

# Geschwindigkeits- und Mengenmessung strömender Flüssigkeiten mittels Ultraschalls

---

Von der  
**Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich**

zur Erlangung der

Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

genehmigte

## Promotionsarbeit

vorgelegt von

**Carlos Knapp Boetticher**

Dipl. Masch. Ing. ETH

spanischer Staatsangehöriger

Referent: Herr Prof. H. Gerber

Korreferent: Herr Prof. E. Baumann

1958

Heidenheim an der Brenz, Deutschland

VOITH-DRUCK

Printed in Germany

Separatdruck aus „Voith Forschung und Konstruktion“ Heft 3, Jahr 1958, herausgegeben von J. M. Voith G. m. b. H., Heidenheim (Brenz). Erscheint gleichzeitig als „Mitteilungen aus dem Institut für Hydraulische Maschinen und Anlagen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich“, Heft Nr. 2, Jahr 1958, herausgegeben vom Institutsvorstand Prof. H. Gerber.

## Vorwort

Die Anregung zu einer Abhandlung auf dem Ultraschall-Gebiet verdanke ich Herrn Dipl.-Phys. P. Weber [3].

Es zeigte sich im Verlauf der Prüfung der zur Verfügung stehenden Quellen, daß es bisher nur wenigen Forschern in den USA gelungen ist, die Ultraschallmethode bei Strömungsmessung mit Erfolg anzuwenden. Ganz allgemein gesprochen, ist das Problem der Strömungsmessung auch heute noch nicht befriedigend gelöst. Daher ist es verständlich, daß jede neu auftretende Meßmethode auf lebhaftes Interesse stößt.

Bei dieser Dissertation wurden folgende drei Hauptziele verfolgt:

1. Die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Strömungsmessung mittels Ultraschalls darzustellen.
2. Die bisherigen Veröffentlichungen und Beiträge auf diesem Gebiet kritisch zu untersuchen.
3. Die theoretisch begründeten Beziehungen durch eigene Versuche experimentell zu unterbauen und, wenn möglich, ein praktisch brauchbares Meßverfahren zu entwickeln, wobei besonders die erreichbare Genauigkeit beachtet werden sollte.

In erster Linie bin ich Herrn Prof. Hans Gerber für seine wohlwollende und großzügige Unterstützung, die mir auch von seinem Institut besonders bei der Durchführung der Versuche entgegengebracht wurde, zu besonderem Dank verpflichtet.

Der elektronische Teil der Meßapparatur konnte mit Hilfe der Abteilung für industrielle Forschung (AFIF) des Institutes für technische Physik an der ETH in sehr kurzer Zeit entwickelt werden, wobei mir Herr Dipl. El. Ing. A. Mandozzi auch in schwierigen Momenten immer zur Seite stand. Herrn Prof. Ernst Baumann, der verständnisvoll diese fruchtbare Zusammenarbeit ermöglichte, sowie Herrn Mandozzi sei daher sehr gedankt.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1. Problemstellung</b>	<b>1</b>
1.1 Wasserturbinen	1
1.2 Flußmessungen	2
1.3 Aufgabe	2
<b>2. Theoretischer Teil</b>	<b>2</b>
2.1 Prinzip der Ultraschallmessung	2
2.2 Physikalische Grundlagen	3
2.3 Ableitung der Grundgleichungen	4
2.4 Prinzipielle Möglichkeiten der Messung	6
2.4.1 Direkte Laufzeitmessung	6
2.4.2 Direkte Laufzeitdifferenzmessung	6
2.4.3 Phasendifferenzmessung	7
2.5 Geschichtlicher Rückblick	7
2.6 Einflüsse der verschiedenen Meßgrößen	11
2.6.1 Einflüsse während der Messung	11
2.6.2 Fehlerrechnung für Ultraschall-Phasenmessung	11
2.7 Diskussion der bisherigen Ultraschall-Arbeiten	13
<b>3. Experimenteller Teil</b>	<b>13</b>
3.1 Begründung einer Neuentwicklung	13
3.2 Prinzip des neu entwickelten Ultraschall-Meßverfahrens	13
3.3 Erzeugung und Empfang des Ultraschalles	17
3.3.1 Bestimmung der günstigsten Trägerfrequenz	17
3.3.2 Art und Material des Ultraschallgebers	18
3.3.3 Technische Ausführung des Ultraschallgebers	19
3.3.4 Schallfeldgrößen	19
3.3.5 Abstrahlung des Schallsenders	20
3.4 Elektronische Meßapparatur	21
3.4.1 Allgemeiner Aufbau	21
3.4.2 Impulssender	21
3.4.3 Zwei-Kanalverstärker	22
3.4.4 Mixer	23
3.4.5 Stabilisierungsfragen	24
3.5 Meßtechnische Probleme	24
3.5.1 Hydraulische Meßeinrichtung	24
3.5.2 Anordnung der Geber	25
3.5.3 Einbau und Verkleidung der Geber	26
3.5.4 Anordnung der elektronischen Apparate	28
3.5.5 Meß-, Kontroll- und Registriermöglichkeiten	28
3.6 Durchführung der Versuche	29
3.6.1 Allgemeines	29
3.6.2 Vorversuche mit offenen Meßeinbauten	30
3.6.3 Beschreibung einer vollständigen Messung	30
3.6.4 Fehlerrechnung	31
3.6.5 Hauptversuche mit abgedeckten Gebern	32
3.6.6 Versuche mit ausgeprägter Bodenwelle	34
3.6.7 Versuche bei Seitenströmung	36
3.6.8 Versuche mit Bodenströmung	38
3.6.9 Zusammenfassende Betrachtungen der Versuchsergebnisse	38
<b>4. Meßversuche in der Wasserkraftanlage Peccia</b>	<b>39</b>
4.1 Versuchsergebnisse	40
<b>5. Ausblick</b>	<b>40</b>
5.1 Wasserturbinen	40
5.2 Flußmessungen	40
5.3 Andere Gebiete	40
Symbole	41
Literaturverzeichnis	42

# Geschwindigkeits- und Mengenmessung strömender Flüssigkeiten mittels Ultraschalls

Carlos Knapp

## ZUSAMMENFASSUNG

*Im ersten, theoretischen Teil dieser vorliegenden Arbeit werden die physikalischen Grundlagen sowie die verschiedenen Möglichkeiten, mittels Ultraschalls Strömungsgeschwindigkeiten zu messen, eingehend besprochen. Im weiteren werden die Hauptgleichungen für die verschiedenen technisch möglichen Verfahren abgeleitet und diskutiert. Nach einem geschichtlichen Rückblick werden die Voraussetzungen für die Entwicklung einer neuen Meßmethode dargelegt.*

*Im zweiten, experimentellen Teil wird die neu entwickelte Methode der Strömungsmessung mittels Ultraschalls besprochen. Dabei wird besonders auf die Ultraschall-, die elektronischen und die meßtechnischen Probleme eingegangen.*

*Es wurden im Labor Versuche in einem rechteckigen Kanal von 1 m Breite in einem Geschwindigkeitsbereich von  $v = 0,06$  bis  $0,9$  m/s durchgeführt. Die Abweichungen der so gemessenen sekundlichen Wassermengen blieben im Vergleich mit Werten, welche mit sehr genauen herkömmlichen Meßmethoden erzielt wurden, auch bei ausgeprägter Seitenströmung bzw. Bodenströmung, bis auf wenige begründete Ausnahmen, in einem Bereich von  $\pm 0,4\%$ .*

*Weiterhin konnte erstmals eine Anlagemessung in der Wasserkraftanlage Peccia an einer Pelton-Gruppe von 24500 kW bei einer Wassermenge bis zu  $8,0$  m<sup>3</sup>/s durchgeführt werden. Die Abweichungen der mittels dieser neuen Ultraschallmethode gemessenen sekundlichen Wassermengen von den gleichzeitig durchgeführten Flügelmessungen lagen mit  $+ 0,3$  bis  $+ 0,8\%$  größtenteils in der Auswertegenauigkeit solcher Messungen. Die thermodynamisch errechneten Werte ergaben  $0,3$  bis  $0,8\%$  kleinere Werte im Vergleich zu den Flügelmessungen.*

*Es wird näher erläutert, daß bei diesem Ultraschallverfahren keine Eichung der Meßeinrichtung notwendig ist und es außerdem nicht erforderlich ist, bei ruhender Flüssigkeit die Apparatur zu prüfen. Die ganze Meßeinrichtung kann außerhalb der Strömung angeordnet werden, wodurch die zu messende Strömung vollkommen unbeeinflusst bleibt.*

*Weiterhin wird durch eine Koinzidenz-Methode eine integrierende Messung auch über längere Zeiträume ermöglicht, was bei schwankenden Strömungsverhältnissen eine gute Mittelwertbildung gewährleistet.*

*Die Arbeit ist durch eine Auswahl von Fotoaufnahmen des Verfassers ergänzt.*

## 1. Problemstellung

Es gibt eine große Anzahl Methoden, die mittlere Geschwindigkeit strömender Flüssigkeiten im Meßquerschnitt und damit die durchfließende Menge zu bestimmen. Trotz dieser Vielfalt wird für mehrere Anwendungsgebiete nach neuen Meßmöglichkeiten gesucht, die besser die gestellten Anforderungen erfüllen, z. B. Meßdurchführung mit größerer Genauigkeit, leichterer Einbau, keine Behinderung der Strömung beim Meßvorgang, einfache Ablesung bzw. Aufzeichnung der Meßresultate, schnelle und möglichst direkte Auswertung mit entsprechend niedrigen Kosten.

### 1.1 Wasserturbinen

Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete einer derartigen Strömungsmessung ist im Wasserturbinenbau gegeben, wo zur Bestimmung des Turbinenwirkungsgrades die Ermittlung der sekundlichen Durchflußmenge Voraussetzung ist.

Bei kleineren Wassermengen kommen Behälter-, Überfall- und — wo sich solche Einbauten nicht verwirklichen lassen — Flügelmessungen in Frage [1]. Bei größeren Wassermengen, wie sie in Nieder- und Mitteldruckanlagen auftreten, kommt heute in Europa meistens nur die Flügelmessung zur praktischen

Anwendung. Von den übrigen Meßverfahren (Gibson-, Allen-Methode, Mischverfahren, Thermodynamische Methode) hat sich bei uns bisher noch keine durchsetzen können. Lediglich die in Frankreich entwickelte Thermodynamische Methode [2], mit der gute Ergebnisse erzielt wurden, stößt auf größeres Interesse. Allerdings ist sie vorläufig nur für Fallhöhen über 100 m verwendbar. Die meist gebrauchte Flügelmessung ist, bei richtiger Durchführung, genügend genau, doch leider bedingt sie besonders bei großen Querschnitten langwierige Vorbereitungen und Auswertungen, wodurch der materielle Aufwand sehr oft untragbar wird. Abgesehen davon können bei einigen modernen Anlagen aus wirtschaftlichen Erwägungen vielfach die für Flügelmessungen notwendigen Einbaubedingungen nicht mehr eingehalten werden, so daß solche Messungen auch mit Komponentenflügeln recht problematisch werden.

Aber nicht nur bei Abnahmeversuchen, sondern auch als fest eingebaute Kontrolleinrichtung mit Einbauten, die alle außerhalb des Strömungsquerschnittes angebracht werden können, erscheint die Ultraschallmethode geeignet, um z. B. die günstigste Leit- und Laufradeinstellung bei Kaplan-turbinen im gesamten Fallhöhenbereich zu ermitteln, oder um bei Großanlagen mit mehreren Einheiten die günstigste Lastverteilung einzustellen und damit die optimale Gesamtleistung zu erzielen [3].

## 2 1. 2 Flußmessungen

Für Messungen in Flüssen mit veränderlichem Rückstau — ein Fall, der ja heute durch die fortschreitende Ausnützung aller Wasserkräfte immer häufiger vorliegt — wird, wie von maßgebenden Kreisen [4] betont wird, nach einem geeigneten Verfahren gesucht, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. Die üblicherweise durchgeführten Pegelmessungen stehen bei veränderlichem Rückstau in keiner eindeutigen Beziehung zur Abflußmenge mehr, so daß hier neue Meßverfahren erforderlich sind.

### 1. 3 Aufgabe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die verschiedenen Möglichkeiten, mittels Ultraschall Strömungsgeschwindigkeiten zu bestimmen, theoretisch untersucht. Weiterhin konnte ein neues Verfahren entwickelt werden, bei dem besonderer Wert auf große Genauigkeit gelegt wurde.

Die Hauptversuche mit dieser neuen Methode wurden im Meßkanal des Institutes für hydraulische Maschinen und Anlagen an der ETH durchgeführt. Die gefundenen Beziehungen und Versuchsergebnisse gelten unter gewissen Einschränkungen auch für andere Querschnittsformen und andere Flüssigkeiten.

Als Abschluß konnte in der Anlage Peccia bei Locarno (Maggia-Kraftwerke) ein Großversuch mit gutem Erfolg durchgeführt werden.

## 2. Theoretischer Teil

### 2. 1 Prinzip der Ultraschall-Strömungsmessung

Es sei vorerst nur das ebene Problem betrachtet (Bild 1)\*.

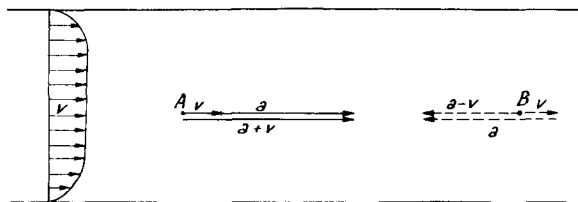


Bild 1. Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines in gleicher und eines in entgegengesetzter Richtung gesendeten Ultraschall-Signales.

Ein Ultraschall-Signal werde von A nach B in einer Flüssigkeit gesendet. Ruht dieses Medium, dann wandert dieses Signal mit Schallgeschwindigkeit  $a$  von A nach B. Strömt die Flüssigkeit in der gleichen Richtung mit der Geschwindigkeit  $v$ , so ist die resultierende Geschwindigkeit  $v + a$ ; das Signal erreicht also B früher als bei ruhender Flüssigkeit. Wird von B nach A gesendet, also gegen die Strömungsrichtung, so ist unter gleichen Voraussetzungen die resultierende Geschwindigkeit  $v - a$ , d. h., das Signal braucht logischerweise gegen die Strömung länger als mit der Strömung. Die Zeitdifferenz dieser Laufzeiten ist ein Maß für die Geschwindigkeit  $v$ .

In einer begrenzten Strömung wird sich, bedingt durch Wandreibung, Trägheitskräfte, äußere Störungen

usw. irgend eine beliebige stationäre Strömungsverteilung einstellen. Ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ermittelt, dann kann das sekundliche Flüssigkeitsvolumen bestimmt werden.

Mittels Ultraschall kann dieses Ziel durch folgende allgemeine Anordnung erreicht werden:

Eine Meßstrecke AB wird unter einem Winkel  $\beta$  zur Strömungsrichtung gewählt (Bild 2).

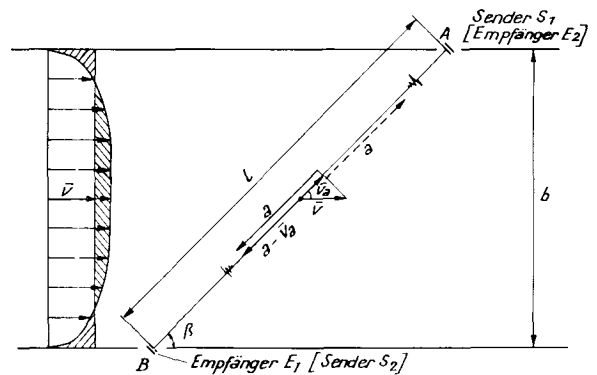


Bild 2. Prinzipielle Anordnung, um in begrenztem Querschnitt mittlerer Strömungsgeschwindigkeit mit Ultraschall zu messen. Sender S und Empfänger E, meistens piezoelektrische Kristalle, auch Geber genannt, werden vorläufig vereinfacht als punktförmig betrachtet.

Vom Sender A gehe ein Signal nach Empfänger B und gleichzeitig oder abwechselnd von B als Sender ein Signal nach A als Empfänger.  $v_a$  sei die Projektion von  $v$  auf die Meßstrecke. Wenn von A nach B, also schräg gegen Strömungsrichtung gesendet wird, so gilt

$$a - \bar{v}_a = \frac{l}{t_1}, \quad \text{wobei } \bar{v}_a = \bar{v} \cdot \cos \beta \text{ ist}$$

und wenn von B nach A, also schräg mit Strömungsrichtung gesendet wird, so gilt

$$a + \bar{v}_a = \frac{l}{t_2}. \quad \text{Durch Subtraktion erhält man}$$

$$\bar{v} = \frac{l}{2 \cos \beta} \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

Aus der Zeitdifferenz  $\Delta t$  der beiden Laufzeiten  $t_1$  und  $t_2$  schräg gegen und mit der Strömung läßt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  — wie später noch begründet — berechnen.

Auf den ersten Blick scheint es möglich, eine Ultraschall-Messung mit einem Sender und einem Empfänger (also nur einem Kanal) durchführen zu können. Wie später (2.61) gezeigt wird, genügen z. B. minimale Temperaturschwankungen, um die Schallgeschwindigkeit so zu verändern, daß die dadurch entstehende Zeitdifferenz  $\Delta t_a$  größer als die zu messende Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  werden kann, was eine Messung problematisch macht. Schon bei den ersten Versuchen wurden daher 2 getrennte Kanäle verwendet, um in beiden Richtungen gleichzeitig zu senden. Dadurch wirken sich Änderungen des Mediums auf beide Signale gleich aus, und die gemessene Zeit- bzw. Phasendifferenz bleibt unbeeinflusst.

\*) Erläuterung der verwendeten Symbole siehe S. 41

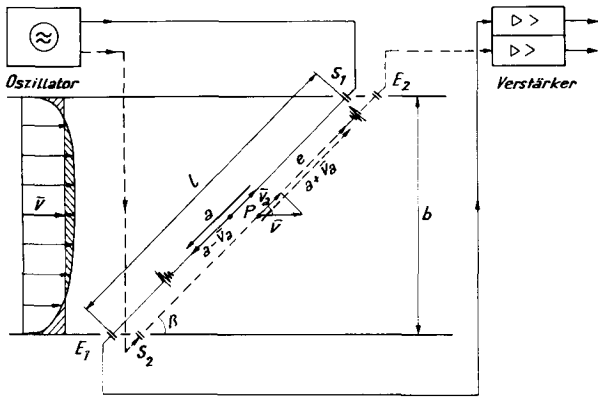


Bild 3. Ultraschall-Strömungsmessung nach dem 2-Kanal-System.

Die gleiche Wirkung kann nach dem Vorschlag von Swengel [17] auch mit nur einem Kanal erzielt werden, wenn die Senderichtung in kurzen Abständen gewechselt wird, also der Empfänger  $E_1$  dann zum Sender  $S_2$  und umgekehrt wird. Dies ist praktisch durch Ausnützung des reversiblen magnetostriktiven oder piezoelektrischen Effektes durchführbar. Voraussetzung ist hier allerdings, daß die Änderungen im Medium so langsam geschehen, daß wenigstens einmal in jeder Richtung innerhalb einer Änderungsperiode gemessen werden kann.

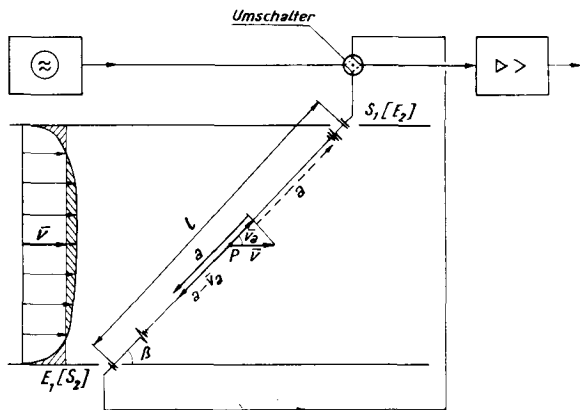


Bild 4. Ultraschall-Strömungsmessung mit nur einem Kanal und schnellem Wechseln der Senderichtung.

Auch können — allerdings nur bei Impulsbetrieb — beide Geber gleichzeitig als Sender arbeiten und nach Ausstrahlung des Signals blitzschnell umgeschaltet werden, so daß sie dann als Empfänger wirken, wenn das Signal des anderen Senders ankommt.

### 2. 1 1 Analogie

Man kann sich diesen Vorgang vereinfacht etwa so vorstellen: Eine Fähre (Signal) überquere einen Fluß unter einem konstanten Winkel  $\beta$  zur Strömung. Die Antriebsgeschwindigkeit wird als konstant vorausgesetzt. Erfolgt dies in Strömungsrichtung, dann addiert sich die Flußströmungsgeschwindigkeit  $\vec{v}$  (vektoriell) zur Schiffsgeschwindigkeit  $\vec{a}$ . Dies bedeutet, daß einerseits die resultierende Schiffsgeschwindigkeit um die Komponente  $v_a$  in Fahrtrichtung von  $a$  vergrößert wird, wodurch sich die Über-

querungszeit  $t_2$  verkürzt und andererseits das Schiff um die Strecke  $v \cdot t_2$  abgetrieben wird. Überquert die Fähre in der entgegengesetzten Richtung den Fluß, dann tritt aus den gleichen Gründen eine Vergrößerung der Überquerungszeit  $t_1$  und eine Abtrift um  $v \cdot t_1$  ein. Die Differenz der beiden Überquerungszeiten  $t_1$  und  $t_2$  ermöglicht, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den durchfahrenen Wasserschichten zu bestimmen.

Damit die Analogie vollkommen sei, müßte die Fähre zu einem masselosen Mediumteilchen zusammenschrumpfen und sich mit Schallgeschwindigkeit durch das Wasser bewegen. Es ist einleuchtend, daß dann sowohl die zeitliche Differenz zwischen  $t_1$  und  $t_2$  als auch die örtliche Abtrift sehr klein werden.

### 2. 1 2 Einschränkung

Für alle weiteren Betrachtungen wird vorausgesetzt, daß die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums sehr klein im Verhältnis zur Schallgeschwindigkeit ist. Für die Meßprobleme in der Hydraulik trifft dies meistens zu, da Strömungsgeschwindigkeiten von höchstens 10 m/s der Schallgeschwindigkeit  $a_w$  im Wasser von ca. 1500 m/s gegenüberstehen.

$$\frac{v_a}{a_w} = \frac{v \cdot \cos \beta}{a_w} < \frac{10 \cdot 1}{1500} < 6,8 \cdot 10^{-3} \ll 1$$

$$\left(\frac{v_a}{a_w}\right)^2 < 4,6 \cdot 10^{-5} \ll 1$$

### 2. 2 Physikalische Grundlagen

Es sei hier die oben beschriebene Anordnung genauer betrachtet (Bild 5). Wieder sei vorläufig nur das ebene Problem behandelt.

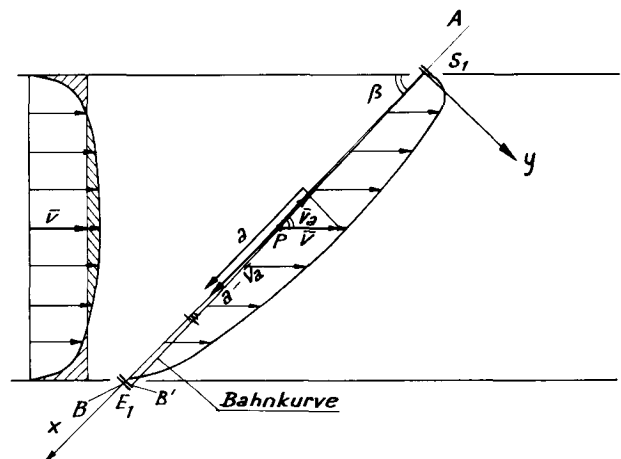


Bild 5. Prinzipielle Darstellung der Ultraschall-Messung zu Ableitung der Formeln.

In A sei ein piezoelektrischer Ultraschallgeber angeordnet. Wird nun an diesen ein elektrisches Signal geleitet, so wird durch den piezoelektrischen Effekt eine elastische Störung in die Flüssigkeit geschickt, die sich nach dem Huygens'schen Prinzip [5] und der Wellengleichung

$$(1) \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

von Molekül zu Molekül fortpflanzt.

- 4 Bei ruhender Flüssigkeit würde sich dieses Signal mit der Schallgeschwindigkeit des Mediums nach B bewegen.

Fließt nun aber die Flüssigkeit, und hat die zeitlich begrenzte stationäre Strömung eine beliebige kontinuierliche Geschwindigkeitsverteilung, so gelangt das Signal nach B' anstatt nach B. Das Signal beschreibt die Bahnkurve AB'.

Dies kann folgendermaßen erklärt werden:

Das Signal, das in einem ganz kurzen Wellenzug bis zu kontinuierlichen Wellen bestehen kann, entsteht dadurch, daß ein Mediumteilchen in Wellenausbreitungsrichtung — Schallwellen sind reine Longitudinalwellen — schwingt und diese elastische Störung an das nächste Mediumteilchen weitergibt. Bei kontinuierlichen Wellen laufen Verdichtung und Verdünnung in regelmäßigen Abständen hintereinander. Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Verdichtungen ist durch die Schallwellenlänge  $\lambda$  in der Flüssigkeit gegeben. Schaaf [6] fand allerdings, daß die Moleküle in Flüssigkeiten keineswegs nur elastische Stöße ausüben, aber dies soll hier nicht weiter verfolgt werden, weil es auf das Ultraschallprinzip ohne Einfluß bleibt. Wird nun dieses ganze Mediumteilchen gleichzeitig — also während der elastischen Störung — in einer bestimmten Richtung bewegt, so hängt die Störungs-Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht nur von der Schallgeschwindigkeit im Medium ab, sondern auch von der örtlichen Verschiebung des übertragenden Flüssigkeitsteilchens. Anders ausgedrückt: das ganze System verschiebt sich in einer konstanten Richtung, wobei die Verschiebungsgeschwindigkeit  $v$  eine Funktion des Ortes und damit auch der Zeit ist.

### 2. 1 1 Dopplersches Prinzip

Gerne wird dieses besprochene Verhalten eines Ultraschallstrahles beim Durchqueren einer Strömung mit dem Dopplerschen Prinzip in Verbindung gebracht. Nach Doppler gilt [7]:

Relativ zum Strahler ruhende und bewegte Beobachter nehmen verschiedene Frequenzen wahr. Diese Frequenzänderung ist aber noch davon abhängig, ob Strahler und Beobachter relativ zum Schallmedium bewegt sind. Nur im besonderen Falle, wenn zwischen Quelle und Empfänger relative Ruhe herrscht, ist die wahrgenommene Frequenz unabhängig von der Bewegung des Mediums. Es sei dies anhand einer Analogie erklärt:

Von einer Uferstelle an einem stationär fließenden Fluß starte jede Minute ein Motorboot und überquere diesen unter einem Winkel  $\beta$  zur Strömungsrichtung. Unabhängig von der Geschwindigkeitsverteilung werden die Boote — gleiche Antriebsleistung vorausgesetzt — mit einem Abstand von einer Minute am anderen Ufer eintreffen, d. h., die Bootsfrequenz bleibt unverändert; nur die Überquerungszeit wird vom Medium beeinflusst. Dies bedeutet, auf das Ultraschallprinzip übertragen, daß die Frequenz, mit der die Wellen in das Medium übertragen werden, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist, solange letztere stationär bleibt; es tritt also kein Doppler-Effekt auf.

### 2. 3 Ableitung der Grundgleichungen

In Bild 5 sei die vom Signal durchlaufene Bahnkurve AB' betrachtet. Die Koordinaten eines beliebigen Punktes P dieser Kurve seien in dem eingezeichneten Koordinatensystem  $x, y, z$  durch  $x(t), y(t)$  und  $z(t)$  dargestellt. Die Ableitung dieser Bahnkurve nach der Zeit ist ja nichts anderes als die jeweilige Signalgeschwindigkeit an einem beliebigen Punkt und ist ein zur Bahnkurve tangentialer Vektor  $R$  mit den Komponenten  $\dot{x}, \dot{y}$  und  $\dot{z}$ , und der absolute Betrag ist durch  $R = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$  gegeben. Die Komponenten sind:

$\beta'$  = mittlerer Winkel zwischen wirklicher Bahnkurve und Strömungsrichtung

$$(2) \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt} = a - v \cos \beta' = a - v_a$$

wenn  $v \cos \beta' = v_a$  ist

$$(3) \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt} = v \sin \beta'$$

$\dot{z} = 0$  da alles in der Ebene betrachtet wird.

Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ist eine Funktion des Ortes und damit der Zeit. Die Randbedingungen sind:

Im Punkt A  $x = 0 \quad t = 0$

Im Punkt B'  $x = l' \quad t = t_1'$

$l'$  = Weg von A nach B'

$t_1'$  = Signal-Laufzeit von A nach B'

Wie später gezeigt wird, bleibt  $\frac{BB'}{l} \ll 1$  solange  $\frac{v}{a} \ll 1$  ist, daher  $l \approx l'$  und  $\beta \approx \beta' \quad t_1 \approx t_1'$

Aus (2)  $dx = a dt - \cos \beta \cdot v dt$ ,  
integriert über der Meßstrecke

$$\int_0^{l_1} dx = a \int_0^{t_1} dt = \cos \beta \int_0^{t_1} v \cdot dt$$

$$l = a t_1 - \cos \beta \int_0^{t_1} v \cdot dt; \text{dividiert durch } t_1$$

$$(4) \quad \frac{l}{t_1} = a - \cos \beta \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} v \cdot dt$$

In (4) erscheint der Ausdruck  $\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} v \cdot dt$ , der sich

nach dem Mittelwertsatz der Integralrechnung durch den zeitlichen Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}(t)$  ersetzen läßt. Erwünscht wird nicht der zeitliche, sondern der örtliche Mittelwert

$$\bar{v} = \frac{1}{l} \int_0^l v \cdot dx$$

der Strömungsgeschwindigkeit im Meßquerschnitt.



