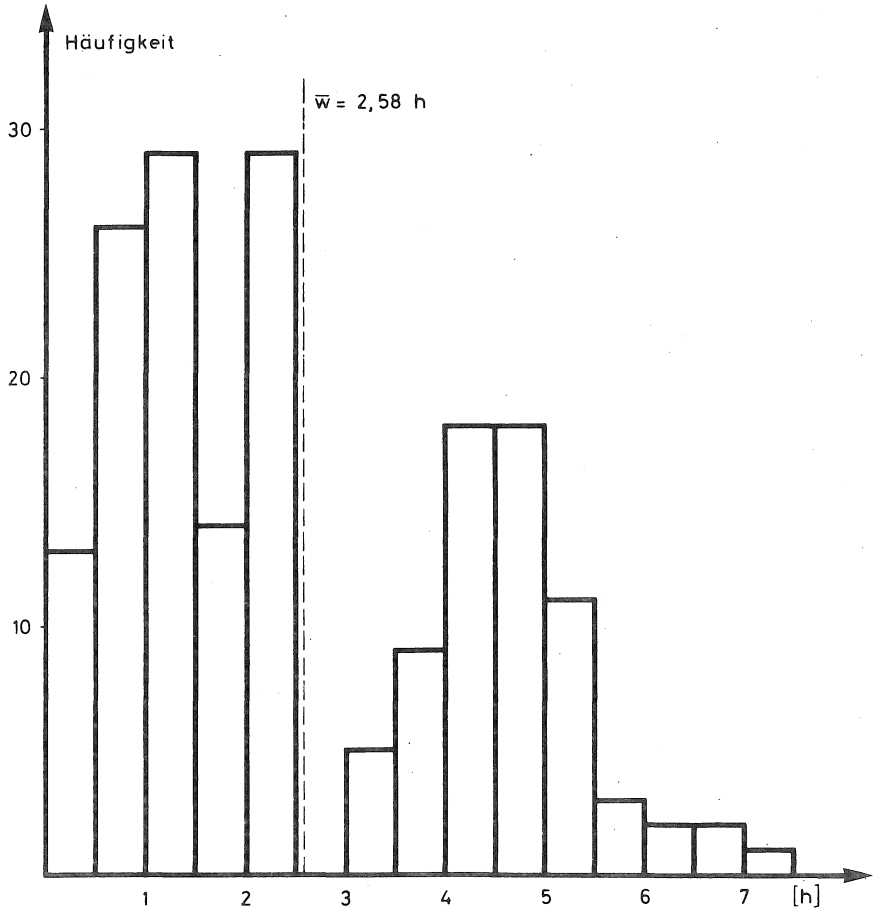
SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WARTEZEITMESSUNGEN AN DER SCHLEUSE 1  
KANAL A