Eine Substitution mit der Variablen  $x$  ergibt für ersteres Integral:

$$\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} v \cdot dt = \frac{1}{t_1} \int_0^l v \cdot \frac{dt}{dx} \cdot dx \quad \text{durch Ersetzen von } \frac{dt}{dx} \text{ aus Gleichung (2).}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_1} \int_0^l \frac{v}{a - v \cdot \cos \beta} dx &= \frac{1}{t_1} \int_0^l \frac{v}{a} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v \cdot \cos \beta}{a}} \cdot dx = \\ &= \frac{1}{t_1} \int_0^l \frac{v}{a} \cdot \left[ 1 + \frac{v \cdot \cos \beta}{a} - \left( \frac{v \cdot \cos \beta}{a} \right)^2 + \dots \right] dx \end{aligned}$$

Beim Ausmultiplizieren dieser Reihenentwicklung darf laut Einschränkung  $\left(\frac{v}{a}\right)^2 \ll 1$  die Größe zweiter Ordnung vernachlässigt werden, so daß folgende Vereinfachung zulässig ist:

$$(5) \quad \frac{1}{t_1 \cdot a} \int_0^l v \cdot dx$$

Der genaue Verlauf der Funktion  $v(x)$ , also das Geschwindigkeitsprofil, ist unbekannt; sicher ist nur, daß diese Funktion im Intervall 0 bis  $l$  stetig ist. Folglich gibt es nach dem erwähnten Mittelwertsatz der Integralrechnung einen Wert  $\bar{v}$ , der folgende Gleichung erfüllt (Bild 6):

$$\int_0^l v \cdot dx = \bar{v} \int_0^l dx = \bar{v} \cdot l$$

wobei  $\bar{v}$  der gesuchte örtliche Mittelwert der Geschwindigkeit auf der Meßstrecke ist.

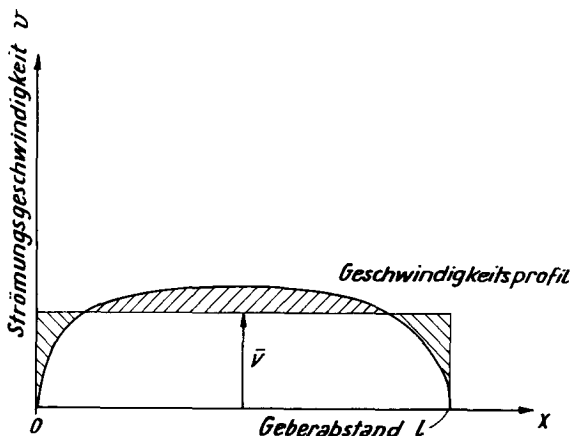


Bild 6. Graphische Darstellung der mittleren örtlichen Geschwindigkeit auf der Meßstrecke.

Aus Gleichung (4) kann vereinfacht geschrieben werden:

$$\frac{1}{t_1} = a - \Delta a$$

Durch Verwendung dieser beiden Beziehungen kann Ausdruck (5) umgewandelt werden:

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_1 \cdot a} \int_0^l v \cdot dx &= \frac{1}{t_1} \cdot \frac{\bar{v}}{a} = \\ &= \frac{a - \Delta a}{a} \cdot \bar{v} = \left( 1 - \frac{\Delta a}{a} \right) \cdot \bar{v} \end{aligned}$$

$$\text{und da } \frac{\Delta a}{a} = \frac{\cos \beta \cdot v_{\max}}{a} \ll 1$$

laut Voraussetzung zulässig ist, kann der folgende Ausdruck in Gleichung (4)

$$\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} v \cdot dt \approx \bar{v}$$

d. h. durch die örtliche mittlere Geschwindigkeit ersetzt werden, so daß folgende vereinfachte Beziehung erhalten wird:

$$(6) \quad \frac{1}{t_1} = a - \cos \beta \cdot \bar{v} \quad \begin{array}{l} \text{Signal schräg gegen} \\ \text{Strömungsrichtung} \end{array}$$

Abtrift:

$$\text{Aus (3)} \quad \frac{dy}{dx} = v(t) \sin \beta \quad \text{integriert}$$

$$\int_0^y dy = \sin \beta \int_0^{t_1} v(t) \cdot dt \quad \text{und mit (5)}$$

$$(7) \quad y = \sin \beta \cdot t_1 \cdot \bar{v}$$

Diese Größenordnung der Abtrift  $BB'$  läßt sich nun berechnen (siehe Bild 5):

$$(8) \quad [m] BB' = y = \sin \beta \cdot t_1 \cdot \bar{v} < \frac{1}{a} \bar{v} [s] \cdot [ms^{-1}]$$

da  $t_1 \approx \frac{1}{a}$  ist, kann die Verschiebung  $BB'$  im Verhältnis zur Meßlänge  $l$  in % ausgedrückt werden:

$$\frac{BB'}{l} \cdot 100 < \frac{\bar{v}}{a} 100 [\%]$$

Beispiel: Für in der Hydraulik übliche Werte beträgt die Verschiebung  $BB'$  mit  $a = 1480$  m/s

$$v = 1 \text{ m/s} \quad BB' < \frac{1}{1480} \approx 0,07 \% \text{ von } l$$

$$v = 3 \text{ m/s} \quad BB' < \frac{3}{1480} \approx 0,21 \% \text{ von } l$$

$$v = 10 \text{ m/s} \quad BB' < \frac{10}{1480} \approx 0,7 \% \text{ von } l$$

Für Geschwindigkeiten  $v < 3$  m/s kann die Abtrift vernachlässigt werden. Bei  $v > 3$  m/s sollte diese für genaue Messungen bei der Auswertformel berücksichtigt werden. Bei der Messung selbst hat dies keinen großen Einfluß, da der vom Ultraschallgeber ausgehende Strahlkegel meistens noch so groß sein wird, daß der Empfänger trotz Abtrift vom Signal erreicht wird. Es sei in diesem Zusammenhang erwähnt, daß diese allgemein vernachlässigte Abtrift auch zu Strömungsmessungen herangezogen werden kann; siehe Bild 14 und [27].

### 2. 3 1 Umkehrung der Senderichtung

Wird nun die Senderichtung des Ultraschallstrahles umgekehrt, also in Bild 3 von B nach A gesendet, dann werden folgende analoge Beziehungen zu (6) und (7) erhalten:

$$(9) \quad \frac{l}{t_2} = a + \cos \beta \cdot \bar{v} \quad \text{Signal schräg mit der Strömungsrichtung}$$

$$(10) \quad y = \sin \beta \cdot t_2 \cdot \bar{v}$$

Aus diesen Grundgleichungen lassen sich die verschiedenen Meßmöglichkeiten entwickeln.

## 2.4 Prinzipielle Möglichkeiten der Messung

### 2.4.1 Direkte Laufzeitmessung

Ob ein Zwei- oder Einkanalssystem, immer gilt folgende Beziehung, die durch Subtraktion der Gleichung (6) von (9) entsteht:

$$(11) \quad \bar{v} = \frac{l}{2 \cos \beta} \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

Die Schallgeschwindigkeit ist damit herausgefallen, es bleiben nur noch geometrische — leicht zu messende — Größen in den Formelkoeffizienten.

Durch direktes Messen der beiden Laufzeiten  $t_1$  und  $t_2$  kann grundsätzlich  $\bar{v}$  bestimmt werden.

### 2.4.2 Direkte Laufzeitdifferenzmessung

Anstatt  $t_1$  und  $t_2$  direkt zu messen, ist auch eine Bestimmung von  $t_1 - t_2 = \Delta t$  grundsätzlich möglich. Die Umrechnungsformel kann ebenfalls aus den Gleichungen (6) und (9) abgeleitet werden, wobei  $\bar{v} \cdot \cos \beta$  durch  $\bar{v}_a$  ersetzt wird.

$$\text{aus (6)} \quad t_2 = \frac{l}{a + \bar{v}_a} \quad \text{aus (9)} \quad t_1 = \frac{l}{a - \bar{v}_a}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = l \left( \frac{1}{a - \bar{v}_a} - \frac{1}{a + \bar{v}_a} \right)$$

$$\Delta t = \frac{2 l \bar{v}_a}{a^2 \left( 1 - \frac{\bar{v}_a^2}{a^2} \right)}$$

Da vorausgesetzt wurde, daß  $\left( \frac{\bar{v}_a}{a} \right)^2 \ll 1$  ist, vereinfacht sich der Ausdruck und unter Berücksichtigung der Beziehung  $\bar{v}_a = \cos \beta \bar{v}$  erhält man, nach  $\bar{v}$  aufgelöst, folgende Formel:

$$(12) \quad \bar{v} = \frac{a^2}{2 l \cdot \cos \beta} \Delta t$$

Leider erscheint in dieser Formel die Schallgeschwindigkeit  $a$ , welche unter gewissen Bedingungen nicht genügend genau bestimmt werden kann. Bild 7 zeigt graphisch die Beziehung der Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  und der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  mit dem Geberabstand  $l$  als Parameter bei  $\beta = 45^\circ$  in Wasser von ca.  $18^\circ \text{C}$ .

Beispiel: für  $v = 1 \text{ m/s}$  bei  $l = 3 \text{ m}$  wird  $\Delta t \approx 3 \mu\text{s}$

### Wasserturbinen

Bei Messungen in Turbinenanlagen wird angestrebt, Geschwindigkeiten in der Größenordnung bis  $v = 0,2 \text{ m/s}$  noch mit einer Genauigkeit von  $0,4\%$  messen zu können. Bei  $l = 3 \text{ m}$  z. B. müßte der ver-

wendete Kurzzeitmesser eine Meßunsicherheit von weniger als  $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  haben.

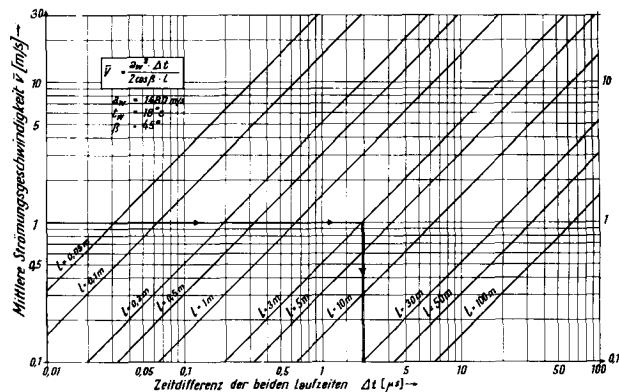


Bild 7. Nomogramm zur Bestimmung der Größenordnung von  $\Delta t$  in Funktion der Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  und des Geberabstandes, gültig für Wasser.

Elektronische Kurzzeitmesser z. B. mit einer Taktfrequenz von  $4 \text{ MHz}$  messen noch Zeitintervalle von  $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ , für vorliegende Aufgabe nicht ausreichend. Mit Spezialgeräten, die nach dem Verfahren der verzögerten Koinzidenz arbeiten, gelingt es heute, bis zu  $0,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  zu messen. Ähnliche Probleme treten in der Kernphysik auf, doch der Aufwand einer solchen Meßeinrichtung macht eine Verwendung hier illusorisch.

### Versuch einer Laufzeitdifferenzmessung

Um das Bild abzurunden, soll in kurzen Zügen noch ein Experiment skizziert werden, das mit einem Siemens-Impulsgerät II durchgeführt wurde. Mit diesem eigentlich für zerstörungsfreie Werkstoffprüfung entwickelten Gerät wurde folgendes Meßverfahren — unter 2.1 angedeutet — versucht:

Von dem HF-Sender wird an jeden schräg gegenüber im Kanal liegenden Geber ein kurzer modulierter Impuls geleitet. Jeder der beiden gleichzeitig gestarteten Impulse überquert die Meßstrecke und trifft am anderen Geber ein, der inzwischen mit dem Verstärker elektrisch verbunden wurde und so als Empfänger arbeitet. Werden die empfangenen Impulse z. B. mit einem Kathodenstrahloszillographen betrachtet, so muß sich bei einer gewissen Strömung  $v$  zwangsläufig ein zeitlicher Abstand  $\Delta t$  zwischen den beiden Signalen einstellen.

Dieser Versuch wurde bei  $v = 1,5 \text{ m/s}$  in einem Meßgerinne der Versuchsanstalt der Firma J. M. Voith GmbH., Heidenheim (Brenz), durchgeführt, wobei der Geberabstand  $l = 3,2 \text{ m}$  und der Meßwinkel  $\beta = 45^\circ$  betragen. Nach Formel (12) ergibt sich theoretisch  $\Delta t = 3 \mu\text{s}$ .

Da das Auflösungsvermögen dieses Gerätes bei  $1 \mu\text{s}$  liegt, konnte am KO-Schirm gerade die Trennung der beiden Signale beobachtet werden.

Leider ist es noch nicht möglich, dieses Auflösungsvermögen wesentlich zu steigern, so daß mit den bis jetzt zur Verfügung stehenden Mitteln sowohl ein direktes Messen der Laufzeitdifferenz als auch der beiden Laufzeiten nicht möglich ist.

### 2.4.3 Phasendifferenzmessung

Bei den großen Schwierigkeiten, eine direkte Zeit- und Zeitdifferenzmessung durchzuführen, wurde von fast allen bisherigen Forschern das Phasendifferenzverfahren verwendet, mit dem eine Messung dieser kleinen Zeitdifferenzen indirekt möglich ist. Bei diesem Verfahren werden kontinuierliche Sinusspannungen von einem quarzgesteuerten Hochfrequenz-Generator an die beiden Ultraschall-Geber abwechselungsweise oder, bei zwei Kanälen, gleichzeitig gesendet, wobei sie als longitudinale Sinuswellen die Flüssigkeit durchheilen (Bild 8, siehe auch Bild 5 und 6).

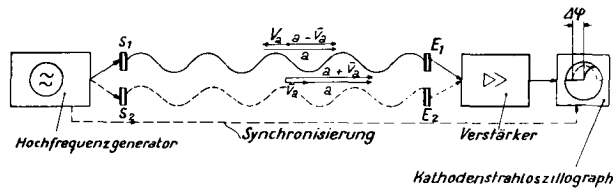


Bild 8. Prinzip der Phasendifferenzmessung.

Wird gegen die Strömung gesendet, so stellt sich der gleiche Schwingungszustand am Empfänger später ein als wenn in Strömungsrichtung gesendet wird; es entsteht somit eine Phasendifferenz. Die Sendefrequenz  $f$  wird nun so gewählt, daß diese Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  bei  $\bar{v}_{\max}$  innerhalb einer Wellenlänge  $\lambda$  bleibt. Dann gilt:

$$\frac{\Delta\varphi}{360} = \frac{\Delta t}{T} = f \cdot \Delta t \quad \begin{array}{l} \Delta t = \text{Differenz der Laufzeiten [s]} \\ T = \text{Schwingungsperiode [s]} \end{array}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{360 \cdot f}, \text{ eingesetzt in (12)}$$

(13)

$$\bar{v} = \frac{a^2}{l \cdot f \cdot \cos\beta \cdot 720} \cdot \Delta\varphi$$

$\bar{v}$  = mittl. Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$a$  = Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit [m/s]

$\Delta\varphi$  = Phasendifferenz, wenn in beiden Richtungen gesendet wird [°]

$l$  = Geberabstand [m]

$f$  = Schwingungsfrequenz [Hz]

$\beta$  = Winkel Senderichtung zu Strömungsrichtung [°]

Bild 9 gibt einen Überblick über die günstigste Sendefrequenz in Wasser, wobei eine Phasenverschiebung von  $\Delta\varphi = 180^\circ$  und ein Sendewinkel  $\beta = 45^\circ$  zu Grunde gelegt wurde.

Beispiel:  $v = 1$  m/s und  $l = 1,5$  m ergibt eine Sendefrequenz von etwa  $f = 500$  kHz.

Die von einigen Forschern verwendeten Werte sind in Bild 9 vergleichshalber eingetragen. Unterschiede erklären sich daraus, daß manche Phasensmesser nur bis  $90^\circ$  messen.

### 2.5 Geschichtlicher Rückblick

Schon 1851 beschäftigten sich Fizeau und Michelson-Morely mit einem Verfahren, dem ein ultraschallähnliches Prinzip zu Grunde lag. Fizeau bestimmte optisch die Änderung der Lichtgeschwindigkeit in fließendem Wasser, indem er einen mit der Strömung und einen gegen die Strömung gesendeten Strahl verglich [8].

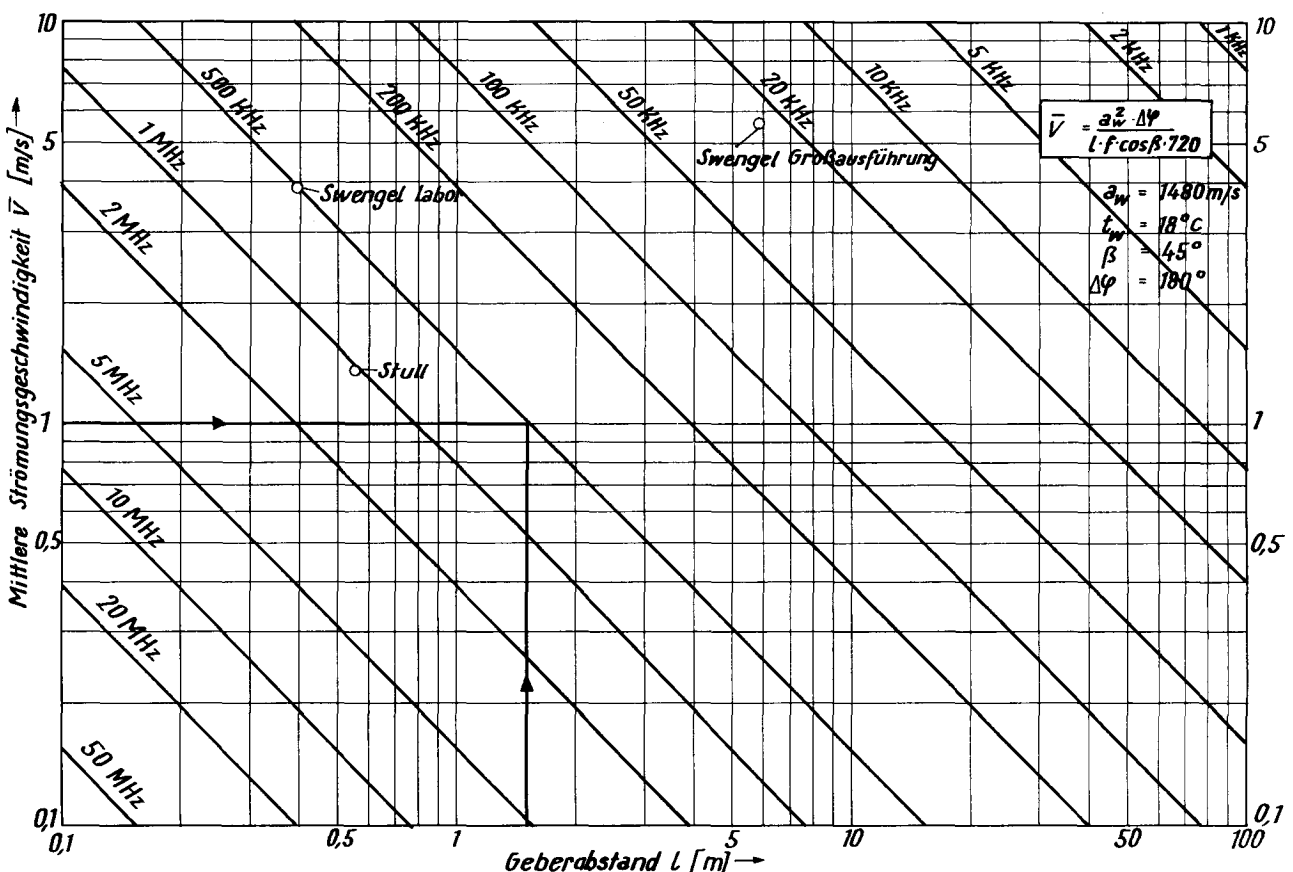


Bild 9. Nomogramm zur Bestimmung der günstigsten Schwingungsfrequenz in  $f$  ( $l$  und  $\bar{v}$ ) für Phasemessung im Wasser.

8 Als erster hat wohl Rütten [9] 1928 mit Ultraschall mittlere Geschwindigkeiten in Wasserströmungen gemessen (Bild 10). Gray [10] ließ sich 1950 ein ähnliches Meßverfahren patentieren. Bei diesen beiden Verfahren wurde von einem in der Mitte an-

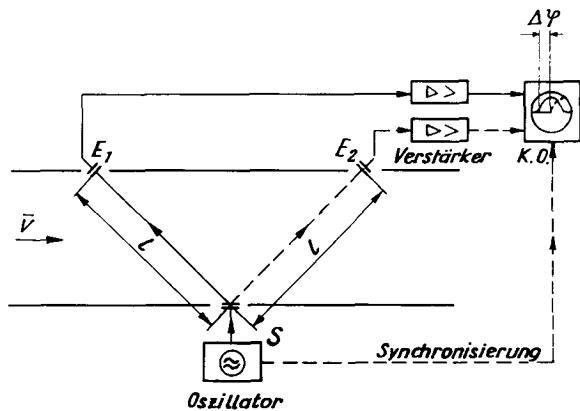


Bild 10. Ultraschall-Meßanordnung, wie sie von Rütten und Gray verwendet wurde, mit einem gemeinsamen Sender.

geordneten Geber gleichzeitig an zwei auf der anderen Seite gleich weit entfernte Empfänger  $E_1$  und  $E_2$  eine Sinuswelle geschickt. Sproule [11] arbeitete 1943 mit zwei Kanälen, d. h. mit zwei Sendern und zwei Empfängern. Dabei werden von einem gemeinsamen Oszillator gleichzeitig auf beide Kanäle Sinusschwingungen gegeben und die Phasenverschiebung ähnlich wie von Gray und Rütten gemessen. Die erreichbare Genauigkeit hängt bei diesen Versuchsanordnungen in erster Linie von der Übereinstimmung der beiden Geberabstände sowie von der Abstimmung der beiden Verstärker ab. Diese Versuche wurden aber nicht weiterverfolgt.

Kurz seien noch einige diesbezügliche Patentanmeldungen gestreift. A. Fiorenzi [12] erhielt den Patentschutz 1931 in Italien auf ein Verfahren, die Geschwindigkeit strömender Medien in geschlossenen Querschnitten, besonders in Druckrohrleitungen, zu bestimmen.

In USA ließ sich H. E. Harting 1935 einen Strömungsmesser [13] und 1939 einen Strömungsmesser mit einer Methode, Fließgeschwindigkeiten zu bestimmen [14], patentieren. T. Wolf [15] meldete 1942 ein Gerät zur Messung von Luftgeschwindigkeiten mittels Ultraschalls zum Patent an. N. J. Cafarellé wurde 1943 für einen Strömungsmesser auf dem Ultraschall-Prinzip ein Patent in USA erteilt [16.]

Bei allen bisher erwähnten Arbeiten wurden immer zwei Kanäle verwendet, was schon bei minimalen Geberabstandsdifferenzen zu verfälschten Resultaten führen muß, wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden.

Es scheint, daß R. C. Swengel [17] 1950 der erste war, der auf die Idee kam, in kurzen Abständen die Senderichtung zu wechseln und dadurch mit nur zwei Gebern, d. h. einem Kanal auszukommen, wodurch viele störende Nebenfaktoren ausgeschaltet werden konnten.

H. P. Kalmus [8 und 49] benützte 1953 ein ähnliches Verfahren, um in Plastik-Rohrleitungen mit zwei 10 cm voneinander entfernten Bariumtitanat-

kristallen Geschwindigkeiten von 1000 mm/s bis zu nur 1 mm/s zu messen. Die Senderichtung wurde 100 mal in der Sekunde gewechselt. Es sollen auch in den unteren Bereichen noch Genauigkeiten von 2 % erreicht worden sein, was bei den kleinen Geschwindigkeiten beachtenswert ist. Als Nachteil dieser elektronisch sehr sorgfältig durchdachten Meßanordnung nach dem Phasenprinzip muß die Notwendigkeit der Eichung mit einer anderen Wassermeßmethode betrachtet werden. K. S. Stull [18] berichtete 1955 über einen Ultraschall-Geschwindigkeitsmesser, mit dem in Fluß- und Meeresströmungen auch in gewissen Tiefen die örtlichen Geschwindigkeiten und ihre Richtungen automatisch gemessen und registriert werden können. Der Abstand der beiden Quarzkristalle beträgt 550 mm. Diese sind längs eines torpedoartigen Behälters angeordnet, in dem im wesentlichen folgende Apparate untergebracht sind: 1 MHz-Oszillator, Umschalter, Verstärker, Mischstufen- und Phasendifferenzmesser. Der Umschalter ermöglicht, die Senderichtung in kurzen Intervallen zu wechseln. In einem als Anker verwendeten faßähnlichen Behälter sind die Anzeige- und Registrierinstrumente sowie die als Stromquelle benützten Batterien untergebracht. Alle 30 Minuten schaltet eine Uhr selbständig die Apparatur ein, gerade lang genug, um die Geräte anzuheizen und eine Messung vorzunehmen. Die Meßresultate werden von einer auf Einzelbild geschalteten 8 mm Filmkamera mit Blitlicht fotografiert, so daß die ganze Meßeinrichtung nur einmal in der Woche zur Kontrolle und Ablesung an die Oberfläche geholt werden muß.

Zwischen den Arbeiten von Kalmus und Stull scheint insofern ein gewisser Zusammenhang zu bestehen, als beide, erstere allerdings nur teilweise, zu einem größeren amerikanischen Entwicklungsprogramm gehören, an dem die US-Marine maßgeblich beteiligt war.

## 2. 5 1 Räumliche Ultraschallmessung

Bei allen bisherigen Betrachtungen wurde nur das ebene Meßproblem behandelt. Die räumliche mittlere Geschwindigkeit konnte nur dort erfaßt werden, wo diese in eindeutiger Beziehung zur ebenen meßbaren Geschwindigkeit stand, z. B. in Rohrleitungen.

Es ist wieder ein Verdienst R. C. Swengels, mit dem gleichen schon erwähnten Patent [13] auch hierfür eine elegante Lösung vorgeschlagen zu haben. Bild 11 zeigt die Patentzeichnung.

Das besondere Merkmal auf der elektrischen Seite ist der Umschalter, mit dem in kurzen Abständen, z. B. alle 10 Sek., die Senderichtung umgekehrt wird. Der zweite noch wichtigere Unterschied zu dem bisherigen System ist die besondere Ausbildung und Anordnung der speziell von R. C. Swengel entwickelten Antennen-Geber [19]. Der eigentliche piezoelektrische Schwinger ist außerhalb der zu messenden Flüssigkeit an einem allmählich sich verjüngenden Metallstab [20, 21] befestigt. Durch diesen hornartigen Aufsatz kann die von Bariumtitanatkristall erzeugte Schwingungsamplitude im Stab bedeutend erhöht werden (Bild 12).

Bei der ersten Versuchsanordnung, die er 1950 zusammen mit W. B. Hess und S. K. Waldorf [22, 23] baute, wurden, wie aus Bild 11 und 12 ersichtlich,

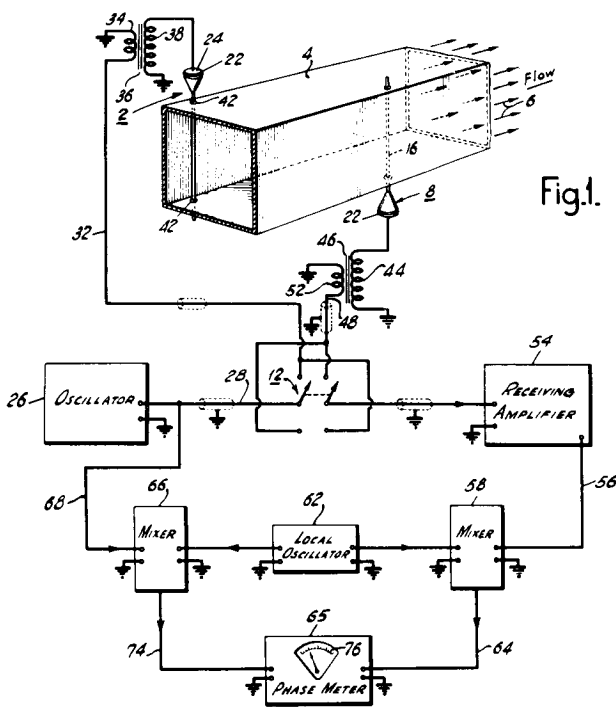


Bild 11. Ausschnitt aus der Patentzeichnung des Ultraschall-Strömungsmeßverfahrens mit Antennen-gebern nach Swengel.

die zwei gleichen antennenartigen Geber senkrecht an den beiden Wänden eines 12,7 cm hohen und 22,8 cm breiten Kanals angebracht, und zwar so, daß die Kristallschwinger einmal nach oben und einmal nach unten angeordnet waren (Trägerfrequenz nur 500 kHz). Durch diese Anordnung wird

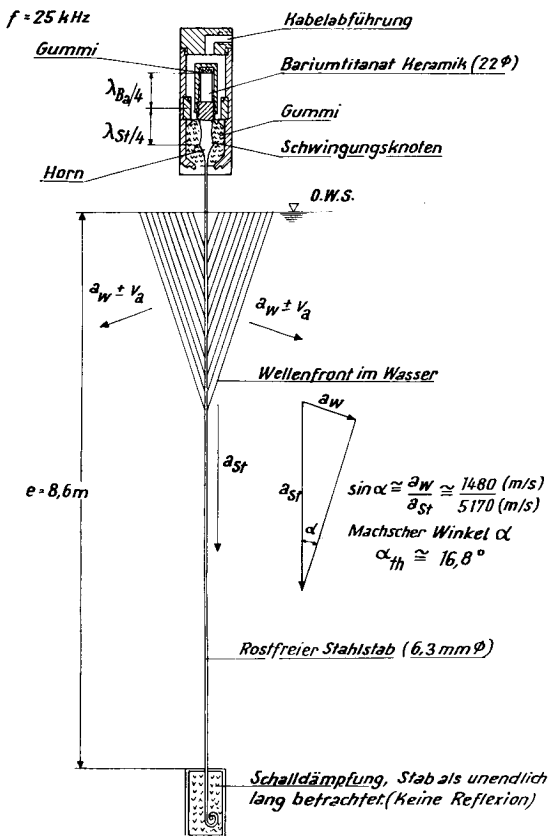


Bild 12: Antennen-Geber, wie sie von Swengel, Hess und Waldorf in dem Einlauf der Safe-Harbor-Kaplan-turbine eingebaut wurden.

erreicht, daß für jede elastische Störung der Weg von einem Kristall zum anderen gleich lang wurde. Jedes von Kristall 1 ausgelöste Signal pflanzt sich längs des Stabes 1 mit der dem Stahl entsprechenden Schallgeschwindigkeit  $a_{St}$  fort und löst in jedem Berührungspunkt mit der Flüssigkeit eine sich rasch ausbreitende Schallwelle aus, ähnlich der Kopfwellen eines mit Überschall fliegenden Düsenflugzeuges. Diese sich in der Flüssigkeit ausbildende kegelförmige Schallfront bildet mit dem Sender stets einen Winkel  $\alpha$ , wobei dann  $\sin \alpha = \frac{a_W}{a_{St}}$  [7 und 32] ist.

Der analoge 40 cm entfernte Empfängerstab wird dann von dieser Schallfront oben zuerst erreicht. Ruht die Flüssigkeit, dann ist es verständlich, daß alle Einzelsignale dieser Schallfront am Schluß gleichzeitig am Kristall 2 eintreffen. Bei Strömung treffen die Einzelsignale zeitlich verschieden am Kristall 2 ein. Die gesamte entstehende zeitliche Verschiebung des resultierenden Hauptsignals gibt ein Maß für die mittlere Geschwindigkeit im gesamten Querschnitt. Wird in beiden Richtungen in schnellem Wechsel gesendet, so kann mit Hilfe einer Phasendifferenzmessung bequem die mittlere Geschwindigkeit im ganzen Querschnitt gemessen werden. Als Nachteil dieser Anordnung, bei der die Stablängen ein gerades Vielfaches der Wellenlänge betragen, und daher als Resonanzschwinger arbeiten, müssen die störenden Reflexionen an Wänden und Boden in Kauf genommen werden.

Diese erste Versuchsanordnung wurde auf Wasserverschmutzung, Temperatureinfluß, lufthaltiges Wasser, Schrägströmungen und Meßwinkeleinfluß von Swengel, Hess und Waldorf untersucht.

Bei der Großausführung [22 bis 25], bei der 9 m lange Antennengeber in den rechteckigen Einlauf einer 31 200 kW-Kaplanturbine eingebaut wurden, sind diese nicht senkrecht an den Wänden befestigt, sondern so geneigt, daß die entstehende Schallfront sich genau senkrecht in der Meßebe durch die Wasserströmung bewegt. Die dadurch bedingte schräge Anordnung der Meßebe bewirkt, daß erstens die Ultraschall-Signale den gesamten Querschnitt des Turbineneinlaufes überstreichen, und zweitens jede störende Reflexion wirksam vermieden wird (Bild 13).

Außerdem sind die Stäbe so ausgeführt, daß sie schalttechnisch als unendlich lang, d. h. reflexionsfrei, angesehen werden können. Die Trägerfrequenz war 25 kHz. Es wurden mit diesem bemerkenswerten Verfahren Geschwindigkeiten von 0,6—2,4 m/s gemessen, wobei die erzielte Meßgenauigkeit um 1 % lag.

Kurz vor Beendigung dieser Arbeit erschien eine Abhandlung von Luciano Sani [26], in welcher die Voraussetzung für Ultraschall-Messungen und speziell eine modulierte Phasenmeßmethode beschrieben wurde, ohne allerdings auf die eigentliche Meßeinrichtung und auf eventuelle Versuchsergebnisse einzugehen.

Dieser Überblick wäre nicht vollkommen, wenn nicht zwei amerikanische Firmen [27, 28], die in allerneuester Zeit Durchflußmeßgeräte für Rohrleitungen auf dem Ultraschall-Prinzip entwickelt haben, erwähnt

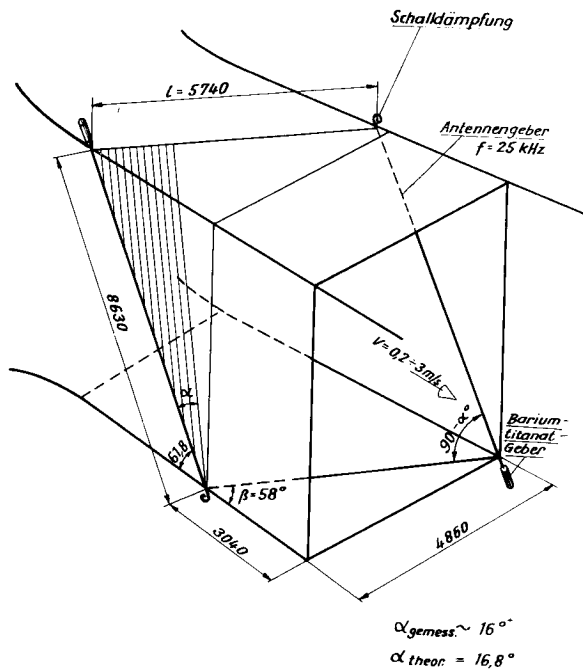


Bild 13. Anordnung der Antennengeber nach Swengel, Heß und Waldorf im Einlauf der Turbine von Safe-Harbor, USA.

würden. Beiden Modellen ist gemeinsam, daß die ganze Meßeinrichtung an einem kurzen Rohrstück angebracht ist. Dieses Anschlußrohrstück ist in verschiedenen Durchmessern lieferbar und wird mittels zweier Flanschen in die Rohrleitung direkt eingebaut. Interessanterweise wurde das Meßproblem ganz verschieden gelöst. Beim Modell von Gulton Industries (Bild 14) wird der mit einer sehr hohen Frequenz (6 MHz) erzeugte und daher scharf gebündelte Strahl in die Flüssigkeit gesendet und mehrere

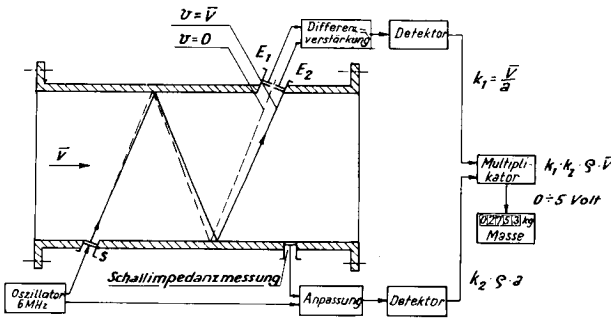


Bild 14. Blockscha des Glennite Ultrasonic-Flowmeter UF 100 B von Gulton Industries Inc.

Male räumlich an den Wänden reflektiert, bis er von zwei gleichen, hart nebeneinanderliegenden Kristallen empfangen wird. Der Strahl ist nun so eingestellt, daß bei ruhender Flüssigkeit beide Empfangskristalle eine genau gleiche Ultraschall-Signalgröße aufnehmen. Bei Strömung entsteht — aus Gleichung (7) ableitbar für  $\frac{v}{a} \ll 1$  — eine wenn

auch geringe Abtrift  $y \approx \sin \beta \cdot \frac{1}{a} \bar{v} \approx k \frac{\bar{v}}{a}$ , die proportional der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und abhängig von der Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit ist. Da außerdem mit einem weiteren Geber der akustische Strahlungswiderstand  $Z_s = k \cdot \rho_0 \cdot a_0$

gemessen wird, ergibt eine elektronisch durchgeführte Multiplikation die durchfließende Flüssigkeitsmasse, wobei die Schallgeschwindigkeit herausfällt. Allerdings muß das Gerät mit einer anderen Methode für die zu messende Flüssigkeit geeicht werden. Bei dem bisher lieferbaren Modell kann die minimal noch gut meßbare Geschwindigkeit ( $v \approx 3$  m/s) mit einer Genauigkeit von 3 % bestimmt werden. Bei weiteren Modellen soll die Genauigkeit auf 1 % gesteigert werden. Für eine direkte Geschwindigkeitsmessung auch über 3 m/s ist diese Methode nicht ideal, weil dabei die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit als Faktor im Gegensatz zur oben erwähnten Massenbestimmung bei der Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein muß.

Fisher & Porter Company verbesserte einen von der Firma Maxson Corp. [30] nach der Idee von Jack Kritz [29] entwickelten Durchflußmesser für Rohrleitungen. Ein amerikanisches Patent auf ein solches Verfahrens ließen sich Garmann, Droz und Gray 1948 erteilen [41]. Während sich der Anwendungsbereich mit dem Gulton-Modell decken dürfte, ist die Idee grundverschieden (Bild 15).

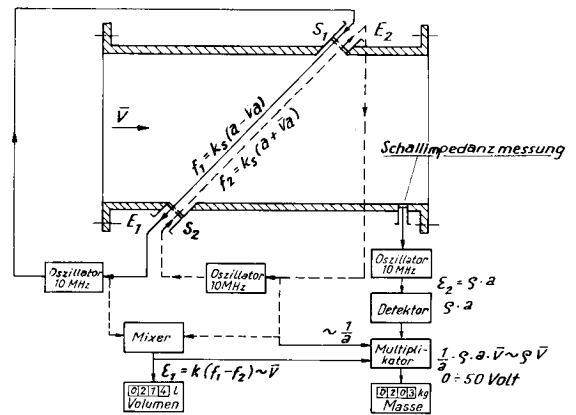


Bild 15. Blockscha des Ultrasonic-Flowmeter von Fisher & Porter Comp.

Es werden die Frequenzen zweier getrennter Kreise miteinander verglichen, die bei gleichem Abstand nur von der Strömungsgeschwindigkeit abhängen. Die Differenzfrequenz ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist unabhängig von der Schallgeschwindigkeit. Die durchfließende Masse wird ähnlich wie bei dem vorher besprochenen Modell durch Multiplikation von hier allerdings drei Faktoren errechnet. Als Genauigkeit bei maximaler Durchflußmenge werden 2 % angegeben.

Sowohl der Glennite-, als auch der Fisher & Porter-Ultraschall-Durchflußmesser kann außer für Wasser auch für andere Flüssigkeiten, wie Benzin, Kerosen, flüssigen Sauerstoff usw. verwendet werden. Mit normalen Bariumtitanat-Kristallen kann in einem Temperaturbereich von etwa  $-40^{\circ}$  C bis  $+90^{\circ}$  C gemessen werden. Für höhere Temperaturen bis  $400^{\circ}$  C werden Spezialgeber verwendet. Der kleinste Rohrdurchmesser ist 50 mm. Im Hinblick auf militärische Verwendung — z. B. Einbau in Düsenflugzeuge und Raketen — sind die Geräte stoß- und erschütterungsfest gebaut und beanspruchen durch eine sehr durchdachte Konstruktion ein Minimum an Platz und Gewicht.

Wenn auch die Genauigkeit für einige Anwendungen nicht befriedigend ist, so scheinen trotz komplizierter Elektronik zwei robuste Meßgeräte für Dauerbetrieb vorzuliegen. Eine der Hauptschwierigkeiten liegt beim Einbau der Bariumtitanat-Schwinger, der sehr sorgfältig vorgenommen werden muß, wobei beim Gulton-Modell die Winkeleinstellung und beim Fisher & Porter-Modell die Einhaltung der genauen Geberabstände sicher sehr schwierig sind. Auch eine für längere Betriebsdauer unveränderliche Eichung ist nicht ohne weiteres gegeben. Schließlich führen Temperaturdifferenzen z. B. zwischen Rand- und Querschnittsmitte zu einer Resultatsverfälschung. Da die Reichweite des Ultraschalles rapid mit wachsender Sendefrequenz sinkt, ist die Ausbaugröße beschränkt.

Der Vollständigkeit halber sollen noch die neueren Arbeiten von Hangen [42], Merle [43] und Schotland [44] erwähnt werden. In einem Artikel weist Dr. Thoma [50] auf die Temperaturabhängigkeit bei Phasemessungen hin.

## 2. 6 Einflüsse der verschiedenen Meßgrößen

Es erscheint angebracht, einmal abzuklären, was für Einflüssen die Messung ausgesetzt ist. Ganz allgemein, unabhängig von den angewandten Ultraschall-Verfahren muß zwischen Einflüssen während des Meßvorganges und Einflüssen bei der späteren Berechnung — ungenaue Umrechnungsformeln z. B. — unterschieden werden.

### 2. 6 1 Einflüsse während der Messung

Für alle Ultraschall-Verfahren gilt die Gleichung (6)

$$(6) \quad a - \bar{v} \cdot \cos \beta = \frac{l}{t_1}$$

Die Zeit  $t_1$  wird gemessen. Eine Änderung  $\Delta t$  dieser Zeit kann prinzipiell durch eine Änderung von  $a$ ,  $\bar{v}$ ,  $\beta$  und  $l$  entstehen. Soll  $\bar{v}$  noch genügend genau bestimmt werden, so dürfen sich die übrigen Größen  $a$ ,  $\beta$  und  $l$  nur um einen kleinen Betrag  $\Delta a$ ,  $\Delta \beta$  und  $\Delta l$  ändern. Um wieviel sich  $a$  und  $l$  ändern dürfen, soll nun untersucht werden. Für  $\beta$  gelten ähnliche Beziehungen wie für  $l$ .

#### 2. 6 1 1 Änderung der Schallgeschwindigkeit während der Messung

Aus Gleichung (6) folgt, nach  $a$  aufgelöst:

$$a = \frac{l}{t_1} + \bar{v} \cdot \cos \beta;$$

differenziert, wobei  $l$ ,  $\beta$  und  $t_1$  für diese Betrachtung als konstant angenommen werden, gilt:

$$(15) \quad \Delta a = \cos \beta \cdot \Delta \bar{v}$$

Die absolute Änderung von  $a$  ist somit von gleicher Größenordnung wie die absolute Änderung von  $\bar{v}$ .

Wird z. B. noch ein  $\bar{v} = 0,1$  m/s gemessen, und soll der Einfluß von  $a$  unterhalb  $1\text{‰}$  von  $\bar{v}$  bleiben ( $\Delta v = 0,1 \cdot 10^{-3} = 10^{-4}$ ), dann gilt bei  $\beta = 45^\circ$ :

$$\Delta a \approx 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Für Wasser darf sich die Schallgeschwindigkeit maximal um

$$\frac{\Delta a_w}{a_w} \cdot 1000 \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{‰} \text{ verändern.}$$

Schon eine Temperaturänderung von  $0,1^\circ \text{C}$  verursacht ein  $\Delta a_w$  von  $0,3$  m/s bzw.  $0,02\%$ , ein Wert, der die vorher genannte Bedingung bei weitem nicht mehr erfüllt!

Daraus folgt, wie schon angedeutet, daß es praktisch unmöglich ist, durch Senden in nur einer Richtung eine genügende Meßgenauigkeit zu erzielen. Um während der Messung unabhängig von Schallgeschwindigkeitsänderungen zu sein, muß also entweder in beiden Richtungen gleichzeitig mit zwei Kanälen, oder im schnellen Wechsel mit nur einem Kanal gearbeitet werden.

### 2. 6 1 2 Änderung des Geberabstandes während der Messung

Aus Gleichung (6) folgt, nach  $l$  aufgelöst:

$$l = a t_1 - \cos \beta \cdot t_1 \cdot \bar{v};$$

differenziert, wobei  $a$ ,  $t_1$  und  $\beta$  als konstant betrachtet werden, gilt:

$$\Delta l = \cos \beta \cdot t_1 \cdot \Delta \bar{v}$$

Nun kann  $t_1 \approx l/a$  gesetzt werden; dividiert durch  $l$ , folgt:

$$(16) \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{\cos \beta}{a} \cdot \Delta \bar{v}$$

Wird z. B. noch ein  $\bar{v} = 0,1$  m/s gemessen, und soll der Einfluß einer Geberabstandsänderung unterhalb  $1\text{‰}$  von  $\bar{v}$  bleiben ( $\Delta v = 0,1 \cdot 10^{-3} = 10^{-4}$  m/s), dann gilt für  $\beta = 45^\circ$  im Wasser:

$$\frac{\Delta l}{l} \cdot 1000 < 5 \cdot 10^{-5} \text{‰}$$

Daraus ist ersichtlich, wie wichtig die Befestigung der Geber ist. Bei 2 Kanälen müssen die beiden Abstände innerhalb dieser Grenzen genau übereinstimmen (16), eine Bedingung, die ohne besondere Vorkehrungen schwer einzuhalten ist.

### 2. 6 2 Fehlerrechnung für Ultraschall-Phasemessung

Es darf vorausgeschickt werden, daß eine Fehlerrechnung für die eigene Methode unter 3. 6 4 gebracht wird. Hier erscheint es zweckmäßig, für die hauptsächlich bisher verwendete Phasemessung eine Fehlerrechnung als Unterlage für die folgende Diskussion durchzuführen. Wird von der Grundformel (13) ausgegangen

$$\bar{v} = \frac{a^2}{f \cdot l \cdot \cos \beta \cdot 720} \Delta \varphi$$

und seien  $a$ ,  $f$ ,  $l$ ,  $\cos \beta$ ,  $\Delta \varphi$  voneinander unabhängig gemessene Größen, wobei  $\delta a$ ,  $\delta f$ ,  $\delta l$ ,  $\delta \beta$ ,  $\delta \varphi$  die zugehörigen mittleren absoluten Fehler darstellen, dann ergibt der maximale relative Fehler nach der Produktenregel und durch  $\bar{v}$  dividiert:

$$\frac{\delta \bar{v}}{\bar{v}} = 2 \cdot \frac{\delta a}{a} + \frac{\delta \varphi}{\varphi} + \frac{\delta f}{f} + \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \cos \beta}{\cos \beta}$$

und der maximale prozentuale Fehler  $F_v$ ,

wenn  $\frac{\delta a}{a} \cdot 100 = F_a$  ist prozentualer Fehler der Schallmessung

$$12 \quad (17) \quad F_v = \pm (2F_a + F_\varphi + F_f + F_l + F_{\cos\beta})$$

Der Fehler  $F_a$ , bedingt durch die Schallgeschwindigkeitsmessung, hat zweifachen Einfluß auf das Schlüßresultat  $F_v$ .

Außer dem maximalen Fehler  $F$  interessiert in diesem Zusammenhang auch der mittlere geschätzte Fehler  $\bar{F}$ .

### 2. 6 2 1 Fehlerabschätzung

Unter Verwendung des Ausgleichs nach Gauß gilt für die Fehlerbestimmung  $\delta\bar{v}$  des Resultates, das sich aus mehreren unabhängig gemessenen Größen aus Gleichung (13) dividiert durch

$$\bar{v} = \frac{a^2 \cdot \Delta\varphi}{f \cdot l \cdot \cos\beta \cdot 720} \text{ ergibt:}$$

$$(\delta\bar{v})^2 = \bar{v}^2 \left( \frac{2}{a^2} \delta a^2 + \frac{1}{\Delta\varphi^2} \delta \Delta\varphi^2 + \frac{1}{f^2} \delta f^2 + \frac{1}{l^2} \delta l^2 + \frac{1}{\cos\beta} \delta \cos\beta^2 \right)$$

$$\frac{\delta a}{a} \cdot 100 = F_a \quad \text{prozentualer Fehler der Schallmessung}$$

analog  $F_\varphi, F_f \dots$

so folgt eingesetzt:

mittlerer prozentualer Fehler  $\bar{F}_v$

$$(18) \quad \bar{F}_v = \pm \sqrt{2 \cdot F_a^2 + F_\varphi^2 + F_f^2 + F_l^2 + F_{\cos\beta}^2}$$

Für diese abgeleiteten Formeln soll nun der effektive Einfluß der einzelnen gemessenen Größen abgeschätzt werden.

#### Genauigkeit der Schallgeschwindigkeitsrechnung

Die Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit im Wasser ist in erster Linie von der Temperatur abhängig. Es sei angenommen, daß die mittlere Temperatur in der Meßebeine im günstigsten Fall auf  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  genau gemessen werden kann. Bei einer Temperatur von  $t = 15^\circ$  ist dann aus Bild 16 die Schallgeschwindigkeit im normalen Süßwasser ersichtlich.

$$a_w = 1466,5 \pm 3,6 \text{ m/s}$$

$$F_a = \frac{\delta a}{a} \cdot 100 = \pm \frac{3,6 \cdot 100}{1466,5} \approx 0,25 \%$$

#### Genauigkeit der Messung der Phasendifferenz $\varphi$

Es werden heute Phasenmeßgeräte gebaut, die eine Genauigkeit von  $0,1^\circ$  erreichen. Von einem normalen guten Gerät kann man bei  $\varphi = 180^\circ$  noch  $\pm 0,3^\circ$  erwarten. Nun müssen hier auch noch die elektronischen Schwankungen, im Sender, Verstärker, Mixer, usw. berücksichtigt werden, so daß eine Genauigkeit für  $\Delta\varphi$  von  $\pm 0,5^\circ$  angebracht erscheint.

$$F_\varphi = \frac{\delta\varphi}{\Delta\varphi} = \frac{0,5}{180} = 0,27 \%$$

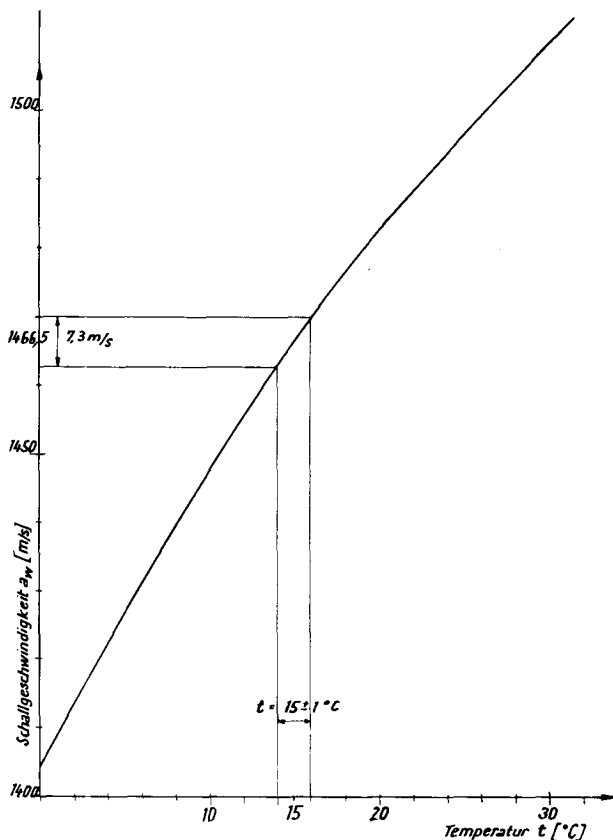


Bild 16. Schallgeschwindigkeit im Wasser in Funktion der Temperatur nach Dorsay [31].

#### Genauigkeit der Bestimmung der Frequenz $f$

Da der Hochfrequenzgenerator quartzgesteuert ist, bleibt die Schwingungsfrequenz praktisch konstant.

Daher wird  $F_f = 0,1 \%$  angenommen.

#### Genauigkeit von Geberabstand $l$ und $\cos\beta$

Diese beiden geometrischen Größen sollten mit dem geeigneten Meßmittel auf  $0,1 \%$  genau bestimmbar sein:

$$F_l = 0,1 \%$$

$$F_{\cos\beta} = 0,1 \%$$

Mit diesen Annahmen ergibt sich der

maximale prozentuale Fehler aus (17)

$$F_v = \pm (2 \cdot 0,25 + 0,27 + 0,1 + 0,1 + 0,1)$$

$$\underline{F_v = \pm 1,07 \%}$$

und aus (18) der

mittlere prozentuale Fehler:

$$\bar{F}_v = \pm \sqrt{2 \cdot 0,25^2 + 0,27^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2}$$

$$\underline{\bar{F}_v = \pm 0,48 \%}$$

Das wäre nun eine äußerst günstige Schätzung; leider wird die Schallgeschwindigkeit auch durch andere Faktoren beeinflusst und kann nur in seltenen Fällen auf  $0,25 \%$  genau bestimmt werden.



L. Sani [26] geht in seinen Betrachtungen von einer Messung der mittleren Wassertemperatur von  $\pm 2^{\circ}$  aus, wodurch  $F_a$  allein schon 0,44 % ausmacht. Mit unseren übrigen Werten ergibt dies

einen maximalen prozentualen Fehler von  $F_v = 1,45 \%$

und einen mittleren prozentualen Fehler von  $\bar{F}_v = 0,7 \%$ .

Bei der Ultraschallströmungsmessung mit Phasendifferenzbestimmung ist also die Genauigkeit, mit der die mittlere Schallgeschwindigkeit im Meßquerschnitt berechnet werden kann, ausschlaggebend für die Meßgenauigkeit der ganzen Methode.

Bei einer direkten Laufzeitdifferenzmessung tritt leider auch die Schallgeschwindigkeit in Erscheinung (Gleichung 12), und eine Fehlerrechnung würde ähnliche Resultate wie bei der Phasensmessung ergeben.

## 2.7 Diskussion der bisherigen Ultraschallarbeiten

Aus dem historischen Überblick geht hervor, daß Strömungsmessungen mittels Ultraschall bisher nur in USA zu brauchbaren Ergebnissen führten. Bezeichnenderweise wurde bei allen Versuchen, mit Ausnahme der beiden erwähnten käuflichen Geräte, eine Phasendifferenzbestimmung durchgeführt. Bei der dadurch bedingten Umrechnungsformel wird die Genauigkeit der ganzen Messung im wesentlichen durch die Exaktheit, mit der die mittlere Schallgeschwindigkeit im Meßquerschnitt bestimmt werden kann, begrenzt.

In Bezug auf die prinzipielle Anordnung der Geber scheidet die einfachste Meßart mit nur einem Sender und Empfänger (ein Kanal) von vornherein aus, denn kleinste Schallgeschwindigkeitsschwankungen, z. B. verursacht durch minimale Temperaturänderungen, können das Meßresultat vollkommen verschleiern.

Mit nur einem Kanal zu messen, wurde erst möglich durch Swengels Idee [17], die Senderichtung in schnellem Wechsel dauernd zu ändern, wobei sich Strömungen auf beide Signale gleich auswirken und dadurch ausgeglichen werden (Bild 4).

Beim Zweikanalsystem, d. h. 2 Sender- und Empfängerpaaren, kann der störende Einfluß auch bei sehr schnellen Änderungen im Medium unterbunden werden. Schwieriger gestaltet sich hier die genaue Abstandseinhaltung auf beiden Kanälen sowie der Ausgleich der elektronisch bedingten Schwankungen (Bild 3).

Für die eigentliche Ausbildung der Geber bieten sich nun verschiedene Möglichkeiten. Hierbei unterscheiden wir grundsätzlich zwischen Gebern zur Lösung des ebenen Meßproblems und Gebern zur direkten räumlichen Messung.

Die direkte räumliche Messung wurde bisher nur bei rechteckigen Querschnitten von Swengel, Hess und Waldorf [22 bis 25] mit den Antennen-Gebern verwirklicht. Bei allen anderen Verfahren wurde das räumliche auf ein ebenes Problem zurückgeführt. Für

fest eingebaute Meßeinrichtungen scheinen sich die Antennen-Geber sehr zu eignen; allerdings würde in Verbindung damit eine direkte oder indirekte Zeitmessung sicher zu genaueren Resultaten führen, als die bisher verwendete Phasensmessung.

Daß die Ultraschall-Verfahren auch zu betriebs-sicheren Geräten für Dauerbetrieb entwickelt werden können, zeigen die Arbeit von K. S. Stull [18] und die Veröffentlichungen über die beiden käuflichen amerikanischen Durchflußmesser für Rohrleitungen. Allerdings scheinen letztere in ihrer jetzigen Ausführung für sehr genaue Messungen bei kleinen Geschwindigkeiten — Bedingungen, wie sie in der Hydraulik vorliegen — weniger geeignet.

## 3. Experimenteller Teil

### 3.1 Begründung einer Neuentwicklung

Da es bei Beginn der Arbeit nicht möglich war, eine fertige Ultraschall-Apparatur von irgendwoher zu beziehen, war zu entscheiden, nach welchem Verfahren und für welche konkreten Anwendungen eine Meßapparatur gebaut werden sollte, um auf diesem interessanten Gebiet neue Erkenntnisse und Erfahrungen sammeln zu können.