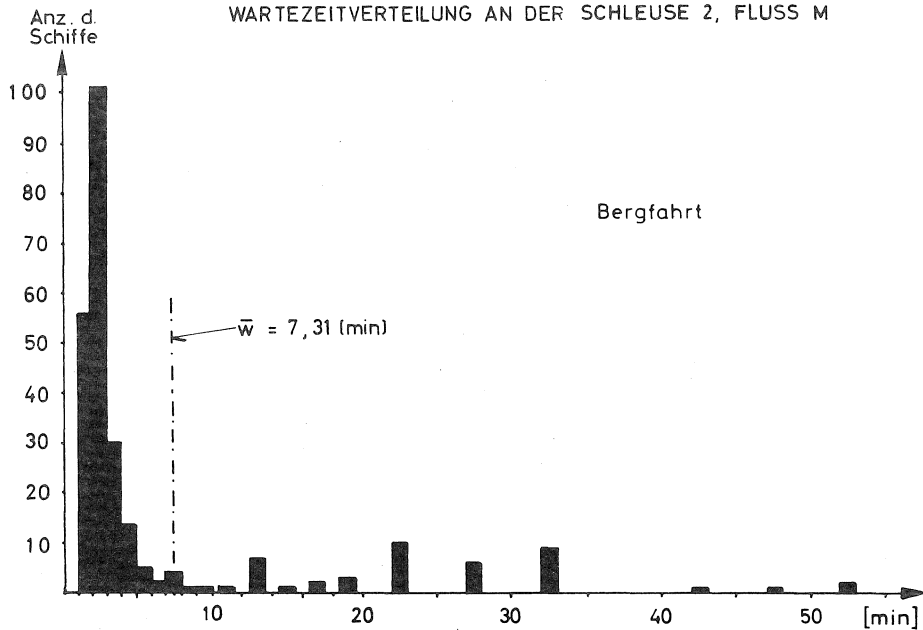
WARTEZEITVERTEILUNG AN DER SCHLEUSE 1, KANAL A - BERGFABRT



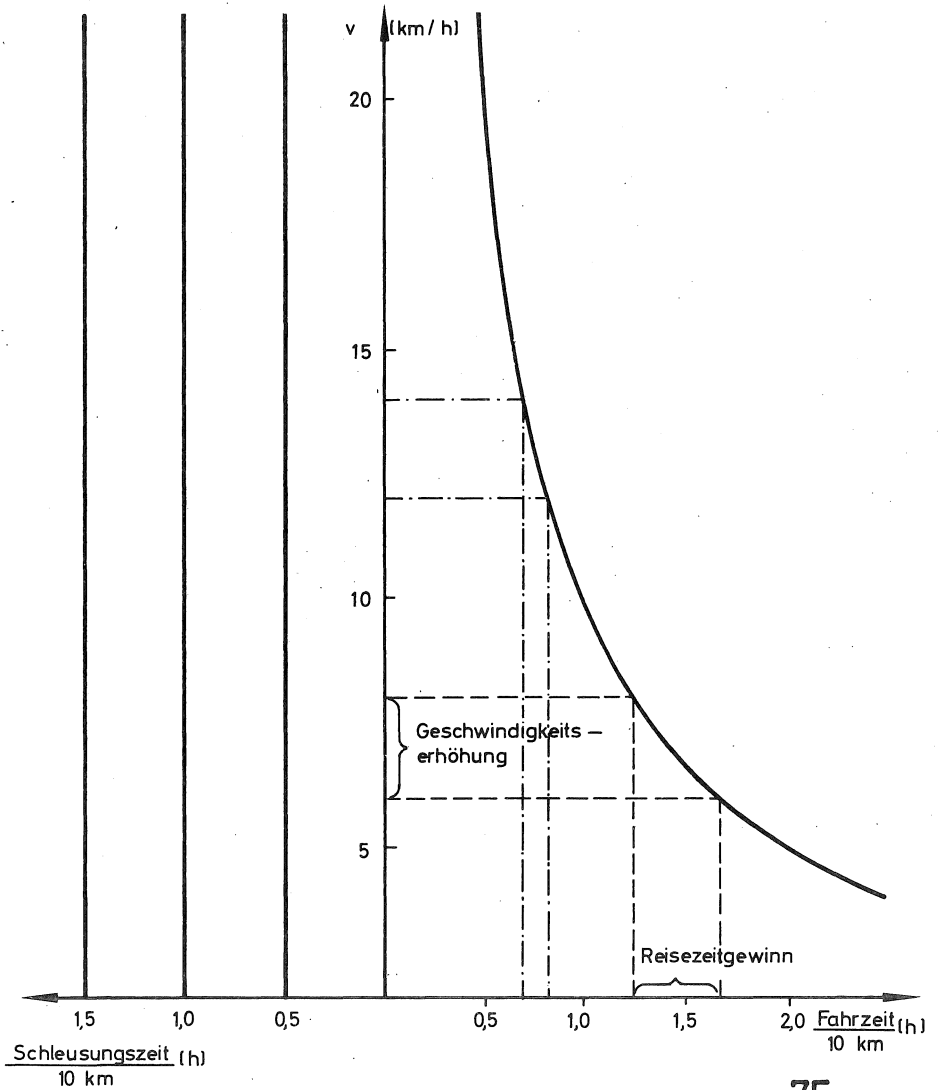
WARTEZEITVERTEILUNG DER SCHLEUSE 1, FLUSS N  
BERGFAHRT



# WARTEZEITVERTEILUNG AN DER SCHLEUSE 2, FLUSS M

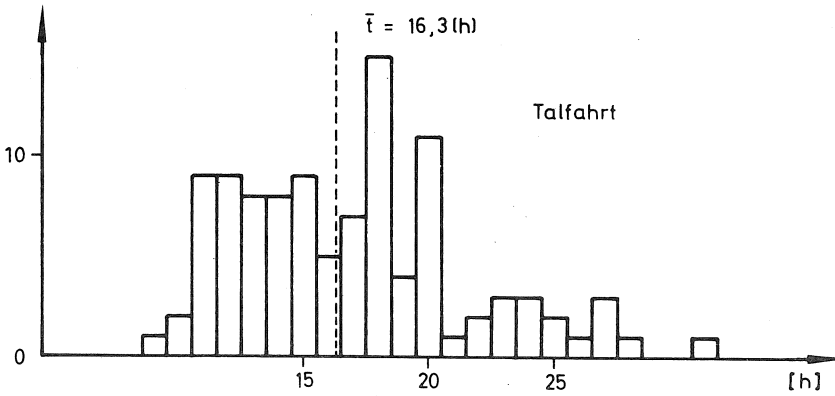
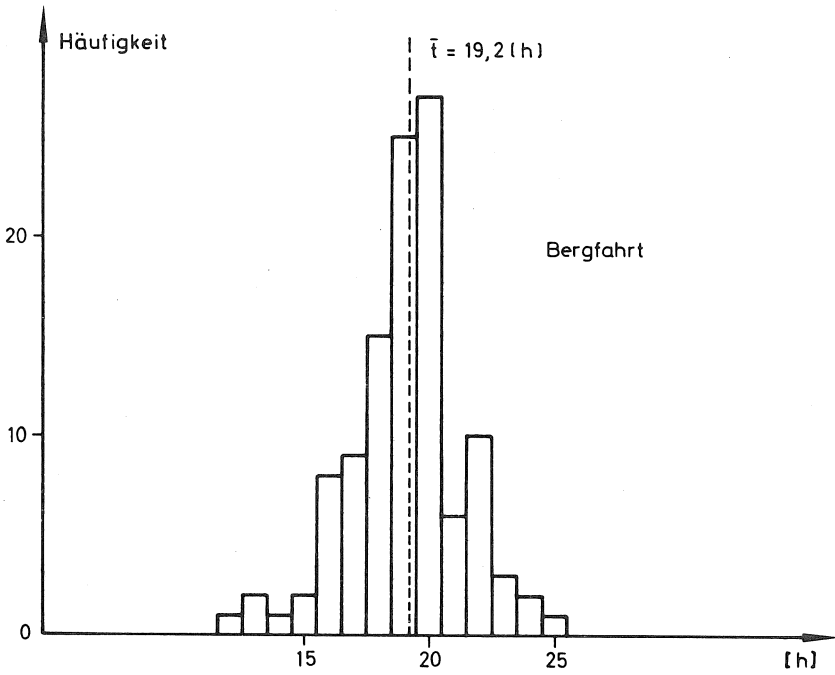


MÖGLICHE REISEZEITVERKÜRZUNGEN AUF KANALISIERTEN WASSERSTRASSEN  