Aus naheliegenden Gründen wurde das Verfahren für Wassermessungen speziell im Hinblick auf hydraulische Anlagen ausgerichtet. Es war jedoch von Anfang an vorgesehen, daß die Möglichkeit bestand, auch in anderen Flüssigkeiten zu messen, sofern sich kein besonderer Korrosionsschutz als notwendig erwies.

Es erschien zweckmäßig, keine feste, ortsgebundene Anlage, die nur für einen bestimmten Querschnitt verwendbar sein würde, zu entwickeln, sondern eine möglichst universelle Meßeinrichtung, die Versuche innerhalb verschiedener Bereiche einerseits im Kanal des Institutes (1 m breit) und andererseits auch Messungen in Wasserkraftanlagen ermöglichen sollte. Daher wurden folgende Bedingungen als erstrebenswert betrachtet:

- Genauigkeit in Größenordnung von etwa 0,4 %;
- Leichter Einbau in verschiedenen Querschnitten;
- Keine Notwendigkeit einer Eichung, wie z. B. bei Meßflügeln;
- Keine Störung der Strömung durch Einbauten;
- Graphische Registrierung;
- Minimale Auswertarbeit, wenn möglich Direktanzeige des Resultates.

### 3.2 Prinzip des neu entwickelten Ultraschall-Meßverfahrens

Eine Phasensmessung sollte wegen der geschilderten Schallgeschwindigkeitsabhängigkeit möglichst vermieden werden.

Bestehend erschien es, von der Formel (11)

$$\bar{v} = \frac{1}{2 \cdot \cos \beta} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad \text{auszugehen.}$$

14 Wie schon erwähnt, ist eine direkte Messung von  $t_1$  und  $t_2$  wegen der kleinen kaum meßbaren Differenz heute noch nicht möglich. Daher wurde nach einem Weg gesucht, diese Schwierigkeit zu umgehen, um trotzdem diese Meßart verwenden zu können.

Das gewählte Verfahren hat eine gewisse Ähnlichkeit mit Meßproblemen, wie sie in der Radartechnik und bei Kurzzeitmessungen — Laufkettenvergleich — auftreten sowie mit dem Prinzip des Fisher-Flowmeters [29, 30]. In Bild 17 ist das Schema dargestellt. Es werden zwei gleiche, aber getrennte Meßkanäle vorgesehen.

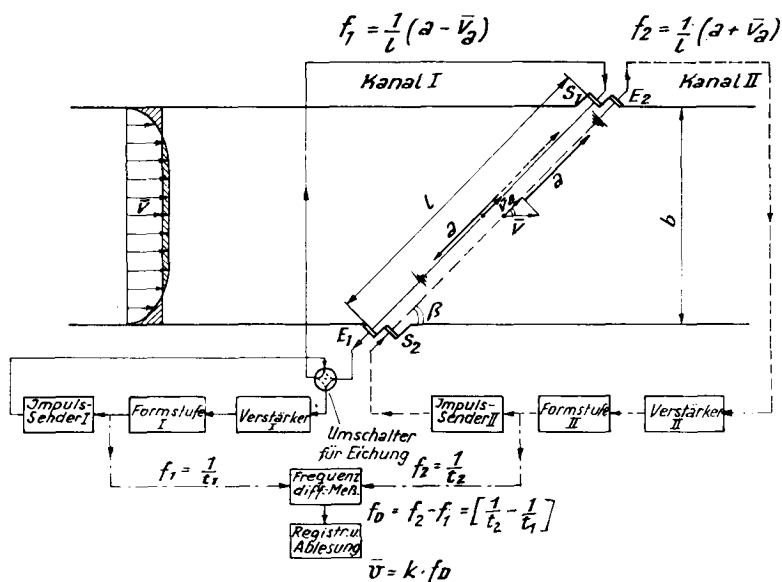


Bild 17. Vereinfachtes Schema des eigenen neu entwickelten Meßverfahrens.

Der Oszillator des Impuls-Senders I wird zu einer kurzen gedämpften Schwingung gebracht, so daß ein Impuls ausgelöst wird, der zum Sendequarz  $S_1$  gelangt. Die Flüssigkeit — Geschwindigkeit  $v$  — wird in der Zeit  $t_1$  schräg gegen die Strömungsrichtung durchgeht, und im Empfänger  $E_1$  wird die elastische Störung wieder in einen elektrischen Impuls zurückverwandelt. Dieses Signal wird verstärkt und mittels Formstufen in ein immer gleichbleibendes Startsignal für den Schwingkreis des Impuls-Oszillators umgewandelt. Erreicht dieses Signal den Oszillator, so wird ein zweiter Impuls ausgelöst, der in der gleichen Zeit  $t_1$  wieder am Sender eintrifft, solange Strömungsgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit unverändert bleiben.

Nun entspricht die gesamte Umlaufzeit  $t_1'$  praktisch der Signallaufzeit  $t_1 = \frac{l}{a_w - \bar{v}_a}$  im Wasser, da im elektrischen Teil des Weges das Signal sich mit der Geschwindigkeit von ca. 30 000 km/s gegen 1500 m/s z. B. im Wasser fortbewegt. Es sei hier vorausgeschickt, daß bei ganz genauen Messungen auch der vom elektrischen Signal zurückgelegte Weg berücksichtigt werden muß.

Es stellt sich also eine gewisse Impulsfolgefrequenz  $f_1 = 1/t_1$  ein, die von Geberabstand, Schallgeschwindigkeit und Bewegung der Flüssigkeit abhängig ist.

Wird in der anderen Richtung (in Bild 17 Kanal II), also schräg mit der Strömung gemessen, dann stellt sich analog eine Impulsfolgefrequenz  $f_2 = 1/t_2$  ein. Wird nun die Differenz  $f_D$  dieser beiden Impulsfolgefrequenzen gemessen, so gilt, in Formel (11) eingesetzt, wenn der Abstand beider Kanäle absolut gleich ist:

$$\bar{v} = \frac{1}{2 \cdot \cos \beta} \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right) = \frac{1}{2 \cdot \cos \beta} (f_2 - f_1) = \frac{1}{2 \cdot \cos \beta} f_D$$

$$(19) \quad \bar{v} = \frac{1}{2 \cdot \cos \beta} f_D$$

Wird die Meßeinrichtung fest eingebaut, z. B. in eine Rohrleitung, so ist es möglich, durch Bewegen eines der Geber — z. B. indem man eine Mikroschraube so lange dreht, bis die Differenzfrequenz  $f_D$  bei ruhendem Wasser null wird — die Abstände zwischen den zugehörigen Gebern genau gleich einzustellen. Dies bedingt aber erstens, daß die Möglichkeit besteht, bei  $v = 0$  eine Nullpunkteinstellung vorzunehmen und außerdem daß diese Einstellung bis zur und während der Messung unverändert bleibt. Diese zwei Forderungen können selten erfüllt werden. Man denke z. B. an Abflußmengenbestimmungen in Flüssen.

Z. B. bei einem Geberabstand von etwa 1 m bewirkt eine Geberabstandsdifferenz von nur 0,1 mm die gleiche Differenzfrequenz wie eine Geschwindigkeit von  $v = 0,1$  m/s. In Bild 18 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt.

Es konnte eine einfache Lösung gefunden werden, um diese Schwierigkeit zu überbrücken. Vor der eigentlichen Messung wird eine Nullpunktkorrektur (Eichung) vorgenommen, indem auf beiden Kanälen in der gleichen Richtung gesendet wird. Es werden hierzu die Sender- und Empfänger-Kopfanschlüsse eines Kanals vertauscht, z. B. mittels des aus Bild 17 ersichtlichen Umschalters. Besteht eine kleine Differenz  $\Delta l$  zwischen den beiden Geberabständen, dann wird sich ganz unabhängig von der Geschwindigkeit  $v$ , die den gleichen Einfluß auf beide Kanäle ausübt, eine gewisse Differenzfrequenz  $f_E$  einstellen, während sich bei entgegengesetzten Senderrichtungen ein  $f_M$  einstellt. Es gelten dann, unter der Voraussetzung, daß die Geberabstandsdifferenz  $\Delta l$  unverändert während der beiden Stellungen "Eichen" und "Messen" bleibt, folgende Beziehungen, ausgehend von den Gleichungen (6) und (9):

Eichen:

$$(20) \quad a + v_i \cos \beta = \frac{l + \Delta l}{t_{E_1}}$$

$v_i$  = irgend eine Strömungsgeschwindigkeit  
 $l$  = Geberabstand in Kanal II  
 $\Delta l$  = Unterschied der beiden Geberabstände  
 $t_{E_1}$  = Laufzeit beim Eichen in Kanal I

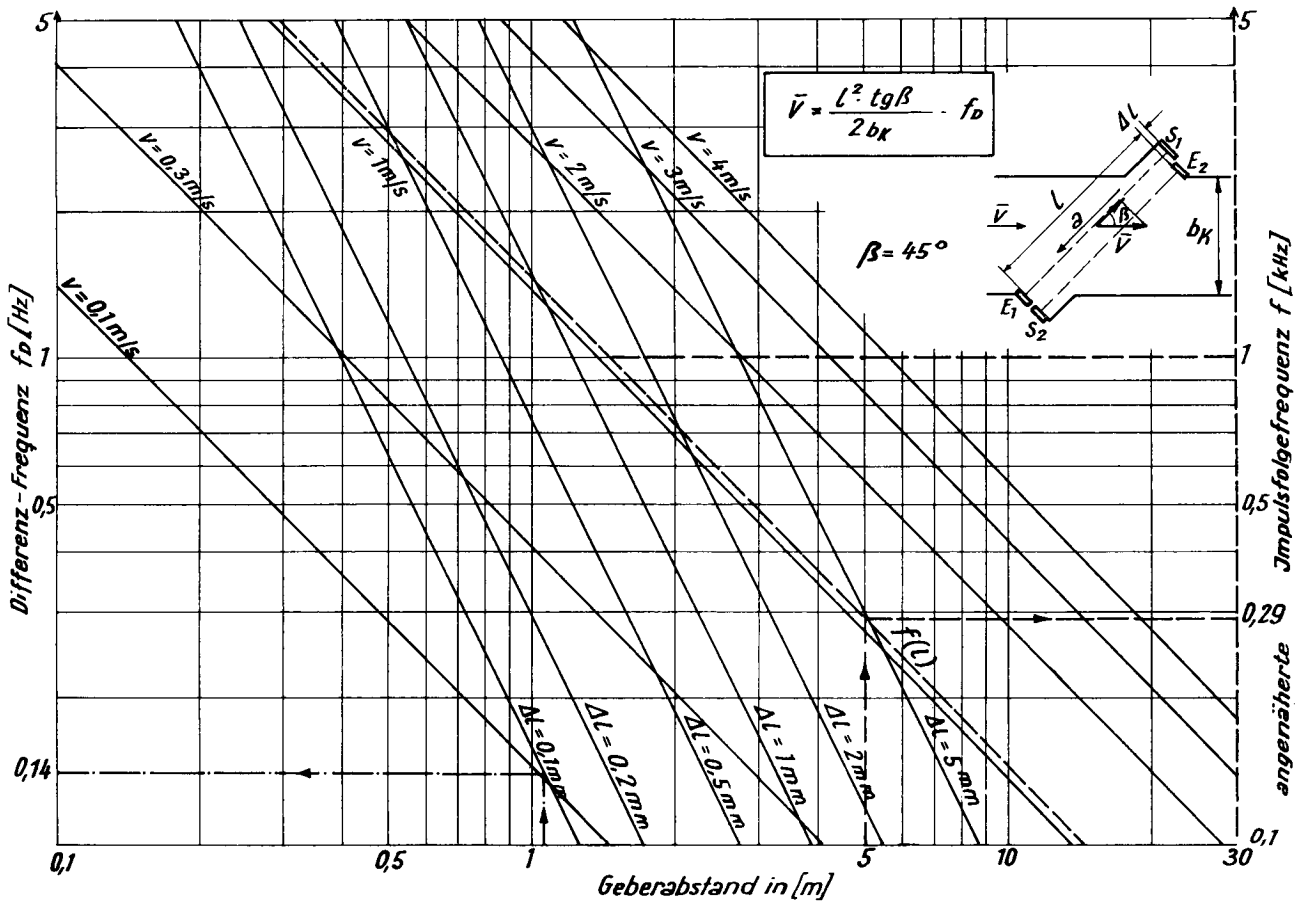


Bild 18. Impulsfolge-Differenzfrequenz  $f_D$  in Funktion des Geberabstandes  $l$  bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten und kleinen Geberabstands-differenzen. Zum Vergleich sind noch die abgerundeten Werte der Impulsfolgefrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  in Funktion des Geberabstandes  $f(l)$  aufgetragen.

(21)  $a + v_i \cos \beta = \frac{1}{t_{E_2}}$   
 $t_{E_2}$  = Laufzeit beim Eichen in Kanal II  
 $f_E$  = Differenzfrequenz in Stellung "Eichen"

Aus (20) und (21) folgt durch Gleichsetzung und umstellen

$$l \left( \frac{1}{t_{E_2}} - \frac{1}{t_{E_1}} \right) = \frac{\Delta l}{t_{E_1}}$$

Der Ausdruck in der linken Klammer ist nichts anderes als

$$f_{E_2} - f_{E_1} = f_E;$$

also kann geschrieben werden:

(22)  $l \cdot f_E = \frac{\Delta l}{t_{E_1}},$

eine Beziehung, die unabhängig von der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit ist.

Messen:

Analog kann geschrieben werden:

(23)  $a - \bar{v} \cos \beta = \frac{l + \Delta l}{t_{M_1}}$   $t_{M_1}$  = Laufzeit beim "Messen" in Kanal I

(24)  $a + \bar{v} \cos \beta = \frac{\Delta l}{t_{M_2}}$   $t_{M_2}$  = Laufzeit beim "Messen" in Kanal II  
 $\Delta t_M$  = Differenzfrequenz in Stellung "Messen"

Durch Subtraktion von Gleichung (24) - (23)

(25)  $\bar{v} = \frac{l}{2 \cos \beta} \left( \frac{1}{t_{M_2}} - \frac{1}{t_{M_1}} \right) - \frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{M_1}},$

wobei  $\frac{1}{t_{M_2}} - \frac{1}{t_{M_1}} = t_M$

Wird  $t_{E_1} - t_{M_1} = \Delta t_E$  bezeichnet, dann kann in obiger Gleichung gesetzt werden:

$$\frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{M_1}} = \frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{E_1} - t_E} = \frac{1}{2 \cos \beta} \cdot \frac{\Delta l}{t_{E_1}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta t_E}{t_{E_1}}} = \frac{1}{2 \cos \beta} \cdot \frac{\Delta l}{t_{E_1}} \left( 1 + \frac{\Delta t_E}{t_{E_1}} \right)$$

Durch Reihenentwicklung und Vernachlässigung der Größen zweiter Ordnung  $\left( \frac{\Delta l \cdot \Delta t_E}{t_{E_1}^2} \ll 1 \right)$  wird folgende Vereinfachung zulässig

$$\frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{M_1}} = \frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{E_1}}$$

Mit Gleichung (22) folgt:

$$\frac{\Delta l}{2 \cos \beta} \cdot \frac{1}{t_{E_1}} = \frac{1}{2 \cos \beta} \cdot f_E$$

so daß Gleichung (25) vereinfacht dargestellt werden kann:

(26)  $\bar{v} = \frac{l}{2 \cos \beta} (f_M - f_E)$

Aus Gleichung (19) folgt  $f_M - f_E = f_D$

16 Bisher wurde bei allen Betrachtungen der Geber als punktförmig, d. h. vernachlässigbar klein angenommen. Erreicht das Verhältnis seiner Größe zum Geberabstand einen gewissen, von der verlangten Genauigkeit abhängigen Wert, so muß bei der schrägen Anordnung der Geber der Einfluß der Nahzone berücksichtigt werden (Bild 19).

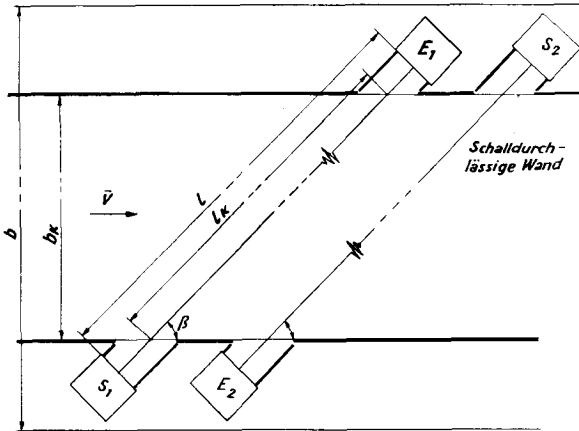


Bild 19. Detail der schrägen Anordnung der Geber mit schalldurchlässiger Wand, so daß die Köpfe außerhalb des Strömungsquerschnitts liegen.

Liegen die Geber hinter einer zur Strömungsrichtung parallelen Wand, wie bei den noch zu besprechenden Hauptversuchen, dann liegt eine eindeutig begrenzte Meßbreite vor. Aber auch dann, wenn die Geber offen in der Strömung liegen, kann man sich tangential an die Köpfe eine Wand denken und annehmen, die Geschwindigkeit in dem keilförmigen Zylinderstück sei praktisch null.

Unter Benützung der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$\begin{aligned} \bar{v} \cdot l_k &= \bar{v}_{th} \cdot l & \bar{v}_{th} &= \text{mittlere Geschwindigkeit, wie sie unter obigen Voraussetzungen aus Formel (26) resultiert,} \\ l_k \cdot \sin \beta &= b_k & & \\ \bar{v} &= \frac{l \cdot \sin \beta}{b_k} \cdot \bar{v}_{th} & l_k &= \text{in der Strömung liegender Teil des Geberabstandes.} \\ & & b_k &= \text{aktive Kanalbreite.} \\ & & \bar{v}_{th} &= \text{aus Formel (26) eingesetzt} \end{aligned}$$

$$(27) \quad \bar{v} = \frac{l^2 \operatorname{tg} \beta}{2 \cdot b_k} \cdot (f_M - f_E)$$

Die Hauptversuche — d. h. mit verkleideten Gebern — wurden mit dieser Formel ausgewertet. Die mittlere sekundliche Wassermenge ergibt  $Q = \bar{v}_{US} \cdot b_k \cdot h_k$ , wobei  $\bar{v}_{US}$  die graphisch erhaltene mittlere Geschwindigkeit aus den Horizontalmessungen und  $h_k$  die Wasserhöhe im offenen oder geschlossenen Kanal ist.

Diese einfachen Beziehungen (26 und 27) ermöglichen eigentlich erst die praktische Ausführung einer Meßeinrichtung nach dem beschriebenen Prinzip. Der Nachteil, zwei Messungen — Eichen und Messen — durchführen zu müssen, bringt aber folgende bedeutenden Vorteile:

1. Kleine nur schwer zu beseitigende Differenzen der beiden Geberabstände werden gegenstandslos.

2. Es besteht nun die Möglichkeit, zu jeder Zeit die Nullpunktstellung der elektronischen Apparatur zu überprüfen und eventuell nachzustellen, und zwar bei jeder beliebigen Strömungsgeschwindigkeit; damit wird es überflüssig, die Apparatur bei ruhendem Wasser einstellen zu müssen.

Aus Gleichung (20) und (21) läßt sich noch folgende Beziehung ableiten:

$$f_E = (a + \bar{v} \cos \beta) \cdot \frac{\Delta l}{l^2} \approx a \cdot \frac{\Delta l}{l^2}$$

Es sei noch erwähnt, daß bei Impulsverfahren eigentlich die Gruppengeschwindigkeit  $a_s$  des Schallwellenzuges anstatt der Schallgeschwindigkeit  $a$  — auch Wellen- oder Phasengeschwindigkeit genannt — gemessen wird. Ein einzelnes Schallsignal von endlicher Dauer kann man sich nach Bergmann [35] im Gegensatz zu einer Schallwelle von endlicher Länge, die nur eine Frequenz enthält, aus einer Summe harmonischer Wellen von unendlicher Länge aufgebaut denken, die in ihrer Amplitude und Phase so zueinander liegen, daß sie sich außerhalb des Schallimpulses zu Null ergänzen. Aber diese Tatsache berührt, solange in beiden Richtungen gleichzeitig gesendet wird und die Impulse nicht stark voneinander abweichen, nicht das hier verwendete Verfahren, umso mehr, als auch die Schalldispersion, die ebenfalls in diesem Zusammenhang eine Rolle spielt, in den in Frage kommenden Frequenzbereichen im Wasser vernachlässigbar ist.

### Die Ausbildung der Ultraschallgeber

Nachdem das Meßprinzip festlag, war ein nächster Schritt, die geeigneten Ultraschallgeber zu finden. Obwohl anfänglich an eine Verwendung der Antennegeber nach Swengel [19] gedacht war, um damit durch nur eine Messung die mittlere Strömungsgeschwindigkeit z. B. in einem rechteckigen Querschnitt zu bestimmen, wurde dieser Gedanke wieder fallengelassen. Für diese erste universelle Meßeinrichtung erschienen zur Abklärung prinzipieller Fragen die überall verwendbaren punktförmigen Kristallgeber geeigneter. Damit kann allerdings nur eine ebene Messung auf einer Linie vorgenommen werden. In einem rechteckigen Kanalquerschnitt z. B. mit einer unregelmäßigen Geschwindigkeitsverteilung müssen also entweder mehrere Geberpaare untereinander angebracht werden oder die zwei seitlich angeordneten Geber vertikal verschiebbar sein, um so den gesamten Querschnitt, ähnlich wie bei einer Flügelmessung, bestreichen zu können (Bild 20). Die graphische Auswertung ergibt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Meßquerschnitt.

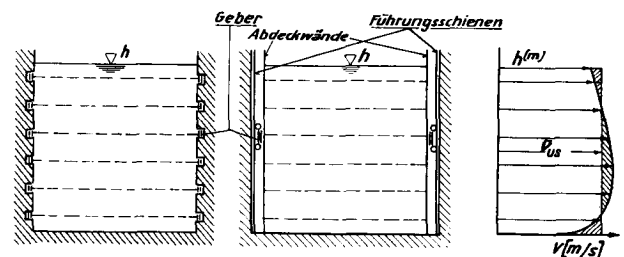


Bild 20. Verschiedene Einbaumöglichkeiten der Geber in rechteckigen Querschnitten.

Der Nachteil dieser etwas umständlichen Messung gegenüber der Swengel-Methode bringt auch Vorteile mit sich; man erhält den Geschwindigkeitsverlauf im Meßquerschnitt, der für die Beurteilung der Strömungsverteilung z. B. bei Wasserkraftanlagen sehr wichtig ist. Außerdem muß die Sendefrequenz nicht jedem Geberabstand und Geschwindigkeitsbereich angepaßt werden, wie bei einer Phasenmessung. Prinzipiell ist auch eine Verwendung von Antennengebern mit dem hier entwickelten Verfahren möglich. Die größte Schwierigkeit dürfte in der genauen Anordnung liegen, damit auf beiden Kanälen gleiche Impulsformen entstehen.

### 3. 3 Erzeugung und Empfang des Ultraschalles

#### 3. 3 1 Bestimmung der günstigsten Trägerfrequenz

Im Gegensatz zur allgemein verwendeten Phasendifferenzmessung, wo kontinuierliche Sinuswellen erwünscht sind, werden bei diesem Verfahren kurze Impulse mit steilen Flanken angestrebt. Ein Hochfrequenzimpulssender erregt den piezoelektrischen Wandler kurz, so daß eine abklingende Schallwelle von nur wenigen Schallwellenzügen entsteht. Die Frequenz, mit der die einzelnen Schwingungen ausgeführt werden, wird als Trägerfrequenz bezeichnet.

Der verwendete Ultraschallschwinger soll im wesentlichen folgende Forderungen erfüllen: ein Signal erzeugen, das noch in etwa 10 m gut empfangen werden kann und dazu eine saubere und steile erste Flanke haben soll. Außerdem ist eine gute Bündelung des Strahles erwünscht, damit die beiden Kanäle beim Eichen – also beim Senden in gleicher Richtung – sich nicht beeinflussen. Während die erste Bedingung eine möglichst niedrige Trägerfrequenz verlangt, sollte diese doch möglichst hoch sein, um die weiteren Punkte zu erfüllen. Es muß also bei der Trägerfrequenzbestimmung ein Kompromiß geschlossen werden.

#### Schallabsorption im Wasser

Allgemein ist die Absorption einer ebenen Schallwelle nach Bergmann [33] durch den Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  gekennzeichnet, der gemäß Gleichung (28)

$$(28) \quad J_x = J_0 \cdot e^{-\alpha x} = J_0' \cdot e^{-2 f^2 \alpha' x}$$

angibt, auf welchen Betrag  $J_x$  die Schallintensität  $J_0$  nach Durchlaufen der Strecke  $x$  absinkt.

Für Wasser ergibt sich theoretisch der frequenzunabhängige Schallabsorptionskoeffizient

$$\alpha'_{th} = \alpha/f^2 = 8,5 \cdot 10^{17} \text{ [s}^2/\text{cm]}$$

bei etwa 15° C.

Die Schallabsorption ist nicht nur von der Frequenz, sondern, bedingt durch die temperaturabhängige Viskosität, auch noch von der Temperatur abhängig [34].

Außerdem ist der experimentell ermittelte Absorptionskoeffizient  $\alpha'_{exp}$  etwa 3,1 mal so groß wie der theoretisch errechnete  $\alpha'_{th}$  in dem interessierenden Temperaturbereich von + 4° bis 30° C.

Die Strecke, nach deren Durchlaufen die Schallintensität auf den  $e$ -ten Teil gesunken ist, kann aus Gleichung (28) ersehen werden.

$$x_{th} = \frac{1}{2 \alpha_{th}} \text{ bzw. } x_{exp} = \frac{1}{2 \alpha_{exp}}$$

In Bild 21 ist diese Beziehung graphisch aufgetragen. Bei einer Sendefrequenz von 2,5 MHz beträgt diese Distanz theoretisch 9,3 m, praktisch nur 3 m.

Da hier keine kontinuierlichen Wellen, sondern äußerst kurze Impulse erzeugt werden, sind diese Angaben nur als Richtlinien zu betrachten.

Nach einer Reihe weiterer theoretischer Überlegungen, auf deren Wiedergabe hier verzichtet wird, wurden als Kompromiß zwischen den teilweise entgegengesetzten Forderungen Frequenzen von 1 bis 2,5 MHz als geeignet angesehen. Sicherheitshalber wurden diese Überlegungen noch experimentell überprüft.

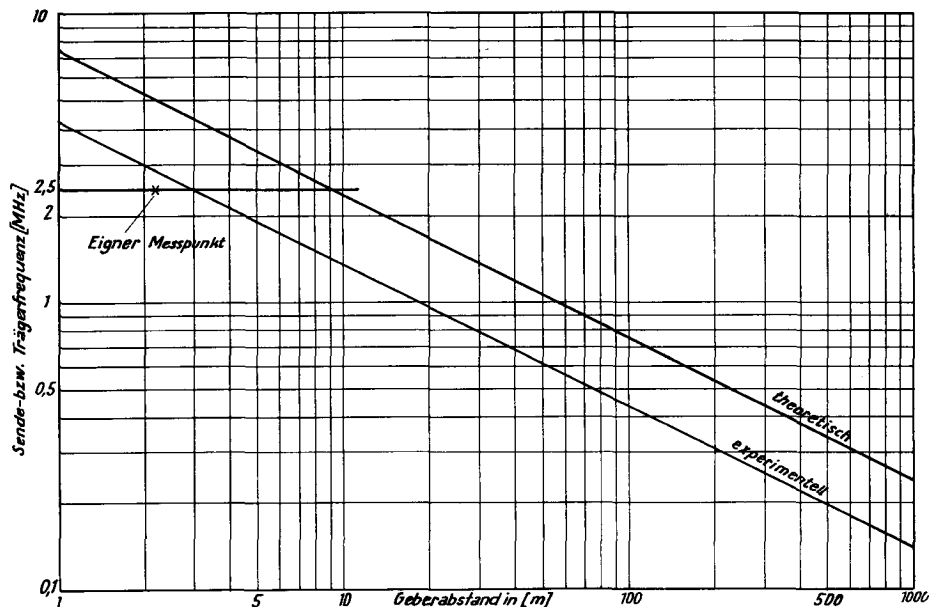


Bild 21. Distanz in [m], nach welcher die Schallintensität auf den  $e$ -ten Teil zurückgegangen ist, in Funktion der Sendefrequenz. Temperatur etwa 15° C.

Durch die im Meßkanal des Institutes für hydraulische Maschinen und Anlagen der ETH Zürich durchgeführten Versuche mit einem angepaßten Siemens-Ultraschall-Material-Prüfgerät (Bild 22) wurde der praktische Beweis erbracht, daß mit einer Trägerfrequenz von 2,5 MHz noch Geberabstände bis zu 10 m in Wasser zulässig sind.

18 In Bild 22 sind die Versuchsergebnisse bei  $f = 2,5$  MHz festgehalten.

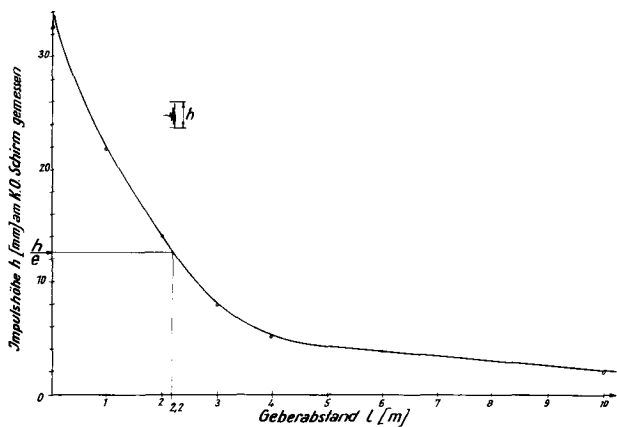


Bild 22. Relative Empfängerintensität in Funktion des Abstandes, bei 2,5 MHz in Wasser gemessen.

### 3. 3 2 Art und Material des Ultraschallgebers

Bezüglich des Schallmaterials kommen in diesem hohen Frequenzbereich fast nur piezoelektrische Stoffe in Frage, da die wesentlich robusteren und billigeren magnetostriktiven Geber nur bis Frequenzen von etwa 0,5 MHz verwendbar sind, wobei bei den letzteren mit steigender Frequenz der Wirkungsgrad rapid abnimmt.

Die Erscheinung des von den Gebrüdern Curie [45] 1880 entdeckten piezoelektrischen Effektes äußert sich folgendermaßen: wird an die Elektroden einer piezoelektrischen Scheibe eine elektrische Hochfrequenz-Wechselspannung gelegt, so verursacht diese mechanische Deformationen, die zu elastischen

Schwingungen führen. Dieser Vorgang ist reversibel, d. h. bei Druck bzw. Dehnung treten elektrische Ladungen auf. Die Piezoelektrizität ist nicht an ein bestimmtes Kristallsystem gebunden, aber an das Vorhandensein von polaren Achsen im Kristall, was durch geeignete Schnitte bei den natürlichen Kristallen berücksichtigt wird.

Als erster hat wohl 1917 Langevin [46] Quarzplatten mit Hilfe eines elektrischen Wechselfeldes zu erzwungenen elastischen Schwingungen angeregt und damit einen Ultraschallgeber entwickelt.

Bis vor wenigen Jahren wurde fast ausschließlich der natürliche, meist in der Schweiz gewonnene Quarz verwendet. Für die hier erwünschten longitudinalen Wellen werden aus dem Quarz durch sogenannte x-Schnitte rechteckige und runde Platten herausgeschnitten (Dickenschwinger). Aus Quarz können Schwinger für Frequenzen bis zu 50 MHz hergestellt werden. Die Platte ist dann aber nur noch 0,05 mm dick und leicht zerbrechlich.

In jüngster Zeit hat das Bariumtitanat  $\text{BaTiO}_3$  stark an Bedeutung gewonnen. Synthetisch hergestelltes gesintertes Bariumtitanat — ein keramisches Produkt — kann in jeder beliebigen Form und Größe hergestellt werden. Die wirksamen piezoelektrischen Achsen können durch die Richtung eines polarisierenden Feldes bei der Herstellung bestimmt werden, so daß es möglich ist, vielseitige, immer homogen schwingende Geber herzustellen.

Beim Vergleich von Quarz und Bariumtitanat in Tabelle I scheint der letztere günstigere Eigenschaften aufzuweisen. In erster Linie sind wesentlich kleinere Wechselspannungen zur Erzeugung gleicher Schallintensitäten erforderlich.

	Quarz	Bariumtitanat, Keramik
Schnittform	x-Schnitt	Senkrecht zur Polarisationsrichtung
Schwingungskoeffizient	2880 kHz mm	2200 kHz mm
Plattendicke	$\frac{2880}{f} = 1,14$ mm	$\frac{2200}{f} = 0,88$ mm
Wirksame Piezokonstante	$e_{11} = 5,2 \cdot 10^4$	$e_{33} = 1 \div 4 \cdot 10^6$
Zulässige Schallintensität J als Dauerbelastung	$J = 10$ W/cm <sup>2</sup>	$J = 2$ W/cm <sup>2</sup>
Bei $J \approx 25$ W/cm <sup>2</sup> notwendige Wechselspannung $U_{\text{eff}}$ zur Schwingungsanregung bei einseitiger Schallabstrahlung	$J = f^2 \cdot U_{\text{eff}}^2$ $U_{\text{eff}} \approx 2000$ V	$J = 6,2 \cdot 10^3 f^2 \cdot U_{\text{eff}}^2$ $U_{\text{eff}} \approx 25$ V
Kopplungsfaktor	10 %	46 %
Zulässige Arbeitstemperatur	ca. 400 <sup>0</sup> C	110 <sup>0</sup> C
Mechanische Widerstandsfähigkeit	sehr gut	weniger gut

Tabelle I. Vergleichswerte bei Dickenschwingung im Wasser von Quarz und Bariumtitanat bei einer Frequenz von  $f=2,5$  MHz.

Nachteilig wirkt sich allerdings bei Bariumtitanat die Begrenzung der Arbeitstemperatur auf  $110^{\circ}\text{C}$  aus, da bei höheren Temperaturen die Polarisierung verschwindet.

Bei Impulsbetrieb kann die Schallintensität bei beiden Stoffen wesentlich höher als bei Dauerbetrieb gewählt werden. Mit Quarz wurden so Belastungen bis zu  $J = 1000\text{ W/cm}^2$  erreicht.

Für eine Neuentwicklung erscheint jedoch Bariumtitanat geeigneter als der bisher verwendete Quarz.

### 3. 3 3 Technische Ausführung des Ultraschallgebers

Begreiflicherweise wurden vor Beginn einer eigenen Ultraschallgeber-Entwicklung die auf dem Markt erhältlichen Geber auf ihre Verwendung hin untersucht. Leider wird mit den notwendigen hohen Frequenzen in der Unterwasser-Nachrichtentechnik nicht gearbeitet; nur in der zerstörungsfreien Materialprüfung werden Geber bzw. Schallköpfe, wie sie auch genannt werden, wegen der erwünschten scharfen Bündelung in den Frequenzbereichen von 0,5, 1, 2,5 und 5 MHz verwendet. Die Siemens-Wasserbadköpfe ( $d_u = 24\text{ mm}$  für 2,5 MHz), eigentlich für Blechuntersuchungen in Wasser gedacht, erfüllten im großen ganzen die gestellten Anforderungen. Durch Vorversuche wurden diese auf die praktische Brauchbarkeit hin untersucht. Der eigentliche Geber ist eine ca. 1,1 mm dicke runde Quarzplatte. Die Rückelektrode ist an dem Ausgang des Impulsenders angeschlossen, während die wenige  $\mu$  dicke vordere Elektrode mit der Masseleitung über das Schallkopfgehäuse verbunden ist. An der hinteren Elektrode ist eine Absorbermasse befestigt. Denkt man sich den Absorber weg, dann wird die gesamte Energie an das Wasser abgegeben; man spricht dann von einseitiger Schallabstrahlung. Nach Lutsch [47] wird der Schwinger durch den Absorber unabhängig von der Ankopplung um ein definiertes Maß gedämpft, so daß er die kurzen Impulse übertragen kann. Bei starker Dämpfung ist der Kopf in der Lage, kürzere Impulse zu übertragen, aber der Leistungsverlust wird damit größer. Die maximale Leistung, etwa gleich wie ohne Absorber, erhält man, wenn der Schwinger bei obiger Anordnung  $\lambda/2$  dick ist (Halbwellenverbundschwinger). Hierbei ist jedoch die Nachschwingzeit des Kopfes größer als der elektrische Sendepuls. Um kürzere Ultraschall-Impulse zu erhalten, erregt man den Schwinger nicht genau in der Resonanzfrequenz, so daß nach Ausbleiben des elektrischen Impulses dieser in seiner Eigenresonanz ausschwingt, für die der selektive Verstärker weniger empfindlich ist. Für unseren Zweck spielt die Impulslänge keine wesentliche Rolle, sie muß nur bei minimalem Abstand bis zum nächsten Impuls abgeklungen sein (hier  $t \approx 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ s}$ ), da nur mit den vorderen Flanken gearbeitet wird. Bei zerstörungsfreier Materialprüfung mit Ultraschall wird eben der gesamte Impuls betrachtet, so daß für ausreichendes Tiefenaufklärungsvermögen eine Impulsdauer von  $1\text{ }\mu\text{s}$  bei 2,5 MHz angestrebt wird.

Halbwellen-Verbundschwinger (HW), bei denen zwischen dem zu beschallenden Medium und dem eigentlichen Quarz- oder Bariumtitanat-Schwinger

eine Metallplatte angeordnet ist, wobei Quarz und Metall je  $\lambda/2$  dick sind, werden mit Erfolg in der Unterwasserschalltechnik sowie für medizinische Zwecke verwendet. Der Kristall-Geber ist wirksam gegen Stoß geschützt. Will man dazu noch den hohen Strahlungswiderstand  $Z_s$  bei Quarz herabsetzen, damit die Anpassung an die letzte Stufe des Impulsenders besser ist, können noch folgende Halterungen angewendet werden, die auch als akustische Transformationsglieder bezeichnet werden: durch Verkitten einer Quarz- und Metallplatte, deren Dicke je  $\lambda/4$  beträgt (Einfront-Verbundschwinger EF) wird ein Absinken des Strahlungswiderstandes auf ca. 15 % erreicht. Auf etwa 9 % läßt sich der Strahlungswiderstand senken, wenn eine dünne Quarzplatte zwischen zwei Metallplatten mit geeigneter Dicke eingebettet wird (Frontrückschicht-Verbundschwinger FR).

Bei Verwendung von Bariumtitanat spielt diese akustische oder elektrische Anpassung wegen der für die Schall-Leistung notwendigen geringen Spannung keine so große Rolle wie beim Quarz.

Wären die Geber speziell entwickelt worden, dann wäre ein Verbundschwinger in Frage gekommen unter Berücksichtigung, daß die Nachschwingzeit kleiner als die minimale Impulsfolgefrequenz bliebe. Der Einfachheit halber wurden käufliche Siemens-Geber ohne Änderung verwendet, obwohl sich die große Dämpfung störend bemerkbar machte.

### 3. 3 4 Schallfeldgrößen

Da der verwendete Quarz-Geber mit  $U_{\text{eff}} = 2000\text{ V}$  erregt wird, ergibt sich bei einseitiger Schallabstrahlung eine Schallintensität von  $J \approx 25\text{ W/cm}^2$  nach Tabelle I.

Unter Berücksichtigung des auf der Rückseite des Schwingers angebrachten Absorbers der zwischen Quarz und Wasser angebrachten metallischen Elektrode wird ein Schallintensitätsverlust von  $\approx 40\%$  angenommen, was den tatsächlichen Verhältnissen nahe kommen dürfte. Damit wird  $J \approx 15\text{ W/cm}^2$ .

Nach Bergmann [37] hat die Schalldichte  $\bar{E}$  folgenden Wert:

$$(29) \quad \bar{E} = \frac{J}{a_w} = \frac{1,5 \cdot 10^8}{1,48 \cdot 10^5} = 1000\text{ erg/cm}^2 = 10^{-4}\text{ Ws/cm}^2$$

Die Schallwechseldruckamplitude  $P_w$  ergibt

$$(30) \quad P_w = \frac{1}{981} \cdot \sqrt{20 \rho_w \cdot a_w \cdot J} = \frac{1}{981} \sqrt{20 \cdot 1,48 \cdot 10^5 \cdot 15} = 6,8\text{ at}$$

Der Schallwechseldruck schwankt also zwischen ca. 7 at Überdruck und 7 at Unterdruck.

Mit höheren Frequenzen steigt auch der zur Kavitationsauslösung notwendige Schallwechseldruck. Nach Esche [48, 38] beträgt dieser etwa 160 at, bei  $f = 2,5\text{ MHz}$ . In unserem Falle besteht daher keine Kavitationsgefahr.

20 Für den Schallstrahlungsdruck  $S_L$  erhält man

$$(31) \quad S_L = \frac{2J}{a_w} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^8}{1,48 \cdot 10^5} = 2000 \text{ dyn/cm}^2$$

Die Schallgeschwindigkeitsamplitude  $U_w$  der Wasserteilchen ist

$$(32) \quad U_w = \sqrt{\frac{2J}{\rho_w \cdot a_w}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^8}{1,48 \cdot 10^5}} = 45 \text{ cm/s}$$

und die zugehörige Schwingungsamplitude  $A_w$

$$(33) \quad A_w = \frac{U_w}{2\pi f} = \frac{45}{2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 2,86 \cdot 10^{-6} \text{ cm} = 2,86 \mu$$

d. h. die Wasserteilchen schwingen mit einer winzigen Amplitude. Dagegen wird die Beschleunigungsamplitude

$$(34) \quad B_w = 2\pi f \cdot U_w = 2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 45 = 9,1 \cdot 10^8 \text{ cm/s}^2$$

d. h. die Beschleunigung ist etwa  $10^8$  mal so groß wie die Erdbeschleunigung.

Die Schallwellenlänge  $\lambda_w$  ist schließlich

$$\lambda_w \approx \frac{a_w}{f} = \frac{1480}{2,5 \cdot 10^6} = 0,059 \text{ cm}$$

### 3. 3 5 Abstrahlung des Schallsenders

Vor einem kolbenförmigen, schwingenden, ebenen Schallgeber mit endlichem Durchmesser besteht keineswegs ein ebenes homogenes Schallfeld. Obwohl nach dem Huygens'schen Prinzip jedes Teilchen als selbständiger Kugelstrahler wirkt, entsteht durch Interferenzen ein der Fraunhoferschen Beugungserscheinung in der Optik ähnliches Bild. Die theoretische Berechnung bedingt einen erheblichen mathematischen Aufwand.

Für eine kreisförmige Kolbenmembrane mit Durchmesser  $d_u$  besteht folgende Näherungsformel:

$$(35) \quad \sin \vartheta = \frac{1,22 \cdot \lambda}{d_u}$$

die den halben Öffnungswinkel  $\vartheta$  des Kegels angibt, innerhalb dessen fast der gesamte Schall abgestrahlt wird.

Je höher die Frequenz und je größer der Durchmesser des Schallgebers ist, desto mehr wird die abgestrahlte Energie gebündelt. Man spricht dann von einer ausgeprägten Richtcharakteristik, wie sie in unserem Fall auch erwünscht ist.

Für  $d_u = 24 \text{ mm}$  und  $f = 2,5 \text{ MHz}$  ist in Wasser  $\lambda_w = 0,59 \text{ mm}$

$$\sin \vartheta = \frac{1,22 \cdot 0,59}{24} = 0,030$$

$$\vartheta \approx 1,7^\circ$$

d. h. der ganze Öffnungswinkel beträgt theoretisch nur  $\approx 3,4^\circ$ .

Dieser theoretische Wert wurde im Meßkanal des Institutes experimentell überprüft (Bild 23). Bei einem Geberabstand von  $l = 10 \text{ m}$ ,  $f = 2,5 \text{ MHz}$  und Quarzdurchmesser  $d_u = 24 \text{ mm}$  wurde ein halber Öffnungswinkel  $\vartheta = 1,2^\circ$  gemessen.

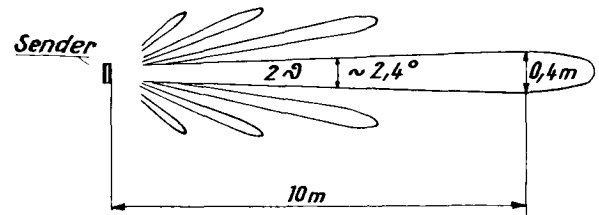


Bild 23. Schallabstrahlung einer der verwendeten Quarz-Kolbenmembranen,  $d_u = 24 \text{ mm } \phi$ ,  $f = 2,5 \text{ MHz}$ , ausgemessen im Meßkanal des Institutes für hydraulische Maschinen und Anlagen an der ETH. Der Empfänger war vertikal und in Strahlrichtung verschiebbar angeordnet (Meßschlitten am Schirmwagen befestigt).

Da aber bei dieser Distanz die Dämpfung schon recht beachtlich ist, scheint dieser Winkel in Wirklichkeit eher etwas größer zu sein, so daß die Übereinstimmung der beiden Werte recht gut ist.

In diesem Zusammenhang sei noch der akustische Schallstrahlungswiderstand  $Z_S$  erwähnt. Die von einem schwingenden Kristall zur Abstrahlung der akustischen Leistung  $P_{ak}$  verbrauchte elektrische Leistung läßt sich durch folgende Beziehung darstellen:

$$P_{ak} = \frac{U_{eff}}{Z_S} [\text{Amp}]$$

Für einseitige Abstrahlung bei Quarz entsteht daraus folgende Formel:

$$(36) \quad Z_S \approx \frac{7 \cdot 10^{12} \cdot \rho_0 \cdot a_0}{f^2 \cdot A_G} = k \cdot \rho_0 \cdot a_0 [\Omega]$$

$A_G =$  Geberstrahlfläche. Siehe Bergmann [32, S. 186].

Man sieht, daß der akustische Strahlungswiderstand  $Z_S$  dem Schallwiderstand  $\rho_0 \cdot a_0$  des umgebenden Mediums proportional ist. Dieser Zusammenhang wird, wie schon erwähnt, bei den beiden bisherigen käuflichen amerikanischen Ultraschall-Durchflußmessern zur Massebestimmung benützt.

Für die hier verwendeten Geber in Wasser ergibt sich ein Schallstrahlungswiderstand:

$$Z_S \approx \frac{7 \cdot 10^{12} \cdot 1,48 \cdot 10^5}{(2,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 4,54} = 36,6 \text{ k}\Omega$$

Die Kenntnis des Strahlungswiderstandes  $Z_S$  ist für die Anpassung des Schwingkristalles an den Impulssender von Bedeutung. Da dieser Sender von Kristall mit seinem  $Z_S$  belastet wird, wird eine maximale akustische Leistungsabgabe nur erreicht, wenn  $Z_S$  in die Größenordnung des Innenwiderstandes des Senders kommt. Dies kann durch eine elektrische oder akustische Transformation hinter dem Kristall, wie unter 3. 3 3 beschrieben, geschehen.



Die oben besprochene Interferenz der einzelnen Kugelwellen führt bei Kolbenmembranen zu einer Richtcharakteristik. Im Nahbereich aber, also direkt am Geber, bilden sich Interferenzfelder. Mit wachsendem Geberdurchmesser und zunehmender Frequenz schieben sich diese Interferenzfelder immer weiter hinaus. Nach Born [40] beträgt dieses Nahfeld für  $d_u = 2,5 \text{ cm } \phi$  und  $f = 2,5 \text{ MHz}$  ca. 60 cm.

Mißt man mit geringerem Geberabstand, dann muß dieser so variiert werden, daß ein Schallmaximum sich einstellt; praktisch traten kleinere Entfernungen im Rahmen dieser Arbeit nicht auf.

3. 4 Elektronische Meßapparatur

3. 4 1 Allgemeiner Aufbau

Der elektronische Teil der Meßapparatur setzt sich prinzipiell aus zwei vollkommen gleichen Kreisen zusammen: HF-Impulssender — Ultraschallteil — Empfangssignalverstärkung — Umformung in Trigger-signal für Sender (Bild 24 u. 30). Jeder Kanal für sich stellt im Grunde genommen einen Impulsoszillator dar, dessen Impulsfolgefrequenz primär durch die Laufzeit des Signals im Wasser bestimmt wird. Aus diesen beiden unabhängigen Kreisen werden an geeigneter Stelle diese beiden Signale — also die Impulsfolgefrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  — mittels eines Koinzidenzverfahrens miteinander verglichen, so daß  $f_D$  bzw. in der praktischen Ausführung  $f_E$  und  $f_M$  bestimmt werden kann. Der zeitliche Abstand dieser Koinzidenzsignale ist dann der reziproke Wert von  $f_D$  bzw.  $f_E$  und  $f_M$ , so daß durch eine relativ

einfache Zeitmessung des verstärkten und umgeformten Koinzidenzsignales diese Differenzfrequenzen gemessen werden können (Bild 17 und 25). Mit Formel (26) kann daraus  $\bar{v}$  berechnet werden.

Es wurden, soweit irgend möglich, auch hier käufliche Geräte verwendet, doch mußten der Verstärker, Auswert- sowie Steuergeräte speziell entwickelt werden; nur die eigentlichen Sender konnten von Siemens bezogen werden. Dies konnte in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung für industrielle Forschung (AFIF) des Institutes für technische Physik an der ETH, Leitung Prof. E. Baumann, verwirklicht werden. Die elektronischen Schaltschemas wurden von Herrn Dipl. El. Ing. A. Mandozzi dimensioniert, während vom Verfasser die praktische Ausführung in den Laboratorien der AFIF erfolgte. Es ist der AFIF allgemein und im besonderen Herrn Mandozzi zu verdanken, daß der recht komplizierte elektronische Teil der Ultraschall-Apparatur in einer sehr kurzen Zeitspanne fertiggestellt werden konnte. Bild 24 zeigt das gesamte Blockscha.

3. 4 2 Impulssender

Da die Ultraschallgeber zum Siemens-Impulsgerät II verwendet wurden, war eine Übernahme auch der Sender naheliegend. Die Arbeitsweise dieser Sender ist nach Lutsch [47] folgende: Der HF-Impuls-Generator arbeitet in einer rückgekoppelten Meißner-Schaltung, bei der an der Röhre zur Aufrechterhaltung der Schwingung eine Betriebsgröße — hier die Schirmgitterspannung — fehlt. Anstelle einer Gleichspannung wird ein Steuerimpuls — hier Triggerimpuls genannt — auf das Schirmgitter gegeben. Während dieser kurzen Zeitspanne schwingt der Kreis. Nach

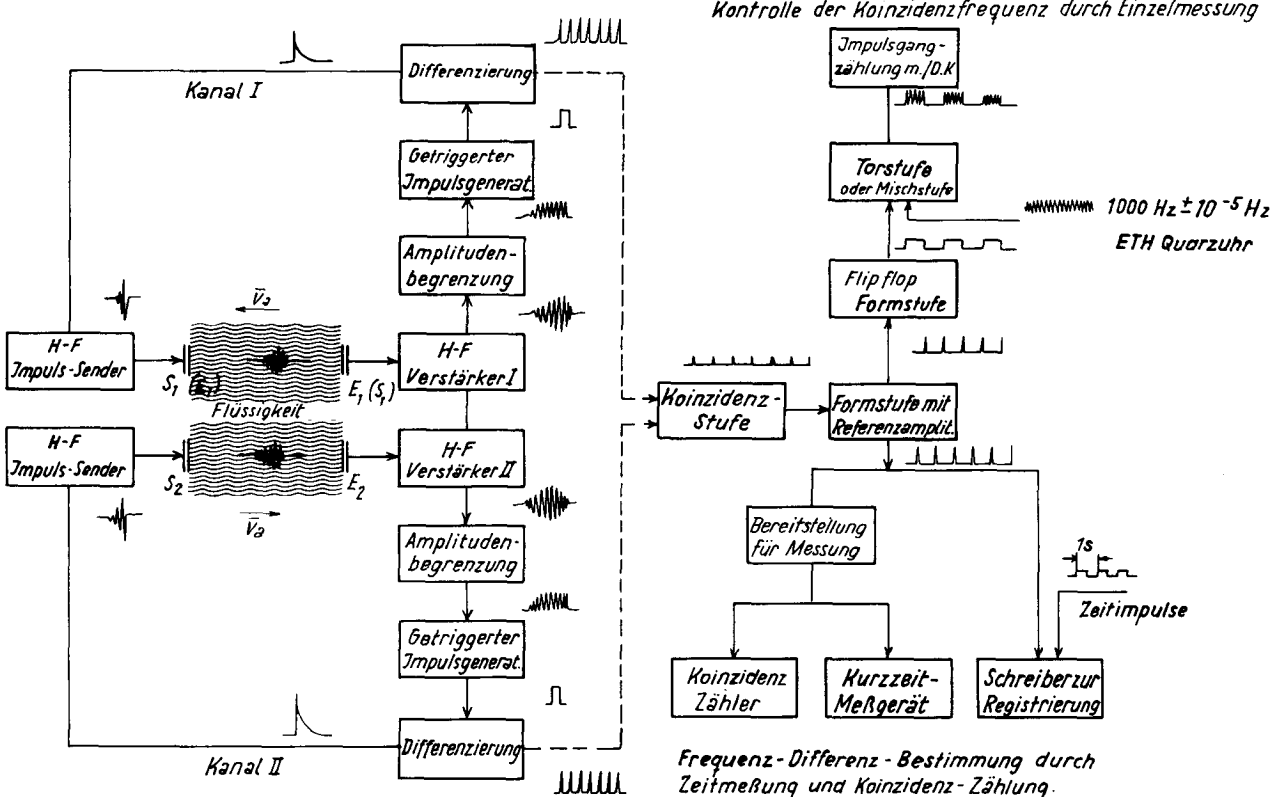


Bild 24. Vereinfachtes Blockscha des entwickelten Ultraschallverfahrens. Links sind die beiden gleichen Kanäle I und II dargestellt, während rechts die Koinzidenzstufe mit den verschiedenen Meß- und Kontrollmöglichkeiten angedeutet ist.

22 Ausbleiben der Triggerspannung reißen die HF-Schwingungen ab. Der HF-Impuls wird in zwei C-Punkt-Verstärkerstufen (Treiberstufen) auf eine für den Ultraschall-Geber ausreichende Leistung bzw. Spannung ( $U_{\text{eff}} \approx 2000 \text{ V}$ ) gebracht.

Die Sender können mit folgenden Trägerfrequenzen 0,5, 1,0, 2,5 und 5,0 MHz betrieben werden, wodurch je nach den Erfordernissen die günstigsten Sendeköpfe verwendet werden können. Bei dieser Versuchsausführung wurden 2,5 MHz verwendet.

#### Anpassung der Geber an die Sender

Die bei der C-Punkt-Verstärkung zwangsläufig mitentstehenden Oberwellen der Trägerfrequenz mit ihren Seitenfrequenzen werden durch elektrische Nebenkreisfilter auf Sender- und Verstärkerseite angesehen.

Die Abnahme der Ausgangsleistung bei Vergrößerung der Kabellänge hängt von zwei Faktoren ab:

- a) Dämpfung im Kabel,
- b) Verstimmung des Ausgangskreises.

Zu Punkt b) ist folgendes zu bemerken:

Die Kapazität des Schallkopfes und des Kabels ist Bestandteil des Ausgangskreises. Der Ausgangskreis muß so gedämpft werden, daß die Bandbreite für die impulsmodulierten Schwingungen bei 2,5 MHz ausreichend ist. Deswegen ist eine Verstimmung des Ausgangskreises bis zu einer gewissen Grenze zulässig. Durch einen niederohmigen Ausgang aus der Endstufe und durch eine Hinauftransformation direkt am Geber ist es möglich, die zulässige Kabellänge für eine gegebene Dämpfung zu vergrößern. Mit der hier verwendeten Apparatur könnten mit Quarz-Schwingern und speziellen Anpassungsteilen noch 40 m Kabellänge zugelassen werden.

Diese Anpassungsschwierigkeiten fallen bei Verwendung von Bariumtitanat — durch die niederohmige Erregung — größtenteils weg.

In Bild 25 ist der Impuls am Senderausgang mit angeschlossenem Sendequarz zu sehen. In Bild 26

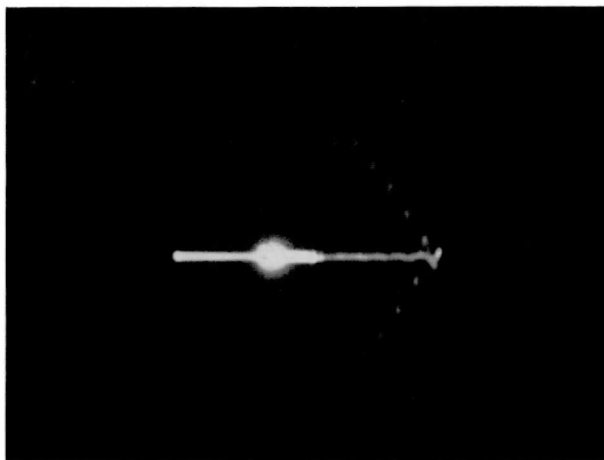


Bild 25. Signal am Senderausgang mit angeschlossenem Sendequarz bei 2,5 MHz Trägerfrequenz und 3 m Kabel.

ist der gleiche Impuls fotografiert, wie dieser am Empfangsverstärker erscheint. Die Dämpfung gerade der ersten Flanken ist — wie schon erwähnt — in erster Linie durch den am Quarz befestigten Absorber bedingt.

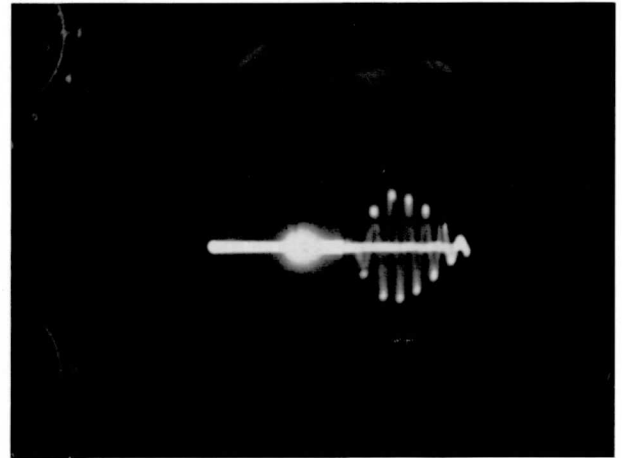


Bild 26. Signal nach Durcheilen der Flüssigkeit am Verstärkereingang. Gleiche Quarzgeber als Empfänger.

#### 5. 4 3 Zwei-Kanalverstärker

Um den speziellen Erfordernissen gerecht zu werden, wurde der Empfangsverstärker als Sonderentwicklung ausgeführt. Als Eingangsempfindlichkeit wurde ca.  $40 \mu\text{V}$  angenommen.