 DURCH GESCHWINDIGKEITSERHÖHUNG UND SCHLEUSUNGSZEITVERKÜRZUNG



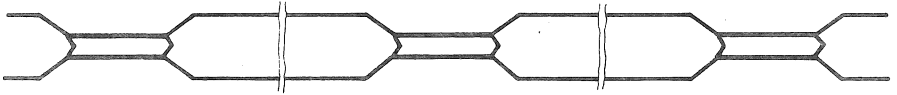


REISEZEITVERTEILUNG AUF DEM KANAL A OHNE ÜBERNACHTUNGSZEITEN

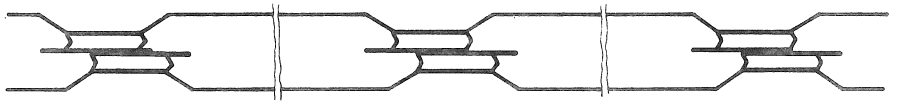


SCHEMA : VIER ARTEN VON SCHLEUSENKETTEN

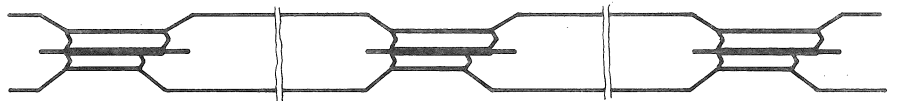
1. EINKAMMERSCHLEUSE , GLEICHE KAMMERGRÖSSE



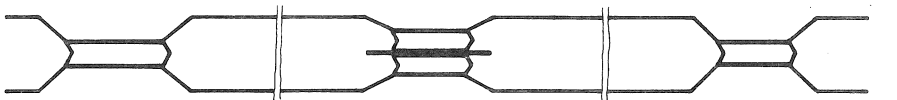
2. ZWEIKAMMERSCHLEUSE , GLEICHE KAMMERGRÖSSE



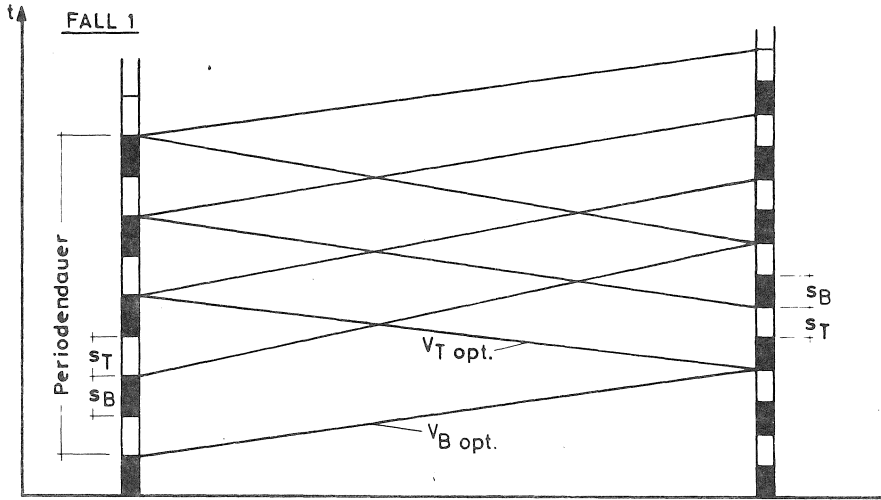
3. ZWEIKAMMERSCHLEUSE , VERSCHIEDENE KAMMERN AN EINER STUFE



4. UNTERSCHIEDLICHE KAMMERN ÜBER ALLE STUFEN

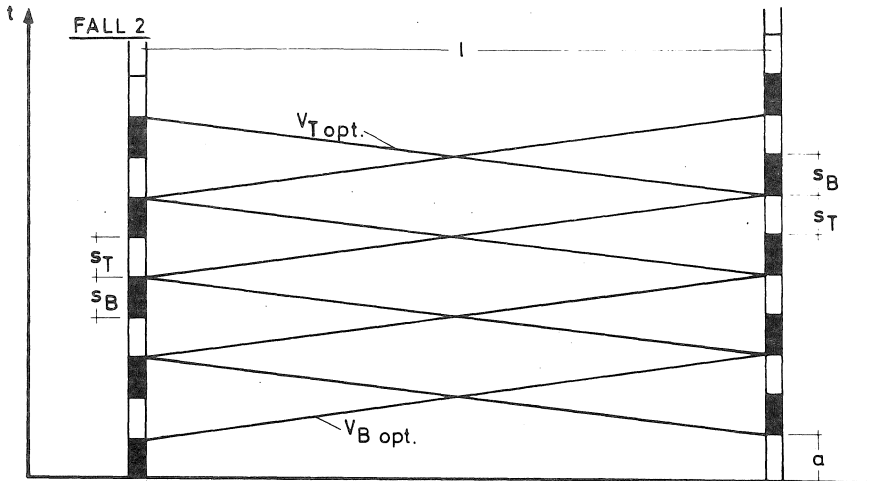