Abgesehen von den elektrisch und konstruktiv bedingten Unstabilitäten im System ist die Genauigkeit der Meßeinrichtung eigentlich nur vom Rauschabstand am Verstärkereingang abhängig. Durch eine Demodulation kann auch bei idealem Signal am Verstärkereingang keine Verbesserung der Meßgenauigkeit erzielt werden. Daher wurde auf eine Demodulation verzichtet und das ankommende Impulspaket direkt verarbeitet. Für die Messung ist es nicht unbedingt nötig, die erste Flanke dieses Impulspaketes zu verwenden — oft verschwindet diese im Rauschen — es genügt, immer mit der gleichen Schwingung zu operieren (z.B. der dritten Schwingung). Dagegen ist es unumgänglich, ein Eindeutigkeitskriterium zur Bestimmung der gewählten Flanke vorzusehen. Dies kann z. B. durch ein Amplitudensieb (Begrenzung) oder durch Einzählen der Schwingungen geschehen. Ersterer Vorschlag hat den Nachteil, daß ein gleichmäßiger Eingangspegel Voraussetzung ist, d. h. Senderausgangsamplitude, Dämpfung in der Flüssigkeit, Winklereinstellung der Köpfe und Verstärkung müssen während der Messung möglichst konstant bleiben. Eine Einzählung der Schwingung ist in der praktischen Ausführung recht kompliziert.

In dieser Ausführung wurde der erste Gedanke verwirklicht. Ein Amplitudensieb wurde durch die Triggerempfindlichkeit der Formstufe (getriggertem Impulsgenerator) erreicht. Die letzten Stufen im Verstärker bewirken eine zusätzliche Amplitudenbegrenzung des oberen, nicht interessierenden Signalpegels. Die notwendige Bandbreite bedingt eine relativ große Anzahl Verstärkerstufen. Bild 27 zeigt das begrenzte Signal vor dem Impulsgenerator.

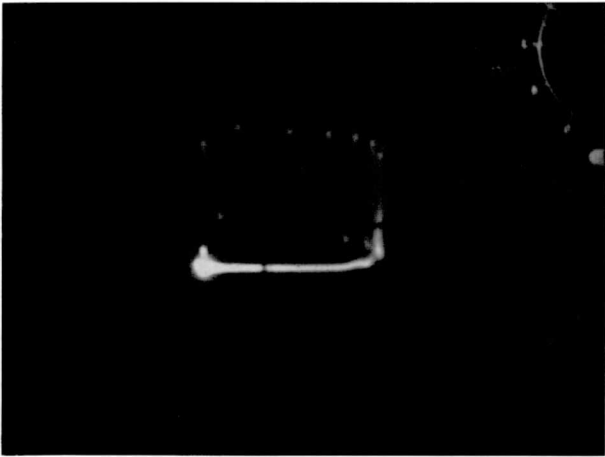


Bild 27: Verstärktes und amplitudenbegrenztes Signal vor dem als Amplitudensieb wirkenden Impuls-generator. Trägerfrequenz 2,5 MHz. Verzerrung durch den Kathodenstrahl-Oszillographen (KO) bedingt.

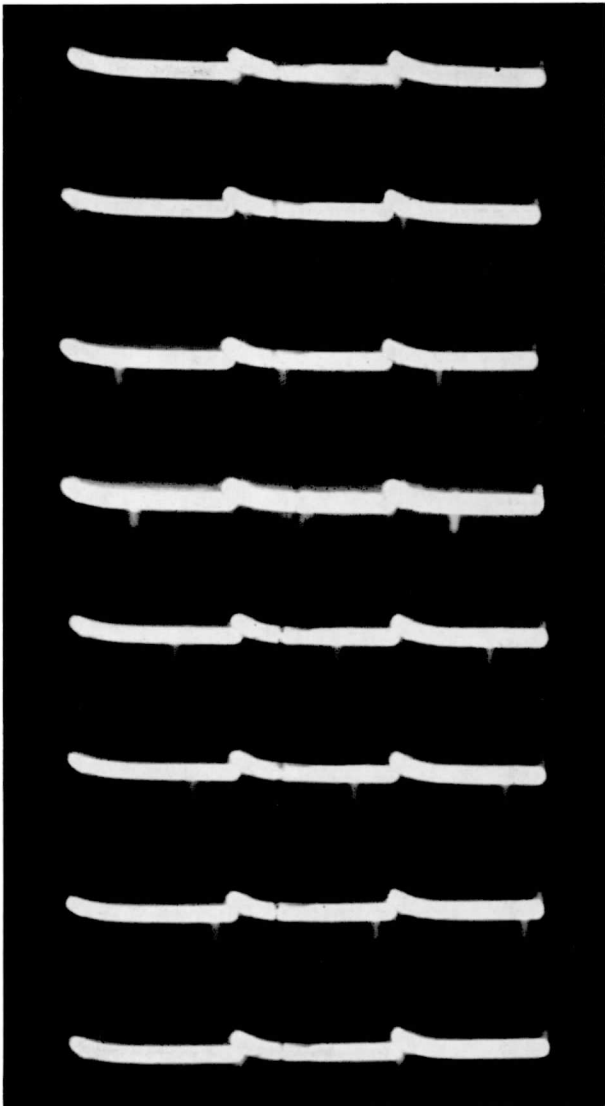


Bild 28. Ablauf einer Koinzidenz am KO fotografiert. KO ist auf Kanal II synchronisiert (längeres vertikales Signal). Die Bewegung des Signals in Kanal I ist erkennbar. Die hierzu notwendige Zeit ergibt die Differenzfrequenz.

Die beiden erwähnten Impulsgeneratoren bestehen im wesentlichen aus einem monostabilen Multivibrator, der durch die erste Flanke des Signals I bzw. II gestartet wird, wobei der Einsattpunkt variiert werden kann (Amplitudensieb). Die Flankensteilheit des über eine Ausgangsstufe dem Sender I bzw. II zugeführten differenzierten Triggerimpulses beträgt  $0,1 \mu\text{s}$ , um den nächsten Sendeimpuls mit möglichst steiler Flanke zu erzeugen.

Ebenfalls von den beiden Ausgangsstufen dieser getriggerten Impulsgeneratoren — also Kanal I und II — werden bei jedem Triggerimpuls Signale an eine gemeinsame Koinzidenzstufe gegeben. Die im Anodenkreis entstehende Koinzidenzfrequenz ist dann die schon erwähnte Differenzfrequenz  $f_D$  der beiden Impulsfolgefrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  bei gleichen Geberabständen (sonst  $f_E$  und  $f_M$ ). Bild 28 zeigt den Ablauf einer Koinzidenz, am KO fotografiert.

Mit Hilfe einer Formstufe mit Referenzamplitude, bestehend aus einem monostabilen Multivibrator, wird dieses Koinzidenzsignal so geformt, daß normale Kurzzeitmesser sowie Registriergeräte angeschlossen werden können (5 Volt Ausgang). Gemessen werden ein oder mehrere zeitliche Koinzidenzabstände, wobei es unwichtig ist, ob die beiden Kanäle getrennt oder gleichzeitig gestartet werden. Zwecks direkter Kontrolle der Koinzidenzabstände wurde mit Hilfe eines bistabilen Multivibrators (Flipflop) ein Rechtecksignal herausgeführt, wobei eine Koinzidenz ein- und die folgende ausschaltet. Diese Rechteckimpulse steuern über eine Mischstufe, die von der ETH-Quarzuhr (Frequenz-Genauigkeit auf  $\pm 1/10^8$ ) kommende Trägerfrequenz von 1 kHz. Mit einem von der AFIF entliehenen Dekadenzähler konnten die einzelnen zeitlichen Koinzidenzabstände durch Auszählen sehr genau bestimmt werden, wodurch die elektronisch bedingten Schwankungen bei den Messungen erfaßt werden konnten.

Bild 29 zeigt die Apparatur bei der Inbetriebsetzung in den Laboratorien der AFIF. Der Abstand der Köpfe im Wassertrog betrug 70 cm.

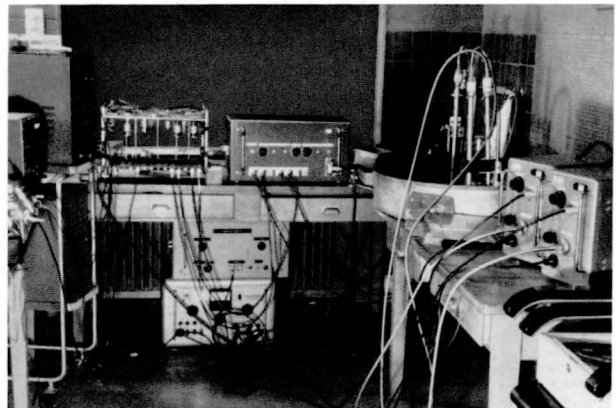


Bild 29. Ultraschall-Apparatur bei der ersten Inbetriebsetzung in den Laboratorien der AFIF. Der Abstand der Köpfe im Wassertrog betrug 70 cm.

Bei den kleinen, sehr genau zu messenden Differenzen der beiden Impulsfolgenfrequenzen (z. B.  $f_1 = 1000,0$  Hz,  $f_2 = 1000,3$  Hz bei  $l = 1,4$  m und  $v = 0,3$  m/s folgt  $f_D = 0,3$  Hz) machen sich die kleinsten Variationen der Impulsfrequenzen bei der Koinzidenzfrequenz sehr stark bemerkbar. Hier liegt eine der Hauptschwierigkeiten, wenn große Genauigkeit angestrebt wird. Sender, Befestigung der Geber, Verstärker, Triggerimpulsbildung, Netzspeisung usw. müssen in ihren Veränderungen während der Messung so klein bleiben, daß der Einfluß auf die Koinzidenzfrequenz innerhalb der durch die vorgeschriebene Meßgenauigkeit bedingten Toleranzen bleibt. Besonders störend machten sich unter anderem Netzschwankungen bemerkbar. Nach systematischen, experimentellen Untersuchungen durch Variation immer nur einer Größe konnte dieses Problem durch geeignete Stabilisierungsmaßnahmen befriedigend gelöst werden.

Es zeigte sich, daß eine vollkommene Koinzidenz, d. h.  $f_1 = f_2$  wahrscheinlich aus Gründen des Übersprechens der zwei Kanäle für die eigentliche Messung nicht besonders geeignet ist. Eine künstliche Laufzeitdifferenz — schon in der Eichstellung —, erzielbar entweder durch eine minimale Abstandsdifferenz

auf beiden Kanälen oder durch eine konstante Verzögerung z. B. durch Verlängern einer der Trigger-Zuführungsleitungen, führt zur Vermeidung dieser unerwünschten Einstellung. In Bild 30 ist das vereinfachte Prinzip-Schaltbild dargestellt.

Dies sind die wesentlichen Punkte des elektronischen Teiles der Meßapparatur. Weitere Einzelheiten sowie die Beschreibung der beim Aufbau der Apparatur auftretenden Schwierigkeiten und deren Beseitigung würden über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Über die einzelnen elektronischen Probleme wird A. Mandozzi in einer separaten Publikation berichten.

### 3. 5 Meßtechnische Probleme

#### 3. 5 1 Hydraulische Meßeinrichtung

Die Hauptversuche wurden im Laboratorium des Institutes für hydraulische Maschinen und Anlagen an der ETH durchgeführt.

Es stand ein geschlossener Kreislauf zur Verfügung. Eine konstant fließende Wassermenge (bis zu 460 l/s) wurde dadurch erzielt, daß eine Niederdruckpumpe das Wasser in einen Hochbehälter — 4 m über Meßkanal — pumpte. Der Oberwasserspiegel in

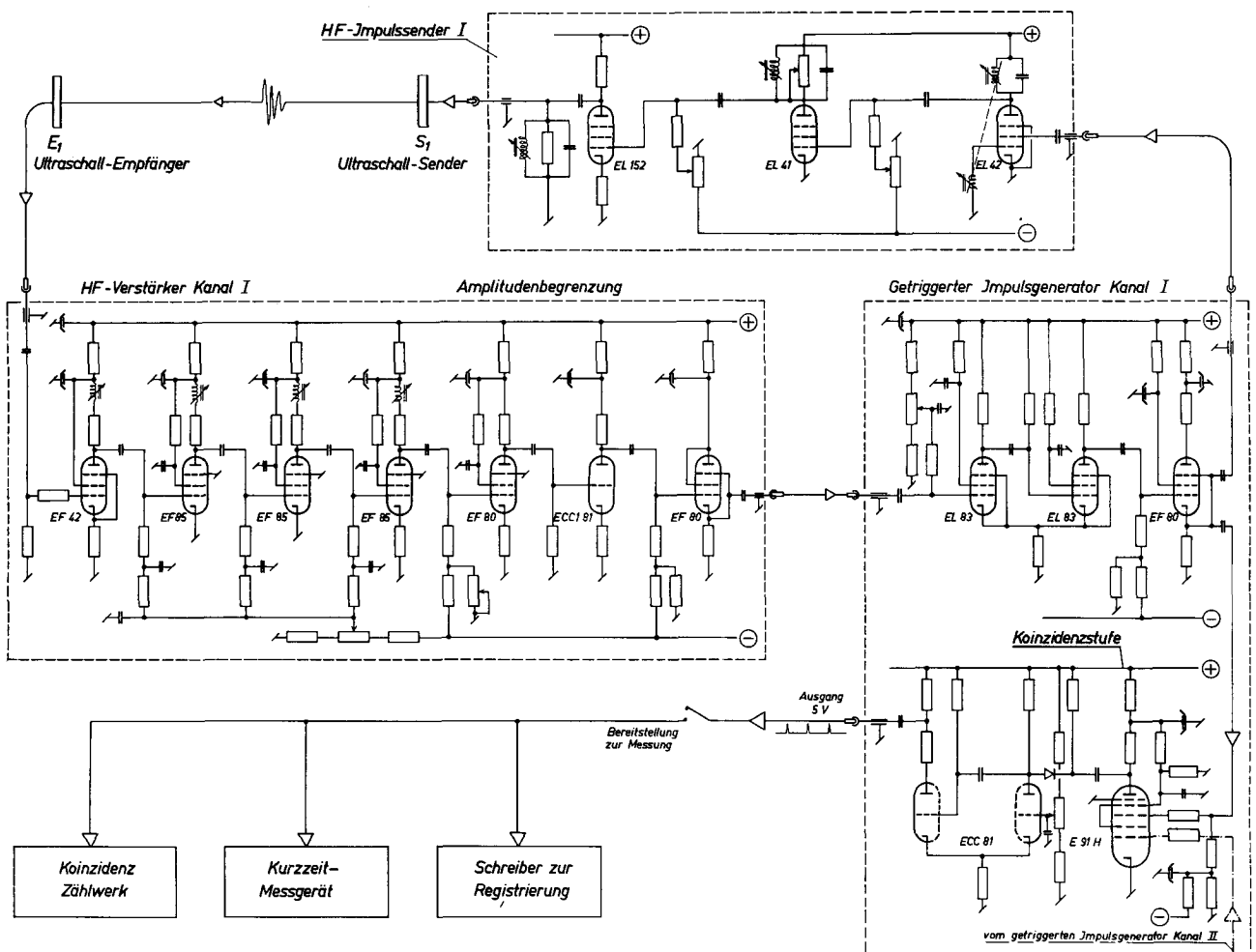


Bild 30. Vereinfachtes Prinzip-Schaltbild der Ultraschall-Meßeinrichtung. Schirmgitterkreise und der Netzteil sind zur besseren Übersicht teilweise weggelassen. Der zweite gleiche Teil der Meßeinrichtung (Kanal II) ist nicht gezeichnet.

diesem Behälter wird durch einen Überfall konstant gehalten. Von diesem wird das Wasser durch eine blockierte Kaplan turbine geleitet, deren Leitradöffnung zur Regulierung der gewünschten Wassermenge dient. Nach dem Durchfließen von Beruhigungsrechen strömt das Wasser in den 35 m langen und 1 m breiten Meßkanal.

Die Anlage ist so eingerichtet, daß Schirm-, Flügel-, Überfall- und Behältermessungen gleichzeitig durchgeführt werden können. Der Meßschirm läuft im ersten Teil des Meßkanales, während die Flügelmeßeinrichtung jeweils an der gewünschten Stelle eingebaut werden kann. Hinsichtlich der Flügelmessung ist noch zu erwähnen, daß bei dem verhältnismäßig kleinen Meßquerschnitt der Anteil der dabei nicht erfaßten Randzonenströmung die Meßgenauigkeit der Flügelmessung etwas beeinträchtigt. Der geeichte Überfall befindet sich am Ende des Meßkanales. Durch Betätigung von zwei Schützen kann der gesamte Wasserstrom kurzzeitig in einen geeichten Behälter (28000 l Fassungsvermögen) geleitet werden. Aus diesem Behälter wird das Wasser nach der Messung wieder in den Rücklaufkanal gepumpt.

Um die Ultraschall-Einrichtung auch mit größeren Strömungsgeschwindigkeiten (bis  $v = 1$  m/s und  $Q = 840$  l/s) zu erproben, wurde das Wasser von der Niederdruckpumpe direkt vor die Beruhigungsrechen geleitet. Allerdings mußte bei diesen verhältnismäßig großen Wassermengen die Überfallwand

erniedrigt werden, um den Wasserspiegel im Meßkanal und Rücklaufkanal in den zulässigen Grenzen zu halten. Leider konnten daher bei  $Q > 460$  l/s neben der Ultraschallmessung nur noch die Schirmmessung und teilweise die Flügelmessungen durchgeführt werden.

Die Schirm-, Flügel-, Überfall- und Behältermessungen wurden nach den Vorschriften in den Schweizer Regeln für Wasserturbinen [1] durchgeführt.

### 3. 5 2 Anordnung der Geber

Für diese erste Ausführung wurde eine senkrecht verschiebbare Anordnung der Geber an den beiden Kanalwänden gewählt (siehe Bild 20, 2. Vorschlag). Zur Durchführung einer Messung werden die vier Köpfe in die gleiche horizontale Meßebebene gebracht. Es wurde immer nur in einer Ebene gemessen. Aus mehreren in verschiedenen Höhen durchgeführten Messungen wird, ähnlich wie bei den Flügeln, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im gesamten Querschnitt graphisch bestimmt. Diese Anordnung erlaubte es, günstigste Meßwinkel, Anzahl der Meßhorizontalen, Einfluß der Randzone, beste Einstellung der Köpfe usw. zu untersuchen. In Bild 31 ist die gesamte Meßeinrichtung, wie sie für die erste Versuchsserie verwendet wurde und die Anordnung der vier Geber auf den beiden Meßschlitten erkennbar.

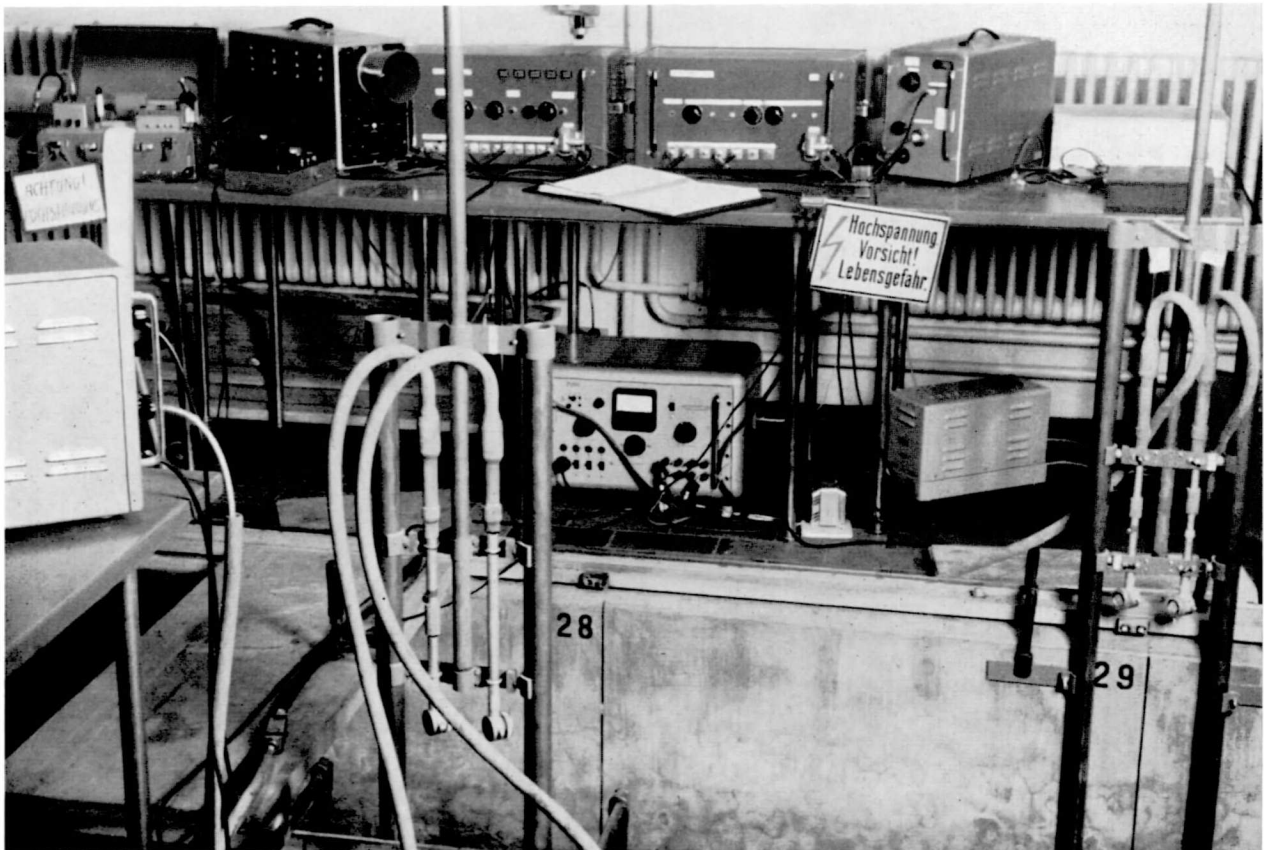


Bild 31. Gesamte Ultraschall-Meßeinrichtung, wie sie für die erste Versuchsserie verwendet wurde. Meßschlitten sind hochgezogen. Zuleitungen, besonders die Übergangsstellen, mit speziellem Gummischlauch wasserdicht abgeschlossen.

26 Der Abstand in Strömungsrichtung zwischen Sender und Empfänger betrug 1 m. Der Meßwinkel  $\beta$  betrug  $43,52^\circ$ , der mittlere Geberabstand  $l = 1344,6$  mm. In Bild 32 ist der Blick gegen Strömungsrichtung bei leerem Kanal festgehalten.

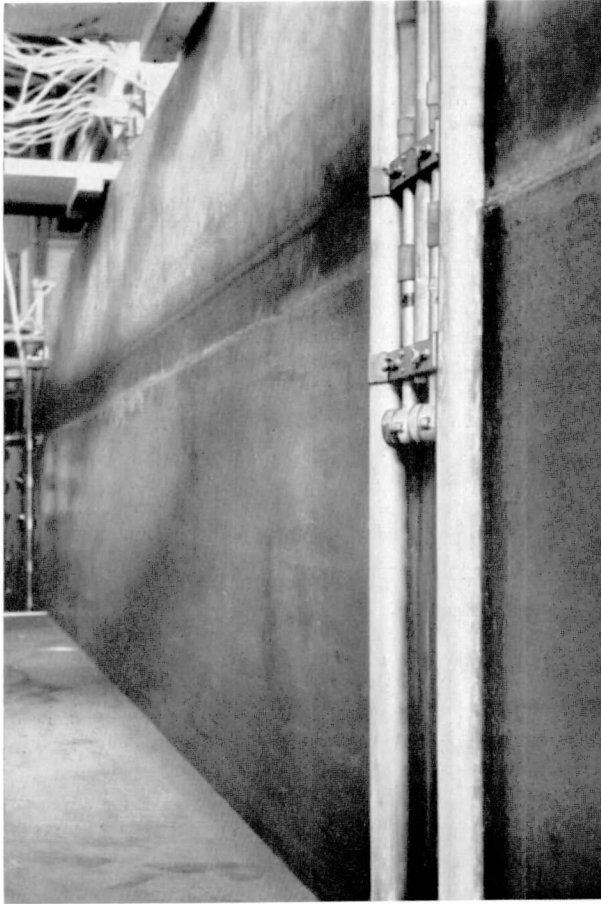


Bild 32. Ansicht gegen Strömung bei leerem Kanal. Im Vordergrund die Gleitstangen mit den Meßschlitten, auf denen die Geber angeordnet sind. Im Hintergrund ist eine Flügelmeßeinrichtung mit Tauchdecke erkennbar. Für die Vergleichsmessung wurde eine vertikal verschiebbare Flügelstange mit 5 Flügeln verwendet.

#### Anzahl der Meßhorizontalen

In Anlehnung an die Schweizer Regeln für Wasserturbinen [1] wurde mit der Ultraschall-Einrichtung in genauso vielen Horizontalen gemessen, wie dort für Flügelmessungen in offenen Kanälen empfohlen wird. Mit der hier verwendeten Einrichtung konnte die Randzone bis 20 mm vom Boden entfernt gemessen werden.

#### Einstellung der Sender- und Empfänger-Geber

Das Einstellen und Ausrichten der Köpfe geschieht folgendermaßen: Mittels einer sehr genauen Wasserwaage werden die als Schienen dienenden Al-Rohre vertikal ausgerichtet. Dann werden die Geberabstände in den verschiedenen Meßstellungen auf beiden Kanälen gemessen und kontrolliert, ob sie innerhalb der zulässigen Grenzen übereinstimmen. Diese Toleranzen hängen vom Meßabstand und dem zu messenden Geschwindigkeitsbereich ab. Erfah-

rungsgemäß genügte es, in der obersten Stellung den Geberabstand zu messen, wenn die Gleitschienen genau vertikal ausgerichtet waren. Anschließend wird die Apparatur in Betrieb gesetzt. Durch eine besondere Einstellung werden die Sender zur dauernden Erzeugung von Impulsen gebracht. Die beiden Meßschlitten werden auf gleicher Höhe so angeordnet, daß die vier Köpfe gerade noch im Wasser sind. Durch Drehen der Geber — für Feineinstellung mittels einer Mikroschraube — wird das Strahlmaximum gesucht. Dazu wird das empfangene Signal am KO-Schirm betrachtet. Erst wird der Sender- und dann der Empfänger-Geber eingestellt. Praktisch stimmte diese einmalige Einstellung dann in allen Höhen, sofern die Gleitschienen gut ausgerichtet waren.

#### 5. 5 3 Einbau und Verkleidung der Geber

Für die erste Versuchsserie waren die Geber offen im Kanal angeordnet, wie es aus den Bildern 31, 32 und 33 ersichtlich ist.

Für genaue Versuche ist diese offene Anordnung der Geber nicht sehr geeignet, da es schwer ist, eine eindeutige Breite zur Berechnung der mittleren Wassermengen aus der Geschwindigkeit festzulegen. Wie schon erwähnt, sollte die ganze Ultraschall-Meßeinrichtung möglichst außerhalb des Meßquerschnittes liegen, was folgende Vorteile mit sich bringt:

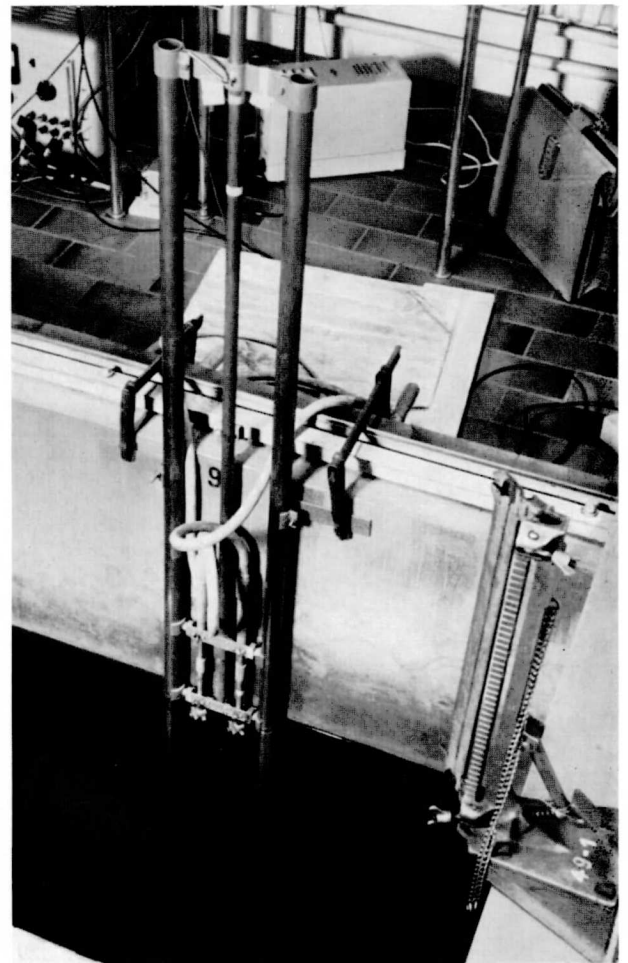


Bild 33. Blick auf den Meßschlitten mit gerade noch eingetauchten Köpfen.

1. Die zu messenden Strömungsverhältnisse werden nicht gestört.
2. Es liegt eine eindeutige seitliche Begrenzung vor.
3. Die Meßeinrichtung kann wirksam gegen Fremdkörper geschützt werden.