KOORDINIERUNG VON SCHLEUSEN



Schleuse 1  
 $s_{T1} = s_{B1} = s_1$

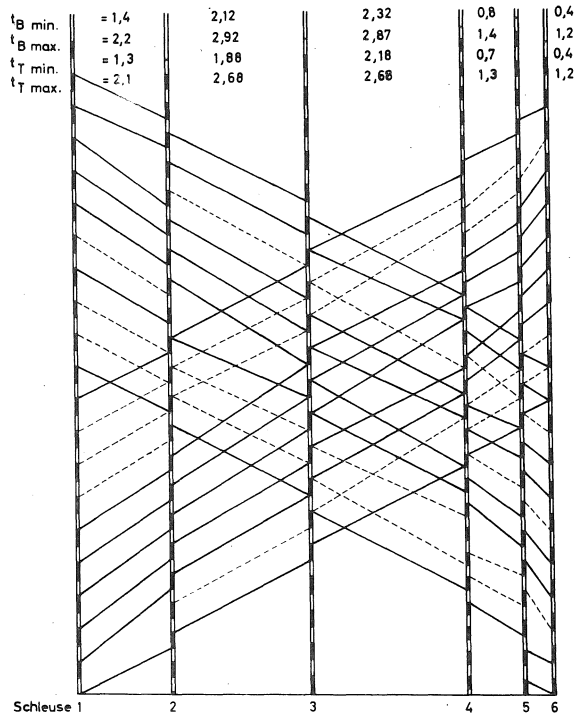
Schleuse 2  
 $s_{T2} = s_{B2} = s_2 = 0,8s_1$



Schleuse 1  
 $s_{T1} = s_{B1} = s_1$

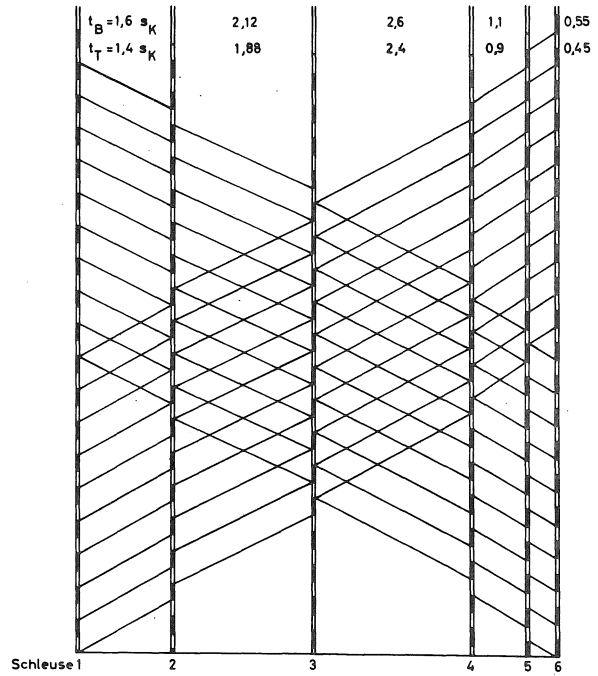
Schleuse 2  
 $s_{T2} = s_{B2} = s_2 = s_1$

UNTERSUCHUNG ÜBER DIE MÖGLICHKEIT DER KOORDINIERUNG DER  
SCHLEUSEN AM KANAL A



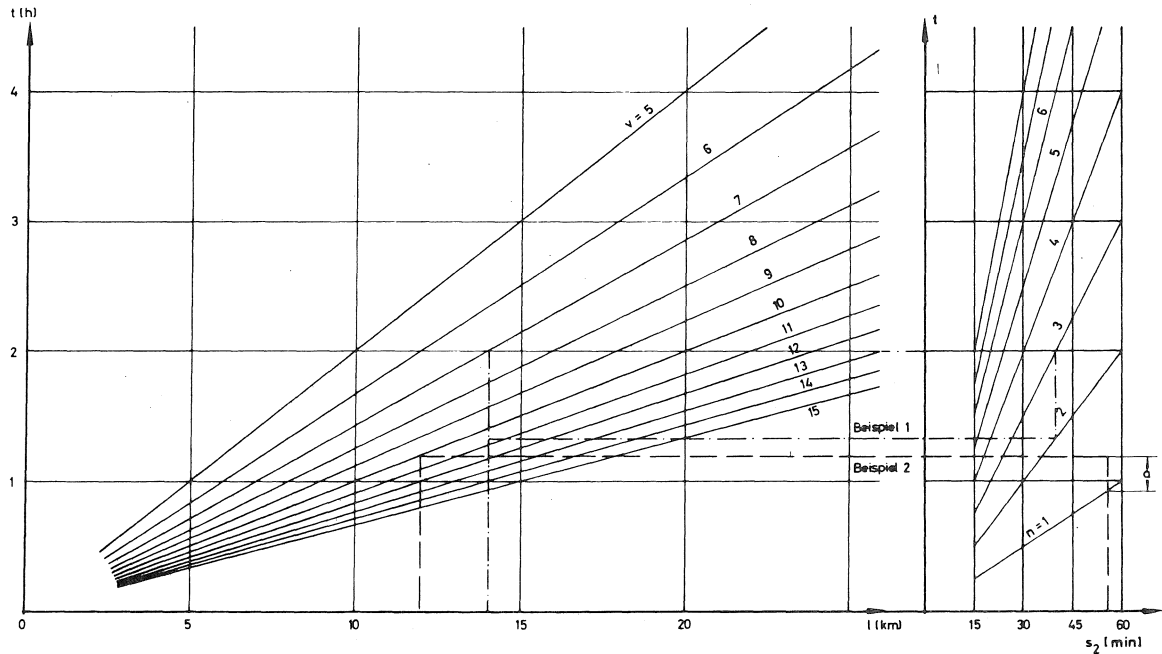
79

UNTERSUCHUNG ÜBER DIE MÖGLICHKEIT DER KOORDINIERUNG DER  
SCHLEUSEN AM KANAL A

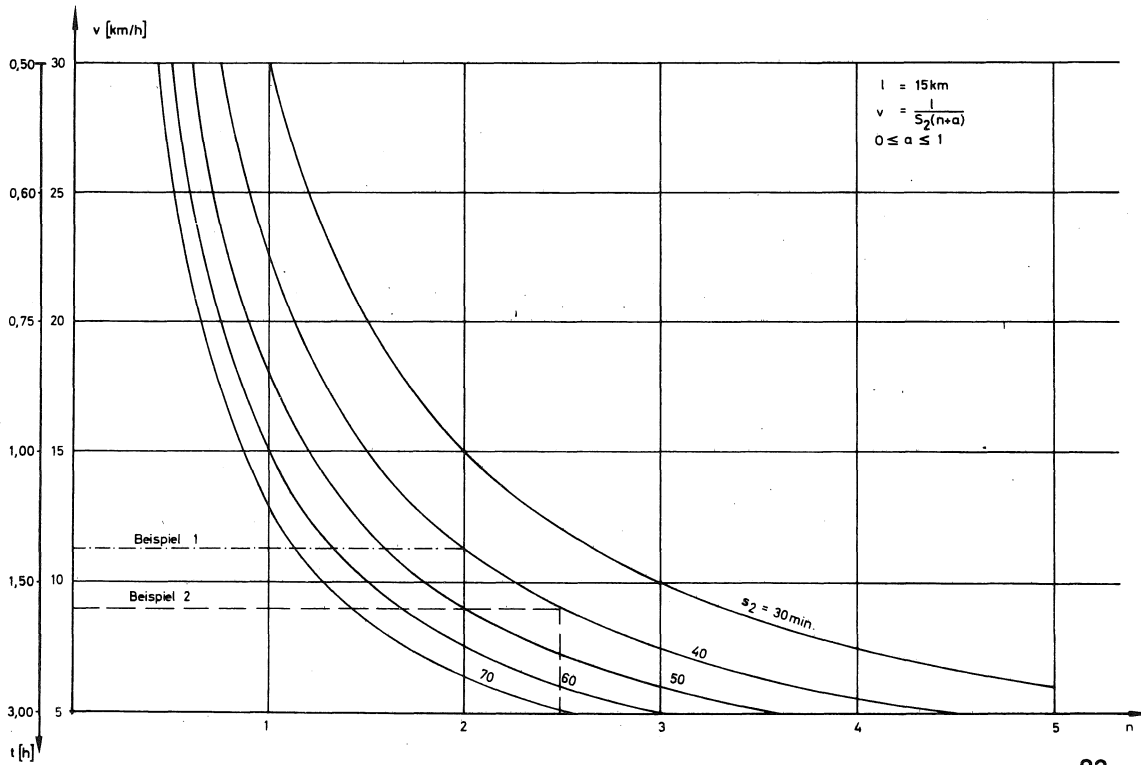


80

NOMOGRAMM 1 ZUR BESTIMMUNG GÜNSTIGER KOORDINIERUNGSGESCHWINDIGKEITEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SCHLEUSUNGSZEIT DER FOLGENDEN SCHLEUSE UND DEREN ENTFERNUNG