Um das nachträgliche Anbringen von zwei Aussparungen (320×60 mm) in den Betonwänden des Meßkanals zu vermeiden, wurde im Ultraschallbereich eine seitliche Auskleidung an den beiden Wänden angebracht, hinter der die gesamte Ultraschall-Meßeinrichtung, außerhalb des Meßquerschnittes also, angeordnet werden konnte. Bild 34 zeigt diese Al-Auskleidung in Strömungsrichtung gesehen.

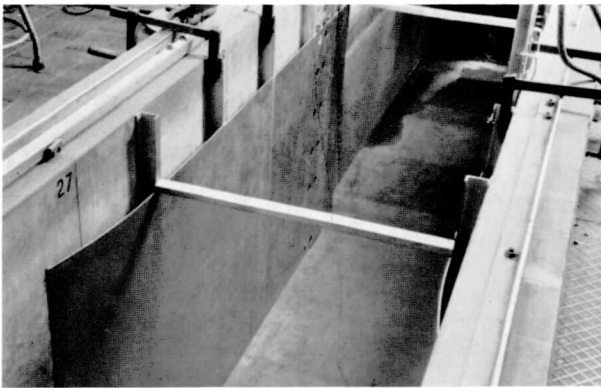


Bild 34. Seitliche Al-Auskleidung des Kanals mit sanftem Übergang am Eintritt. Die Öffnungen für die Ultraschallmessungen auf den verschiedenen Höhen sind gut erkennbar.

In Bild 35 ist der Meßschlitten nach Einbau der Verkleidung sichtbar. Um den Einfluß von Wirbelströmungen hinter der 60 mm von der Kanalwand entfernten Al-Verkleidung zu vermeiden, sind auf den eigentlichen Meßköpfen abgeschrägte „Hütchen“ befestigt, so daß zwischen diesen und der Verkleidung nur ein Spalt von wenigen mm bleibt.

Um ganz eindeutige hydraulische Verhältnisse zu schaffen, d. h. vollkommen freien, ungestörten und begrenzten Meßquerschnitt, wurden diese Öffnungen für die Hauptversuche mit einer Spezial-Al-Folie abgedeckt. Diese Folie war so gewählt, daß Sendepulse bei der gewählten Trägerfrequenz von 2,5 MHz noch mit einem tragbaren Amplitudenverlust (ca. 30 %) durchdrangen. Damit waren die für strenge Vergleichsmessungen erwünschten Einbaubedingungen erreicht. Bild 36 vermittelt einen Eindruck der vollkommen abgedeckten Geber (siehe auch Bilder 42, 44 und 46).

Es wurden Durchschallungsversuche mit verschiedenen Materialien gemacht. Gut bewährte sich feinkörniges Al-Blech mit  $d = 1,5$  und  $1,8$  mm Wandstärke bei einem Winkel von  $53^\circ$  bzw.  $60^\circ$ . Dieses experimentelle Ergebnis stimmte recht gut mit den berechneten Werten überein.

Die Schalldurchlässigkeit wird maximal, wenn die Blechstärke in Senderichtung ( $f = d/\sin\beta$ ) folgende Beziehung erfüllt:

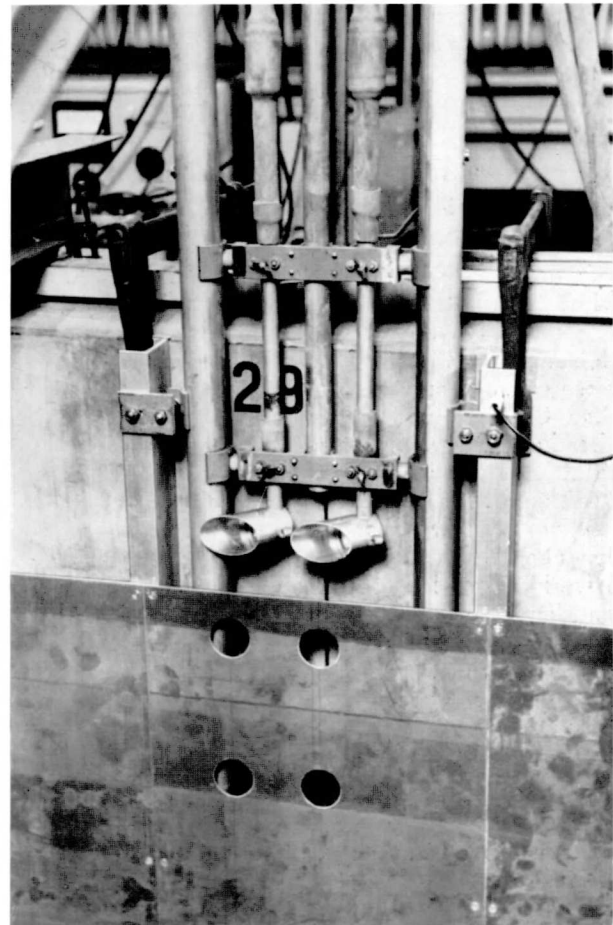


Bild 35. Detail der verkleideten Ultraschallköpfe mit „Hütchen“, um den Einfluß der Wirbel hinter der Wand zu unterbinden.

$$f = n \cdot \frac{\lambda_{Al}}{2} \quad \begin{array}{l} n = \text{ganze Zahl} \\ \lambda_{Al} = \text{Wellenlänge bei Trägerfrequenz (2,5 MHz) in Al-Blech} \end{array}$$

oder anders geschrieben

$$d = \frac{n}{2} \sin\beta \cdot \lambda_{Al}$$

Leider wird aber schon bei einer Drehung um 1 Grad die Durchschallung bedeutend schlechter.

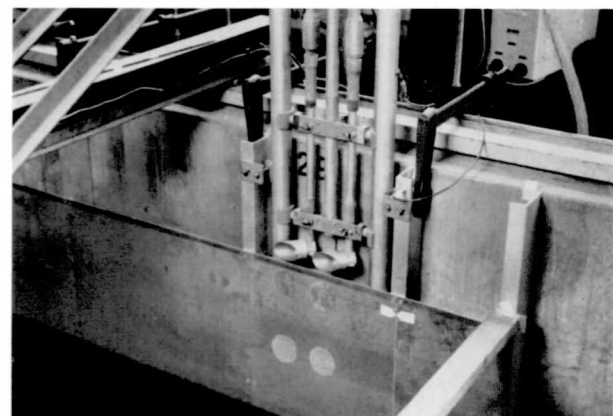


Bild 36. Geber hinter Al-Auskleidung mit Spezialfolie als seitlicher Begrenzung. Vollkommen ungestörter und eindeutig begrenzter Meßquerschnitt.

28 Außerdem steigt bei  $\beta < 50^\circ$  die Reflexion stark an. Aus diesen Gründen wurde für die erste Entwicklung Al-Folie gewählt. Bei einem Druckunterschied ist ebenfalls eine Lösung in dieser beschriebenen Art zu suchen.

### 3. 5 4 Anordnung der elektronischen Apparate

Für die erste Versuchsserie wurde die Apparatur, wie sie im Bild 31 sichtbar ist, aufgestellt. Es erwies sich als notwendig, Sender und Heiztrafos für die Heizung der Röhren mit stabilisiertem Netzstrom zu versorgen. Besonders sorgfältig mußte die Erdung aller Geräte und der die Meßköpfe umgebenden Metallteile ausgeführt werden. Alle elektrischen Verbindungen wurden in speziell abgeschirmten Kabeln ausgeführt. Das Umschalten von „Eichen“ auf „Messen“ wurde durch Vertauschen der Anschlüsse von Sendekopf  $S_1$  und Empfängerkopf  $E_1$  im Kanal I bewerkstelligt. Hierfür war ein besonderer Schalter am Meßplatz angeordnet (Bild 38). Mittels KO konnte die Signalform an mehreren wichtigen Stellen kontrolliert werden.

### 3. 5 5 Meß-, Kontroll- und Registriermöglichkeit

Während einer Messung wurden die Koinzidenzsignale am KO-Schirm laufend überprüft. Die einfachste Bestimmung der Differenzfrequenz  $f_E$  bzw.  $f_M$  ist, mittels Stoppuhr die Zeit zwischen zwei Durchgängen am KO-Schirm zu messen. Für genaue Messungen erwies sich diese Meßart als zu ungenau, auch wenn mehrere Koinzidenzen zusammen gemessen und

daraus ein Mittelwert gebildet wurde. Von Anfang an wurden daher alle Messungen mittels eines Schreibers graphisch registriert. Verwendet wurde hierfür ein Neumann-Schreiber, welcher zu diesem Zweck speziell hergerichtet war. Es wurde zusätzlich ein Zeitmarkengeber angebracht, der von einer Sekundenuhr über ein Relais gesteuert wurde. Die Geschwindigkeit des Wachspapierstreifens betrug 10 mm/s. Bei ca. 3 Minuten Meßzeit in jeder Höhe ergibt dies bei 6 Horizontalen pro Versuch ca. 11 m lange Versuchsstreifen. Alle 96 im Laboratorium durchgeführten Versuche wurden mittels dieses Schreibers registriert, auch wenn teilweise andere Meßarten gleichzeitig durchgeführt wurden.

Die Genauigkeit des hier entwickelten Verfahrens hängt in erster Linie davon ab, wie groß die Schwankungen der Differenzfrequenz  $f_E$  in der Stellung „Eichen“ sind. Dies kann verhältnismäßig einfach durch Messen der einzelnen Koinzidenzabstände festgestellt werden. Um ein absolut genaues Vergleichsmaß zu haben, wurde von der ETH-Quarzmutteruhr (Genauigkeit  $\pm 1/10^8$ ) eine Trägerfrequenz von 1000 Hz bis zum Meßplatz im Maschinenlaboratorium geleitet (siehe Schema Bild 24). Mittels einer Flipflopschaltung und einer Mischstufe konnte die modulierte Trägerfrequenz einem Dekaden-Zähler zugeführt werden. So konnten die Koinzidenzabstände durch Auszählen am DK-Zähler auf  $\pm 10^{-3}$  s genau gemessen werden. Die Koinzidenzzeiten lagen im Bereich von 0,1 bis 2 Hz, so daß es zeitlich möglich war, noch jeden Abstand einzeln zu messen. In Bild 37 sind die elektronischen Geräte, wie sie für die zweite Versuchsserie verwendet wurden, fotografiert. Ganz links ist der elektronische DK-Zähler sichtbar.

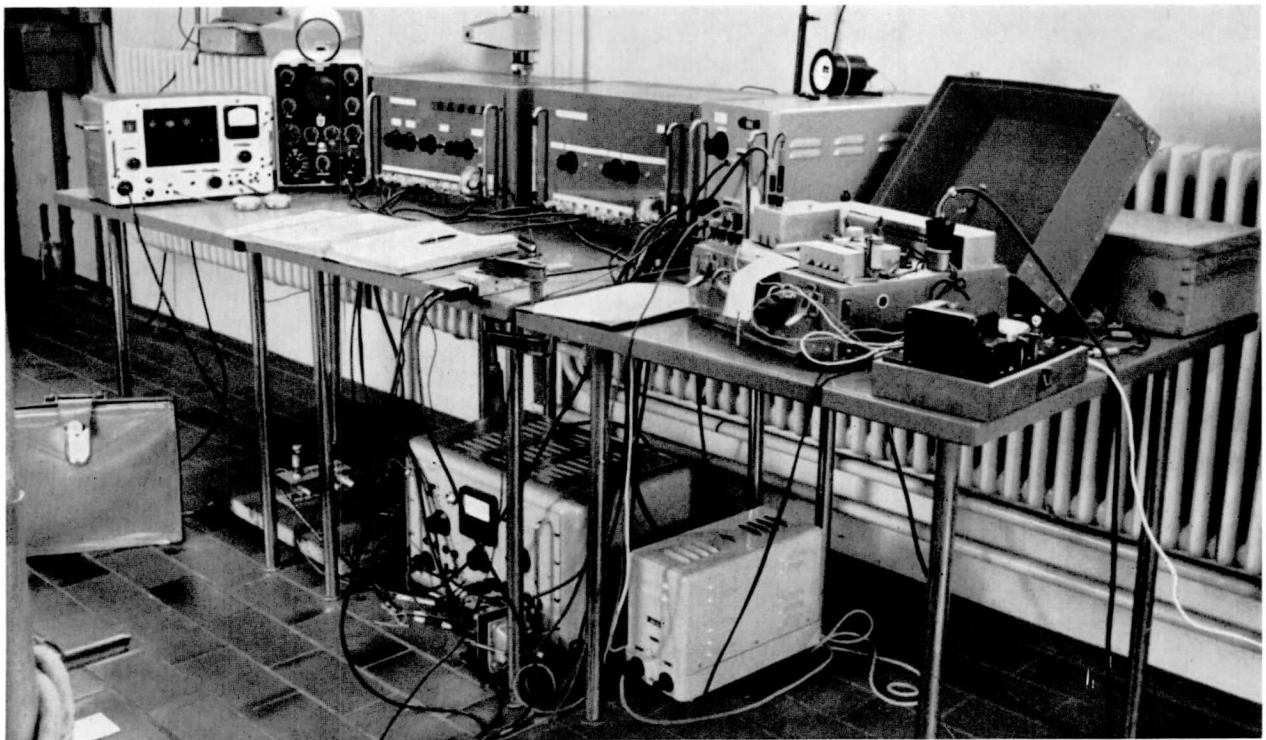


Bild 37. Ultraschallinstrumente, wie sie für die zweite Versuchsserie verwendet wurden. Ganz links der DK-Zähler für die Koinzidenz-Frequenz-Kontrollen, dann folgen: KO, Mixer, Zweikanalverstärker, Sender I und rechts der Schreiber zur graphischen Registrierung der Meßresultate. Netzgerät und Netzstabilisator sind auf dem Fußboden erkennbar.



Neben der graphischen Auswertung war eine direkte Ablesung des Meßresultates erwünscht. Diese Forderung konnte mittels eines elektronischen Philips-Kurzzeitmeßgerätes verwirklicht werden (Schaltung Bild 24). Dieser Kurzzeitmesser, der aus DK-Zähler, Quarzoszillator, Steuerstufe und Mischstufe besteht, wird bei einer Koinzidenz ausgelöst und kann nach einer beliebigen Anzahl ganzer Koinzidenzen durch eine geeignete Schaltung wieder gestoppt werden. Gleichzeitig registriert ein Zählwerk die Anzahl Koinzidenzen. Diese Anzahl, dividiert durch die totale Zeit, ergibt direkt die Differenzfrequenz  $f_E$  bzw.  $f_M$ . Bild 38 zeigt einen Ausschnitt der elektronischen Meßeinrichtung, wie sie für die Hauptversuche benützt wurde. Weiterhin konnten mit diesem Gerät die einzelnen zeitlichen Koinzidenzabstände bestimmt werden.

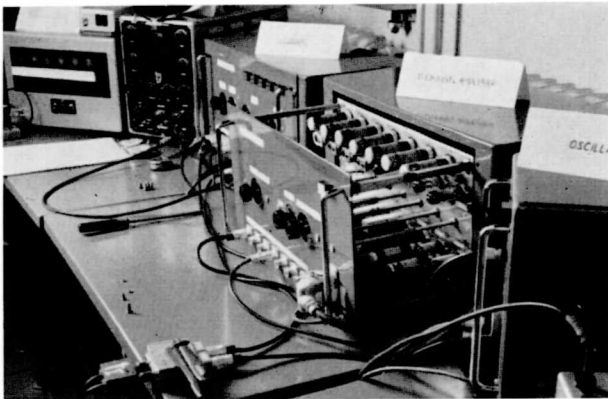


Bild 38. Ausschnitt der elektronischen Ultraschall-Meßgeräte. Im Vordergrund der geöffnete Zweikanal-Verstärker, dahinter Mixer, KO und Kurzzeitmeßgerät.

In Bild 39 sind das elektronische Meßgerät und das darauf gestellte Koinzidenz-Zählwerk neben einem KO während einer Messung zu sehen.

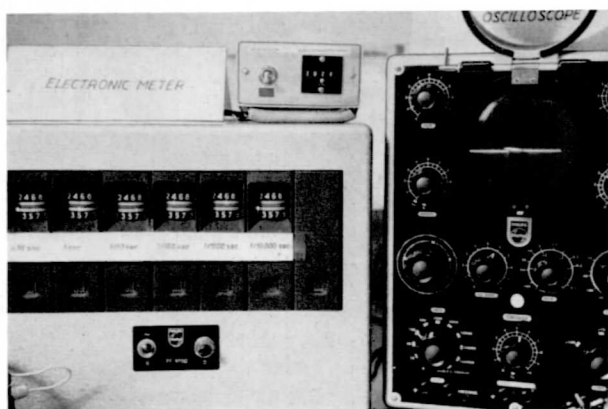


Bild 39. Elektronisches Kurzzeitmeßgerät mit eingebautem 10 kHz-Oszillator und Koinzidenzzählwerk zur direkten Differenzfrequenzbestimmung. Daneben Breitband-KO zur Überwachung der Messung. Auf dem KO-Schirm ist der Koinzidenzfrequenz-Ablauf (Differenzfrequenz) erkennbar.

## 3. 6 Durchführung der Versuche

### 3. 6 1 Allgemeines

Alle Versuche wurden wenn möglich dreimal durchgeführt. Die Abweichung innerhalb dieser 3 Versuchsergebnisse ergibt zwar keinen Anhaltspunkt für den möglichen systematischen Fehler, jedoch einen guten Vergleich über die Genauigkeit der zufälligen Fehlermöglichkeiten bei Wiederholung des Versuches unter gleichen Bedingungen.

Während bei der ersten Versuchsserie der Überfall als Vergleichsmessung diente, wurden die weiteren Messungen mit der Schirmmessung verglichen, weil dies die einzige Vergleichsmessart war, die bei allen Wassermengen durchgeführt werden konnte.

#### 3. 6 1 1 Schwankungen in der Strömung

Durch die Möglichkeit, die einzelnen zeitlichen Koinzidenzabstände zu messen, wurde folgendes festgestellt: Während die Differenzen in den Frequenzschwankungen bei ruhendem Wasser in Stellung „Eichen“ und „Messen“ immer gleich waren, änderte sich dies, sobald eine Strömung vorhanden war. Dann wurden die Schwankungen beim „Messen“, also  $f_M$ , bedeutend größer als beim „Eichen“  $f_E$ , wo sie praktisch so wie bei ruhendem Wasser blieben. Bsp.: bei  $Q = 250$  l/s,  $f_E = 1$  Hz,  $\Delta f_E = \pm 0,1$  %,  $f_M = 1,25$ ,  $\Delta f_M = \pm 1$  %. Diese Schwankungen dürften wohl auf eine unregelmäßige und pulsierende Strömung zurückzuführen sein. Ähnliche Versuchsergebnisse traten bei praktisch allen Messungen auf. Um eventuelle Schwankungen in den Wassermengen auszugleichen, wurde daher bei diesem 35 m langen Meßkanal für die Hauptversuche eine Meßzeit von 120 s gewählt.

#### 3. 6 1 2 Einfluß der Beschaffenheit der zu messenden Flüssigkeit

Für eine Anwendung der Ultraschall-Meßmethode ist es wichtig abzuklären, inwieweit die Meßgenauigkeit bei Wasserverschmutzung, Fremdkörpern oder lufthaltigem Wasser beeinflusst wird. Erst wenn diese Partikel bzw. Luftblasen eine bestimmte Größe überschreiten, die abhängig ist von der Geberfläche und Trägerfrequenz, wird der Durchgang eines Signals verhindert. Dadurch wird das nächste Signal der Impulsfolgefrequenz nicht ausgelöst. Erst durch einen neuen Start der Apparatur kann die Messung fortgesetzt werden. Somit ist eine Fehlmessung weitgehend verhindert. Wird das Signal durch die obengenannten Ursachen nicht ganz unterdrückt, sondern nur verzerrt, dann gleicht sich der dadurch bedingte Einfluß durch die Anordnung mit zwei Ultraschall-Meßkanälen wieder aus.

Bei den durchgeführten Laborversuchen wurde mit unterschiedlichen Wasserqualitäten, teilweise stark fetthaltig, gearbeitet. Durch Verwendung von frischem Wasser bei gleichen Versuchsbedingungen wurde kein Unterschied in der Meßgenauigkeit festgestellt. Dagegen traten bei den Anlageversuchen in Peccia — dies sei hier vorausgenommen — Schwierigkeiten bei größeren Luftblasengruppen beim obersten Meßpunkt in der im Unterwasser angeordneten rechteckigen Meßdüse auf.

Das Hauptziel der ersten Versuchsserie war es zu überprüfen, wieweit die experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Überlegungen übereinstimmen. Die Geber waren bei dieser ersten Versuchsserie (Bilder 32, 33 und 34) vollkommen frei und unverkleidet in der Randzone des Kanales angeordnet. Bei dieser Anordnung ist es nicht möglich, eine eindeutige Kanalbreite bei der Umrechnung der mittleren Geschwindigkeit in die sekundliche Wassermenge festzulegen. Näherungsweise wurde aus diesem Grund mit Formel (26) gerechnet. Danach ergibt sich mit dem Geberabstand  $l = 1,3446$  m und dem Meßwinkel  $\beta = 43,52^\circ$

$$(37) \quad \bar{v} = \frac{l}{2 \cos \beta} \cdot f_D = \frac{1,3446}{2 \cdot 0,7249} \cdot f_D = 0,9274 f_D$$

Aus den in den verschiedenen Höhen gemessenen  $\bar{v}$ -Werten wurde dann das für den gesamten Querschnitt mittlere  $\bar{v}$  bestimmt. Die Wassermenge  $Q$  in der Zeiteinheit wurde nach der Gleichung

$$Q = b \cdot h \cdot \bar{v}$$

berechnet, wobei für die Breite  $b = 1,0$  m angenommen wurde. Dieser Wert dürfte etwa 1 % zu groß sein, denn die von den Gebern verdrängte Fläche bleibt unberücksichtigt, auch wenn die Geber in der Randzone liegen. In Tabelle II sind die Resultate dieser ersten Versuchsserie zusammengefaßt.

Man sieht aus der Tabelle II, daß alle Werte systematisch im Durchschnitt ca. 0,6 % bis auf wenige Ausnahmen zu hoch liegen.

Diese Resultate dürfen angesichts der Tatsache, daß die besten Versuchsbedingungen noch nicht abgeklärt waren, als zufriedenstellend betrachtet werden.

Bevor auf die Hauptversuche eingegangen wird, welche die gewünschte Steigerung der Meßgenauigkeit ermöglichten, soll zum besseren Verständnis die Durchführung einer Messung beschrieben werden.

### 3. 6 3 Beschreibung einer vollständigen Messung

Die eigentliche Ultraschallmessung verlief bei den Hauptversuchen folgendermaßen:

Einstellen der Köpfe, wie auf Seite 26 beschrieben, auf die zu messende Horizontale, welche mit Farbbändern an den Stangen markiert waren. Während 30 Sek. wurde auf Stellung „Eichen“ gemessen, graphisch mittels Schreiber registriert und gleichzeitig mit Kurzzeitmessern gemessen. Dann erfolgte während 120 Sek. in Stellung „Messen“ die Aufnahme dieser Meßwerte. Am KO wurde der Koinzidenzablauf abgestoppt. Nachher wurde wieder 30 Sek. geeicht. Unterschritt die Abweichung der beiden Eichwerte ein gewisses Maß, wurde die Messung wiederholt, was aber in den seltensten Fällen notwendig war. Für einen Versuch, d. h. für die Messung in 6 bis 7 Horizontalen wurden maximal 30 Minuten benötigt.

Bild 40 zeigt einen Abschnitt eines Meßstreifens aus Versuch 89, aufgenommen mit Neumann-Schreiber, Höhe 600 mm; „rot“.

Versuch Nr.	$h_{Eb}$ mm	$h_{tot}$ mm	$Q_{Eb}$ l/s	$\bar{v}_{US}$ mm/s	$Q_{US}$ l/s	F %
14	259,4	1059,4	247,9	237,9	252,0	+ 1,6
15	259,4	1059,4	247,9	237,5	251,6	+ 1,5
16	259,4	1059,4	247,9	234,7	248,6	+ 0,3
17	273,4	1073,4	268,8	251,1	269,5	+ 0,2
18	273,4	1073,4	268,8	253,0	271,6	+ 1,0
19	273,4	1073,4	268,8	253,0	271,6	+ 1,0
20	225,6	1025,6	200,0	195,9	200,9	+ 0,4
21	225,6	1025,6	200,0	197,8	202,9	+ 1,4
22	225,6	1025,6	200,0	196,5	201,5	+ 0,6
23	203,2	1003,2	170,2	169,4	169,9	- 0,2
24	203,2	1003,2	170,2	169,6	170,1	- 0,1
25	203,2	1003,2	170,2	169,5	170,0	- 0,1
26	199,8	999,8	166,0	168,9	168,9	+ 1,7
27	199,8	999,8	166,0	170,8	170,8	+ 2,8
28	199,8	999,8	166,0	166,5	166,5	+ 0,3
29	301,5	1101,5	312,5	279,9	308,3	- 1,35
30	301,5	1101,5	312,5	283,8	312,6	0
31	301,5	1101,5	312,5	284,5	313,8	+ 0,4

Tabelle II. Ergebnisse der ersten Vorversuche. Geber frei und unverkleidet am Kanalrand angeordnet. Vergleichsmessung mit Überfall.

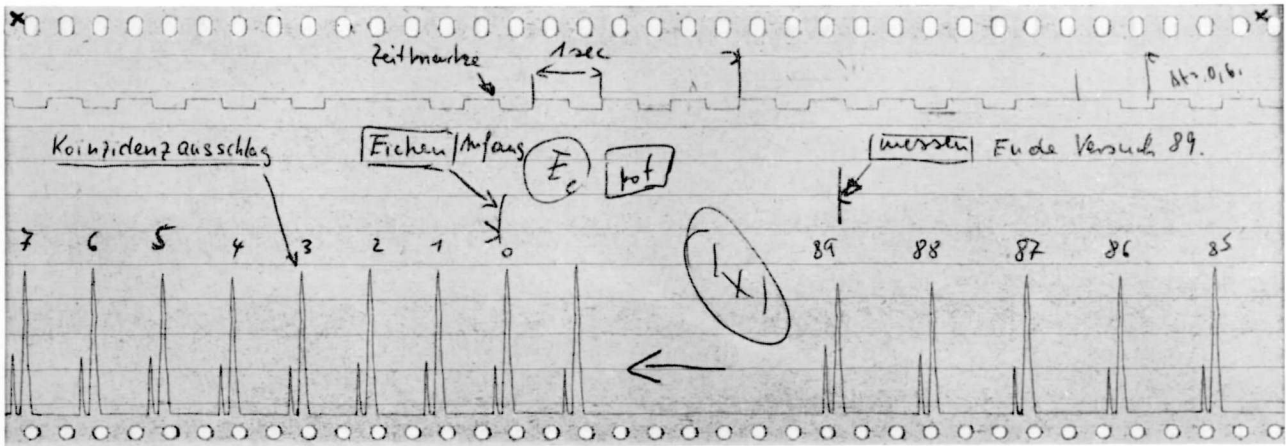


Bild 40. Abschnitt des Registrierstreifens von Versuch 89, Höhe 600 mm: „rot“. Der Abstand zwischen zwei Koinzidenzen bestimmt die Frequenz. Oben ist die Zeitmarke erkennbar. Links ist Eichen, rechts Messen.

Tabelle III zeigt Meß- und Auswertprotokoll des Versuches Nr. 89 der unter 3. 6 7 besprochenen Seitenströmung. Dort findet man auch das zugehörige senkrechte Geschwindigkeitsprofil.

Im ersten Teil der Tabelle III sind die gemessenen Größen – Koinzidenzen, Koinzidenzzahl und zeitliche Dauer der Koinzidenzen – eingetragen. Daraus läßt sich durch Division, Subtraktion und Multiplikation die mittlere Strömungsgeschwindigkeit auf die betreffende Höhe berechnen.

Da die Geber bei den Hauptversuchen hinter einer Verkleidung angeordnet waren, wurde mit Formel (29) gerechnet:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{l^2 \operatorname{tg} \beta}{2 b_k} \cdot (f_M - f_E) = \\ &= \frac{1,3446^2 \cdot \operatorname{tg} 43,535}{2 \cdot 0,875} f_D = 0,9803 f_D \end{aligned}$$

Die Kanalbreite betrug unter Abzug der Verkleidung  $b_k = 0,875$  m. Für die Berechnung des wirksamen Querschnittes wird noch die Wasserhöhe benötigt. Diese wurde mittels eines zwischen den Gebern angebrachten Stedpegels gemessen (siehe Bild 42). Mit den aus den Meßwerten berechneten  $v$ -Werten kann das senkrechte Geschwindigkeitsprofil (Bild 48) aufgezeichnet werden. Graphisch wird daraus die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt ermittelt. Dieses  $\bar{v}$  multipliziert mit der Fläche im Meßquerschnitt, also  $A = b_k \cdot h_{US}$ , ergibt die sekundlich fließende Wassermenge  $Q_{US}$ .

Der zeitliche Aufwand beträgt für die Auswertung ca. 2 Stunden pro Versuch bei Verwendung der Registrierstreifen des Neumann-Schreibers. Sofern mittels Kurzeitmesser und Koinzidenzzähler eine direkte Ablesung durchgeführt wird, schrumpft die Auswertzeit unter gleichen Bedingungen auf ca. 40 Minuten zusammen. Mit Unterstützung einer Hilfskraft ist es also bei einem Großversuch möglich, die definitiven Resultate kurz nach Beendigung einer Messung vorzulegen. Dies ist ein besonderer Vorteil der Methode, und bei Großversuchen in der Anlage Peccia konnte dies auch praktisch bewiesen werden.