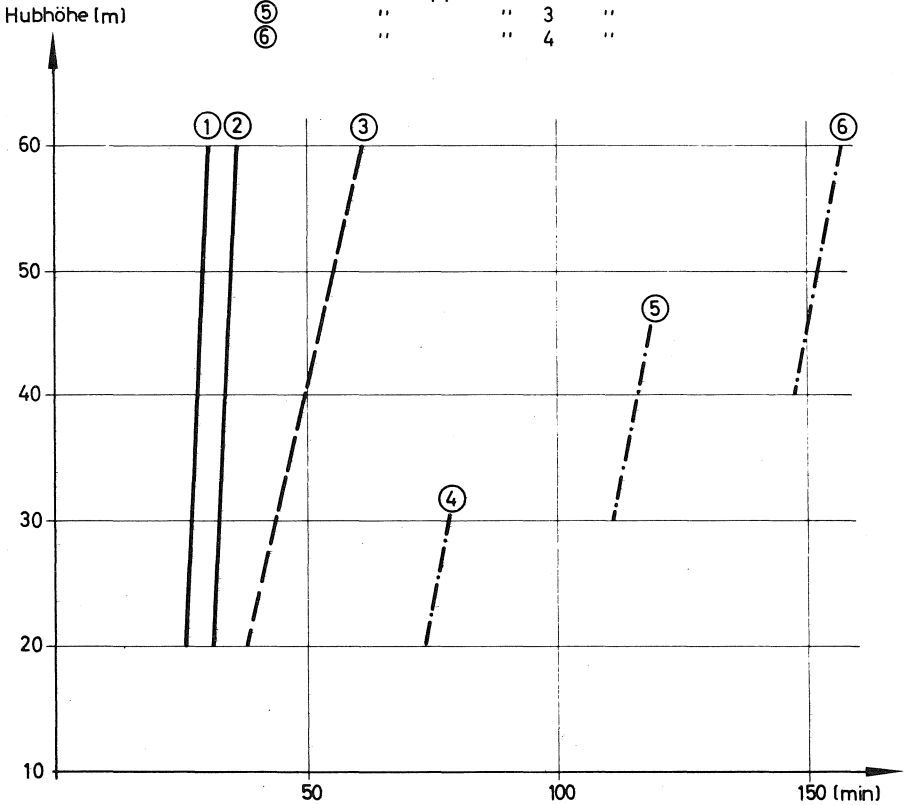


NOMOGRAMM 2 ZUR BESTIMMUNG GÜNSTIGER KOORDINIERUNGSGESCHWINDIGKEIT FÜR FESTEN ABSTAND UND VERSCHIEDENE SCHLEUSUNGSZEITEN  $s_2$



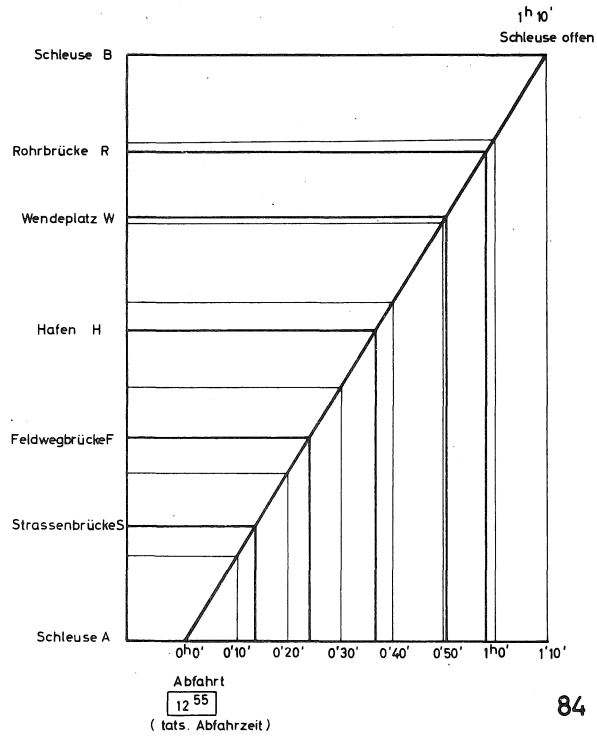
ZEITDAUER ZUR ÜBERWINDUNG GROSSER HUBHÖHEN DURCH VERSCHIEDENE  
SCHIFFSHEBEANLAGEN MIT EINER KAMMER – BZW. TROGLÄNGE VON 170 m

- ① Senkrecht es Hebewerk, Steiggeschwindigkeit < 15cm/sec
- ② " " " " " " > 15cm/sec
- ③ Längsgeneigte Ebene, " " = 3 cm/sec
- ④ Schleusentreppe aus 2 Schleusen
- ⑤ " " " 3 "
- ⑥ " " " 4 "



Zeitdauer zur  
Überwindung der Ge-  
samthöhe  
Quelle ( 40 )

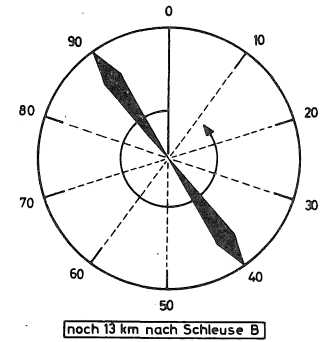
BEISPIEL EINES GRAPH. FAHRPLANS FÜR EIN SCHIFF ZWISCHEN ZWEI SCHLEUSEN



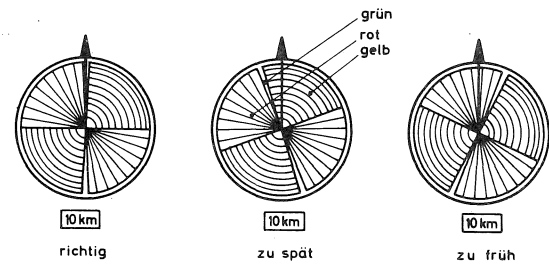
84

BEISPIELE FÜR UFERANZEIGERGERÄTE

BEISPIEL 1



BEISPIEL 2



85



Bisher erschienene Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswesen:

Vorläufige Berichte

- Nr. 1 W. Leutzbach und R. Koehler:  
Binnenwasserstraßenverkehr als Zufallsverteilung;  
Februar 1964
  
- Nr. 2 P. Eick:  
Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALLD;  
Juli 1964
  
- Nr. 3 St. Bexelius:  
Größen der Verkehrstheorie, ihre Definition und Anwendung;  
Januar 1965
  
- Nr. 4 W. Leutzbach und R. Ernst:  
Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierungen auf das  
Verhalten der Fahrzeuglenker;  
Februar 1965
  
- Nr. 5 M. Gullon Löw:  
Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes;  
März 1965
  
- Nr. 6 St. Bexelius:  
An Extended Model for Car-Following;  
Juli 1965
  
- Nr. 7 St. Bexelius:  
Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene  
Arten von Engpässen;  
Dezember 1965
  
- Nr. 8 W. Leutzbach und K.-H. Lenz:  
Wartezeitverluste an Schleusen;  
Oktober 1966
  
- Nr. 9 W. Martin:  
Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart;  
Juli 1967
  
- Nr. 10 M. Droste:  
Parkraumerhebungen in Intervallen;  
April 1968

### Schriftenreihe

- H. 1 P. Baron:  
Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast - Empfangs-  
anlagen;  
Dezember 1967
- H. 2 K. E. Stoffers:  
Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen;  
1968

### Publizierte Forschungsberichte des Instituts:

1. W. Leutzbach und St. Bexolius:  
Probleme der Kolonnenfahrt;  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 44  
Hrgb.: Bundesminister für Verkehr, Bonn 1966
2. R. Ernst:  
Verkehrsablauf an Straßenknoten;  
Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 60  
Hrgb.: Bundesminister für Verkehr, Bonn 1967
3. K.-H. Lenz:  
Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warte-  
schlangen im Verkehrswesen;  
Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge H. 66  
Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg 1966

### Veranstaltungsberichte des Instituts:

1. Gemeinsam mit der IHK Karlsruhe:  
Kolloquium über Zeitprobleme in der Binnenschifffahrt;  
Schriftenreihe der IHK Karlsruhe, Band 3, 1967