### 3. 6 4 Fehlerrechnung

Da besonders die erreichbare Genauigkeit dieses neuen Verfahrens interessiert, erscheint hier eine Fehlerrechnung angebracht. Für diese Betrachtungen wird von der Formel (23) ausgegangen (siehe auch 2. 6 3).

$$\bar{v} = \frac{l^2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{2 \cdot b_k} \cdot f_D$$

Der maximale prozentuale Fehler kann folgendermaßen formuliert werden:

$$(38) \quad F_v = \pm \left[ 2 F_l + F_{\operatorname{tg} \beta} + F_{b_k} + F_{f_D} \right]$$

#### Fehlerabschätzung

Wird der Ausgleich nach Gauß zu Grunde gelegt, so ergibt sich folgender

mittlerer prozentualer Fehler  $\bar{F}_v$

$$(39) \quad \bar{F}_v = \pm \sqrt{2 F_l^2 + F_{\operatorname{tg} \beta}^2 + F_{b_k}^2 + F_{f_D}^2}$$

#### Geberabstand $l$ und Kanalbreite $b_k$

Von den Größen  $l$  und  $b_k$  – zwei Längen – darf angenommen werden, daß es möglich ist, sie auf 1<sup>0</sup>/<sub>100</sub> genau zu messen.

$$F_l = 0,1 \%$$

$$F_{b_k} = 0,1 \%$$

#### Meßwinkel

Der  $\operatorname{tg}$  des Meßwinkels sollte als eine geometrische Größe auch auf 1<sup>0</sup>/<sub>100</sub> meßbar sein.

$$F_{\operatorname{tg} \beta} = 0,1 \%$$

#### Differenzfrequenz $f_D$

Über die Genauigkeit, mit der diese Größe gemessen werden kann, ist es vielleicht verfrüht, hier schon etwas Definitives zu sagen. Bei dem neu entwickelten Verfahren hängt sie in erster Linie von der

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich			Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen				Maschinenlaboratorium Zürich, den 9. August 1957					
Versuch Nr. 89		Ultraschall-Wassermessung		Vergleichsversuche im Meßkanal				Beginn 16 <sup>31</sup> h; Ende 16 <sup>59</sup> h				
Geberabstand $l = 1344,6$ mm		Meßwinkel $\beta = 43,52^\circ$		Kanalbreite $b_k = 875,0$ mm Kanalhöhe $h_{US} = 1060,7$ mm				Art des Versuches: Seitliche Strömung, erzeugt durch vor Meßstelle angeordnetes Drahtgitter. Mittels Kleinflügel Strömungsprofil geprüft. Versuche 90 und 91 unter gleichen Bedingungen durchgeführt.				
Geberhöhe $h_k$	Versuchs- zeit		$E_1$	M	$E_2$	$\frac{E_1+E_2}{2}$	$f_E$	$f_M$	$f_D$	$\bar{v}_{US}$	Bemerkungen	
Farbe	mm vom Boden						Hz	Hz	Hz	mm/s		
weiß	1000	A 16 <sup>31</sup>	Koinzid	34	67	34	34	0,8238	0,5431	0,2807	275,2	Da Koinzidenz bei E und M bei allen Horizontalen negativ läuft, ist $f_D = f_E - f_M$ . Messung graphisch mit Neumann-Schreiber registriert und daraus ausgewertet. Mit Kurzzeitmesser Einzelkoinzidenzen während Versuch laufend überprüft.
		E 16 <sup>36</sup>	Zeit (s)	41,33	123,36	41,22	41,27					
grün	800	A 16 <sup>37</sup>	Koinzid	32	81	32	32	0,9566	0,6743	0,2823	276,7	
		E 16 <sup>40</sup>	Zeit (s)	33,41	120,11	33,50	33,45					
rot	600	A 16 <sup>42</sup>	Koinzid	30	89	30	30	1,010	0,7310	0,2790	273,5	
		E 16 <sup>45</sup>	Zeit (s)	29,70	121,75	29,70	29,70					
blau	400	A 16 <sup>45</sup>	Koinzid	27	77	27	27	0,9211	0,6329	0,2882	282,6	
		E 16 <sup>49</sup>	Zeit (s)	29,31	121,65	29,32	29,31					
gelb	150	A 16 <sup>51</sup>	Koinzid	22	63	22	22	0,7676	0,5123	0,2553	250,3	
		E 16 <sup>54</sup>	Zeit (s)	28,66	122,96	28,66	28,66					
schwarz	50	A 16 <sup>55</sup>	Koinzid	24	42	24	24	0,6092	0,3602	0,2490	244,1	
		E 16 <sup>59</sup>	Zeit (s)	39,38	116,57	39,40	39,39					
Summe = 1603,4 planimetrisch:												
$\bar{v}_{arith} = 267,2$										$\bar{v}_{US} = 269,0$ mm/s		
E = Eichen	$\bar{v}_{US} = \frac{l^2 \cdot \tan \beta}{2 \cdot b_k} f_D = 0,9803 f_D$ (m/s)						Behälter: 16 <sup>24</sup> h	Schirm: 16 <sup>20</sup> h	Überfall:			
M = Messen	$Q_{US} = h_{US} \cdot b_k \cdot \bar{v}_{US}$ (l/s)						$Q_1 = 248,77$ l/s	$3 \cdot 10$ m t = 127,75 s	16 <sup>31</sup> bis 16 <sup>54</sup> h			
$f_E$ = Koinz./Zeit	$F_{US} = - 0,24$ %						$Q_2 = 248,83$ l/s	$v_{Sch} = 234,85$ m/s	$h_{\psi b} = 261,1$ mm			
$f_M$ = Koinz./Zeit	$F_{korr} = - 0,05$ %							$h_{Sch} = 800 + 265,4$ mm	Aus Kurvenblatt nach Überfallformel von du Buat			
$f_D = f_M - f_E$							$Q_{Beh} = 248,8$ l/s	$Q_{Sch} = h_s \cdot b \cdot v_{Sch}$				
$F_{US} =$ Abweichung von $Q_{Sch}$							$Q_{Sch} = 250,2$ l/s		$Q_{\psi b} = 250$ l/s			

Tabelle III. Meß- und Auswertprotokoll, wie es für die Hauptversuche verwendet wurde. Beispiel zeigt Versuch Nr. 89. Gemessen werden die Größen  $E_1$ , M und  $E_2$ . (Siehe auch Tabelle IV).

elektronischen Stabilität der Meßapparatur ab. Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, wurde die Streuung der Meßwerte systematisch untersucht. Aus diesen Ergebnissen darf als Richtwert 0,3 % angenommen werden, während tatsächlich bei den Versuchen im allgemeinen bessere Werte erzielt werden konnten.

$$F_{f_D} = 0,3 \%$$

Mit diesen Werten ergibt sich ein maximaler prozentualer Fehler nach Gleichung (38)

$$F_v = \pm [2 \cdot 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,3] = \pm 0,7 \%$$

und ein mittlerer prozentualer Fehler mit Gleichung (39) wird

$$\bar{F}_v^2 = \pm [2 \cdot 0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,3^2]$$

$$\bar{F}_v = \pm 0,36 \%$$

### 3. 6 5 Hauptversuche mit abgedeckten Gebern

#### 3. 6 5 1 Einfluß der Abdeckung

Zur Feststellung des Unterschiedes einer Messung mit und ohne komplette Abdeckung der Geber wurden alle Öffnungen bis auf die in der mittleren Höhe abgedeckt (Versuche Nr. 71—74), und zwar

so daß während der Messung, ohne den Wasserfluß zu verändern, die gesamte Abdeckung mit einer Art Reißleine entfernt werden konnte. Somit war gewährleistet, daß die Versuchsbedingungen, also in erster Linie die sekundlichen Wassermengen gleich blieben. Ein eindeutiger Unterschied der so erhaltenen  $v$ -Werte konnte nicht festgestellt werden, obwohl  $\bar{v} = 0,96$  m/s, also relativ groß war. Allerdings blieben während des gesamten Versuches die schon erwähnten „Hütchen“ auf den Gebern.

### 3. 6 5 2 Versuchsdurchführung

Die Hauptversuche wurden nach den Erfahrungen der in Tabelle II zusammengefaßten Messungen durchgeführt. Die wichtigsten Verbesserungen sind: auf der elektronischen Seite eine bessere Stabilisierung, meßtechnisch eine Verfeinerung der Versuchsdurchführung, und in Bezug auf die Ultraschall-Einrichtung die Anordnung der Köpfe vollkommen außerhalb der Strömung. Wie schon erwähnt, wurden alle Resultate mit der jeweiligen Schirmmessung verglichen, die allerdings im Gebiet großer Wassergeschwindigkeiten wegen der möglichen kurzen Meßzeiten schwierig durchzuführen war.

### 3. 6 5 3 Versuchsergebnisse

In Tabelle IV sind die Resultate der Hauptversuche, bei denen teilweise gleichzeitig Behälter-, Schirm-, Flügel- und Ultraschallmessungen durchgeführt wurden, zusammengestellt. Die Resultate der Ultraschallmessung wurden mit der Schirmmessung verglichen.

Diese prozentualen Abweichungen wurden in Funktion der Schirmgeschwindigkeit in Bild 41 graphisch aufgezeichnet.

In Bild 41 ist die Eichkurve zur Korrektur der mittels Schirm gemessenen Wassermenge eingetragen.

Zur Frage dieser Schirmkorrektur hat Prof. R. Dubs in seinem Buch (49) bemerkenswerte Hinweise gegeben.

Diese Abweichung der Schirmmessung kann folgendermaßen erklärt werden: Im Gebiet kleiner Wassergeschwindigkeiten besteht wegen der größeren Reibungsarbeit des Schirmes die Tendenz, daß zu kleine Wassermengen gemessen werden. Mit zunehmender Wassergeschwindigkeit beginnt der Schlupf

Versuch Nr.	Überfall		Be- hälter	Schirm		Ultraschall			Ultraschall-Abweichung von			Bemerkungen
	$h_{Ub}$	$Q_{Ub}$	$Q_{Beh}$	$v_{Sch}$	$Q_{Sch}$	$h_{US}$	$\bar{v}_{US}$	$Q_{US}$	$Q_{Sch}$	$Q^x_{Sch}$	unter- einander	
	mm	l/s	l/s	mm/s	l/s	mm	mm/s	l/s	%	%	%	
71				826,8	826,1	978,5	956,3	818,8	-0,87	-0,10	0,44	} Öffnungen abgedeckt Abdeckung entfernt
72				830,5	829,0	978,5	962,2	823,8	-0,63	+0,15		
73				831,4	830,0	978,5	960,7	822,6	-0,89	-0,11		
74				832,5	831,0	978,5	960,3	822,1	-1,07	-0,22		
75				826,5	837,2	985,0	975,6	840,9	+0,44	+1,1	0,27	} Turbulente Strömung durch Bodenwelle
76				826,5	837,2	985,0	973,2	838,8	+0,19	+0,97		
77				624,2	642,1	1021,0	714,7	638,5	-0,55	+0,06	0,26	} Überfall erhöht, da kleine Wassermenge
78				624,2	642,1	1021,0	715,7	639,4	-0,42	+0,19		
79				624,2	642,1	1021,0	713,8	637,7	-0,68	-0,07		
80	261,3	251,0	252,0	238,3	252,3	1060,9	270,4	251,0	-0,51	-0,31	0,28	} $Q_{Fl} = 253,6$ l/s (Flügelmessung)
81	261,3	251,0	252,0	238,3	252,3	1060,9	269,6	250,3	-0,79	-0,59		
82	261,3	251,0	252,0	238,3	252,3	1060,9	269,9	250,5	-0,71	-0,51		
83	385,6	459,5		390,5	462,4	1184,8	444,4	461,0	-0,30	+0,08	0,22	} Größte mit Überfall meßbare Wassermenge
84	385,6	459,5		390,5	462,4	1184,8	445,2	461,9	-0,17	+0,27		
85	385,6	459,5		389,9	461,8	1184,8	443,7	460,3	-0,33	+0,05		
86	90,2	50,3	50,2	56,8	50,4	890,5	65,9	51,4	+2,00	+1,6	1,22	} Kleinste gemessene Wassermenge
87	90,2	50,3	50,2	56,8	50,4	890,5	65,6	51,1	+1,38	+0,98		
88	90,2	50,3	50,2	56,8	50,4	890,5	66,4	51,7	+2,60	+2,2		
89	261,1	250,0	248,8	234,8	250,2	1060,7	269,0	249,6	-0,24	-0,05	0,00	} Starke seitliche Strömung
90	261,1	250,0	248,8	234,8	250,2	1060,7	269,0	249,6	-0,24	-0,05		
91	261,1	250,0	248,8	234,8	250,2	1060,7	269,0	249,6	-0,24	-0,05		
92	261,5	251,0	248,6	234,6	250,3	1061,0	268,5	249,3	-0,4	-0,2	0,15	} Ausgeprägte Boden- strömung
93	261,5	251,0	248,6	234,6	250,3	1061,0	269,0	249,7	-0,24	-0,05		
94	261,5	251,0	248,6	234,6	250,3	1061,0	268,5	249,3	-0,4	-0,2		

$F_{US} = \frac{Q_{US} - Q_{Sch}}{Q_{Sch}} \cdot 100$  [%], während  $F_{Korr} = \frac{Q_{US} - Q^x_{Sch}}{Q^x_{Sch}} \cdot 100$  [%] ist. Der Vergleich von  $Q_{US}$  und  $Q^x_{Sch}$  (korrigiertes Ergebnis der Schirmmessung) wurde Bild 41 entnommen.  $\Delta F_{US}$  ist die max. Abweichung der  $Q_{US}$ -Resultate einer Versuchsgruppe in %.

Tabelle IV. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der Hauptmessungen.

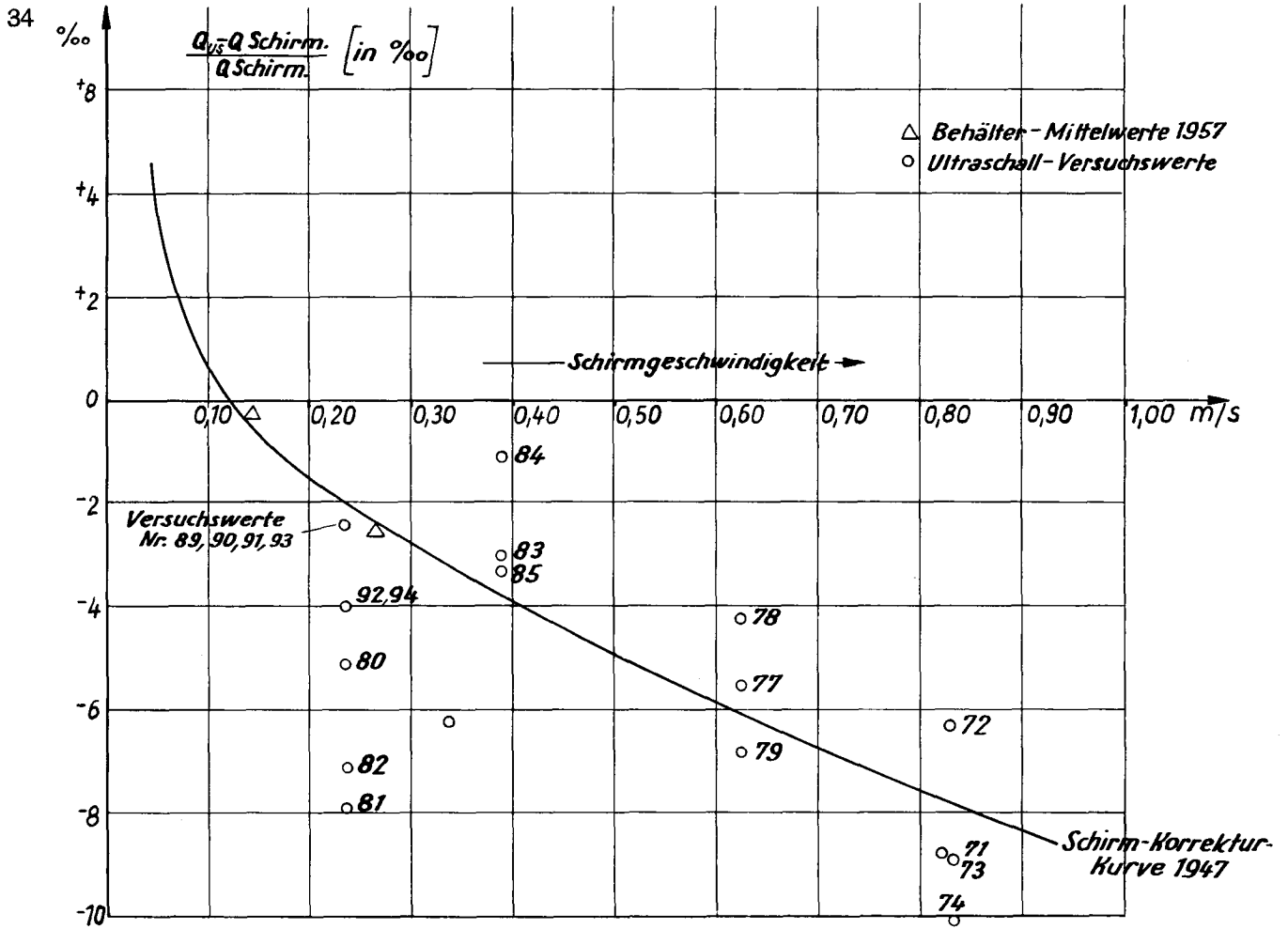


Bild 41. Abweichungen in %o der mit Ultraschall gemessenen sekundlichen Wassermenge  $Q_{US}$  im Vergleich mit der aus der Schirmmessung bestimmten  $Q_{Sch}$ . Die Kurve stellt die Abweichung  $Q_{Sch} - Q_{wirklich}$  in %o dar.

des Schirmes zu überwiegen, so daß zu große Wassermengen gemessen werden. Diese Tatsache ist aus der Eichkurve in Bild 41 zu ersehen.

In dieses Diagramm sind nun die Ergebnisse der Ultraschallmessung in %o zum Vergleich eingetragen.

Abgesehen von den beiden Versuchen 81 und 82 liegen eigentlich alle Versuche innerhalb  $\pm 3\%$  an der Schirmkurve. Bei den Versuchen 81, 82 und 83 wurde eine vertikale, horizontal verschiebbare Flügelstange vor der Ultraschalleinrichtung benützt. Vielleicht erklärt sich daraus die etwas größere Abweichung. Auch die Versuche 86 bis 88, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  nur 66 mm/s betrug, liegen außerhalb der Kurve. Bei diesen ganz kleinen Geschwindigkeiten wird aber aus oben erwähnten Gründen die Schirmmessung bereits problematisch.

### 3. 6 5 4 Meßbereich

Es sei noch festgehalten, daß mit der unveränderten Ultraschalleinrichtung in einem Geschwindigkeitsbereich von  $v = 66$  bis 970 mm/s, also in einem

Verhältnis von 1 : 15 gemessen wurde. Bild 42 zeigt die Ultraschall-Einrichtung während der Hauptversuche.

### 3. 6 6 Versuche mit ausgeprägter Bodenwelle

Um das Verhalten der Meßeinrichtung bei stark turbulenter Strömung zu untersuchen, wurde eine Bodenwelle direkt vor die Ultraschall-Verkleidung (Versuch 75 und 76 in Tabelle IV) angeordnet. Bild 43 zeigt eine Seitenansicht und eine Draufsicht der Versuchsanordnung. Die Querschnittsverengung erreichte ca. 40 %, wobei der Abstand vom engsten Querschnitt bis zu den vorderen Gebern 1,6 m betrug.

Eine eindeutige Meßhöhe konnte bei der starken Wellenbildung (vgl. Bild 44) nicht festgelegt werden.

Das gemessene  $Q_{US}$  fiel bei diesen beiden Versuchen 0,7 % größer aus als die gemessene Schirmmessung und ca. 1,4 % größer als die korrigierte Schirmmessung. Dagegen betrug die Abweichung der beiden Versuche voneinander nur 0,14 %, was vermuten läßt, daß die Differenz mit der Schirmmessung auf ein zu groß gewähltes  $h_{US}$  zurückzuführen ist.

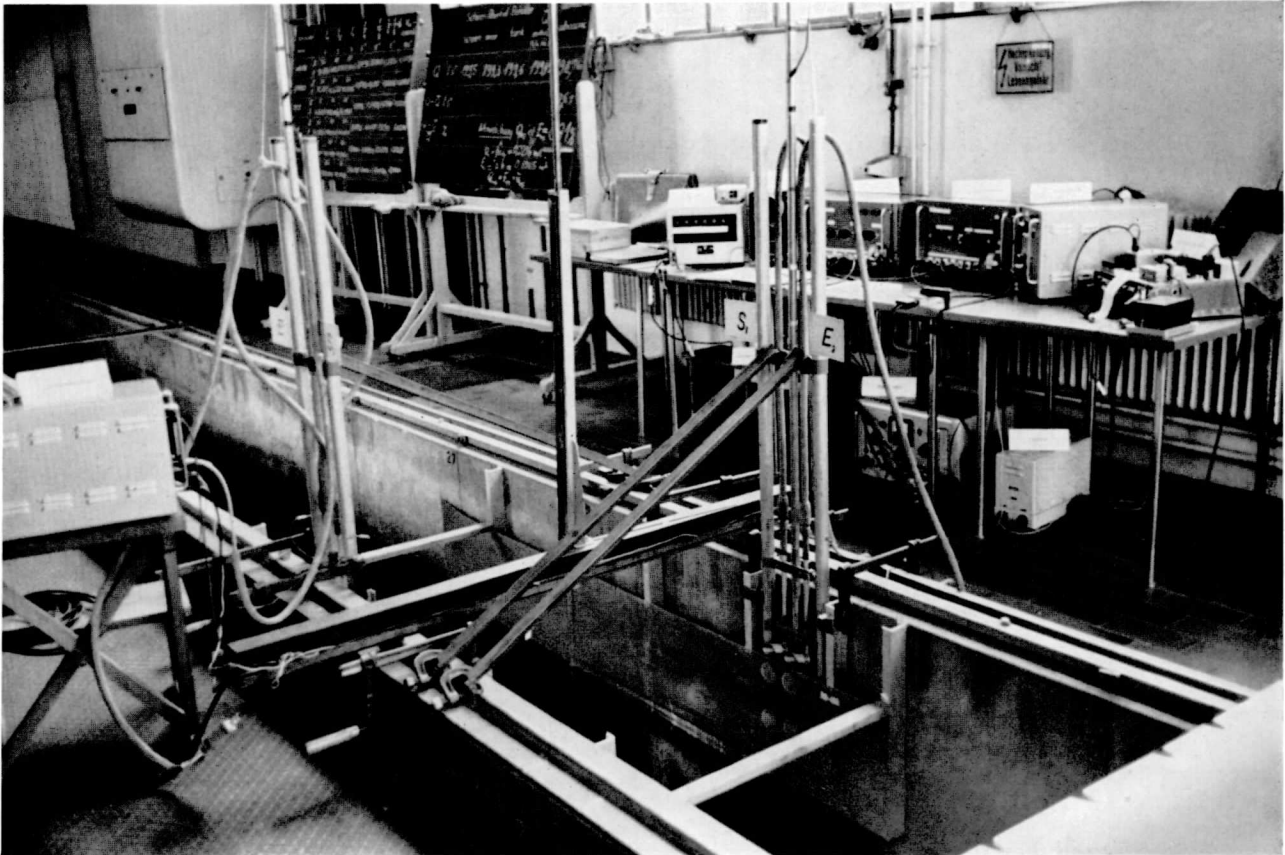


Bild 42. Blick auf die Ultraschall-Einrichtung der Hauptversuche. Geber hinter Verkleidung außerhalb der Strömung angeordnet. In der Mitte ist der Stechpegel zu sehen.

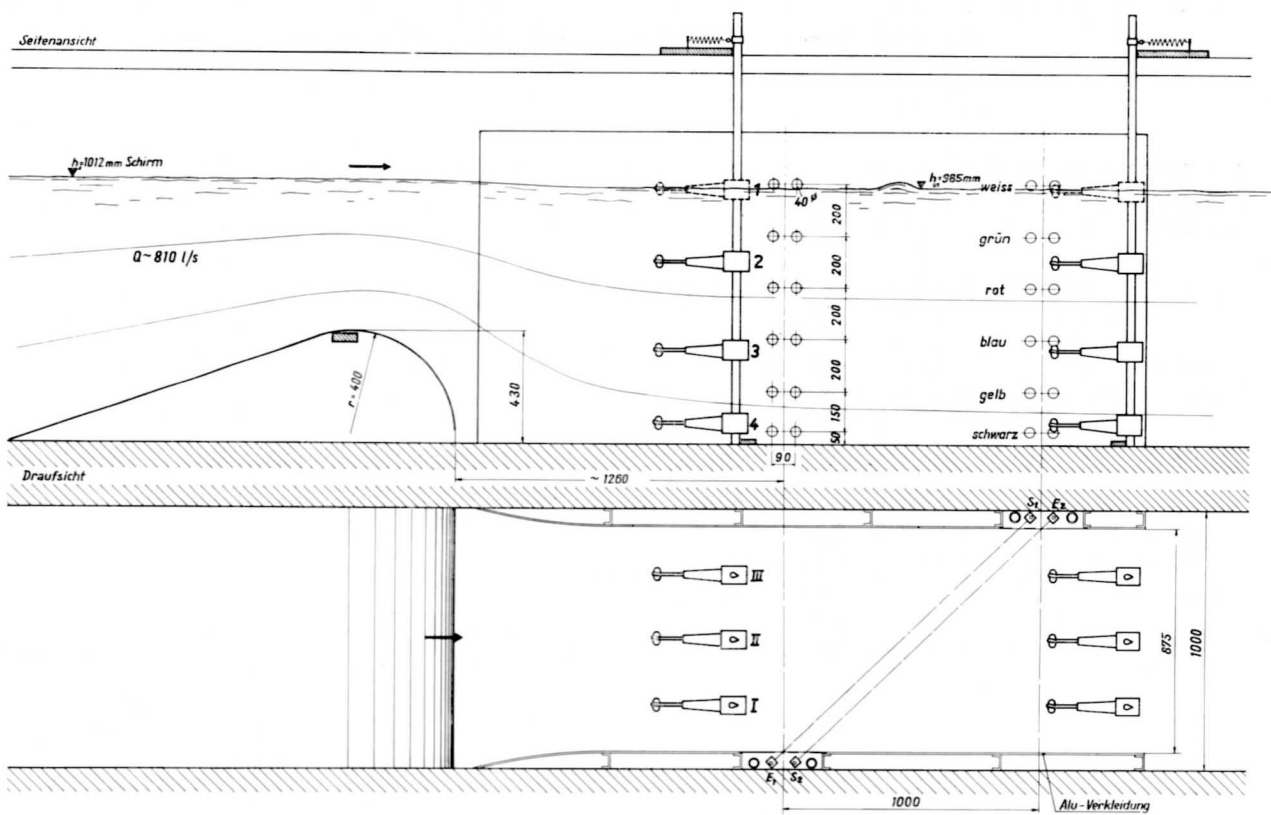


Bild 43

Bild 43. Versuchsanordnung, um das Verhalten der Ultraschall-Einrichtung mit ausgeprägter Bodenwelle zu untersuchen. Versuch 75 und 76; siehe auch Bild 44 umseitig.



Bild 44. Fotografie der Strömung bei der Durchführung von Versuch 75 und 76. Die turbulente Strömung, insbesondere an der Wasseroberfläche, ist gut erkennbar. Der Stedhpegel konnte daher nicht benützt werden.

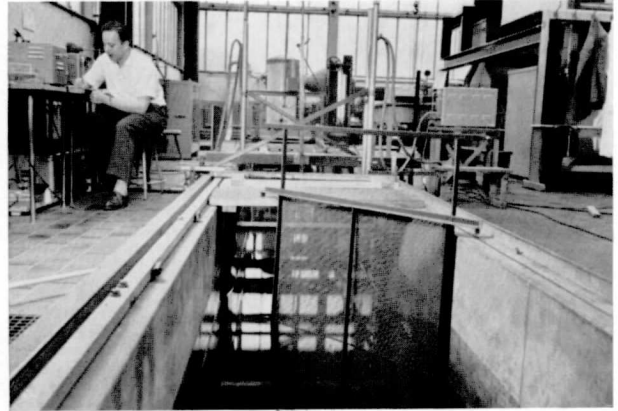


Bild 45. Fotografie der Meßeinrichtung bei starker Seitenströmung (Versuche 89—91). Im Vordergrund das Drahtgitter zur Erzeugung des gewünschten Strömungsprofils. Siehe auch Bilder 46, 47 u. 48.

### 5. 6 7 Versuche bei Seitenströmung

Bei der Ultraschallmessung wird nur die Komponente der Strömungsgeschwindigkeit in Meßrichtung gemessen. Dagegen können senkrecht zu dieser Meßrichtung auftretende Geschwindigkeiten nicht erfasst werden. Aus diesem Grunde wurde es als wichtig erachtet, einmal das Verhalten bei starker Seitenströmung auf der für diese Anordnung ungünstigsten Seite experimentell zu untersuchen. Um solche Strömungsverhältnisse herzustellen, wurde ein Drahtgitter in den Kanal gehängt. Bild 45 zeigt die praktische Anordnung des Gitters vor der Meßeinrichtung.

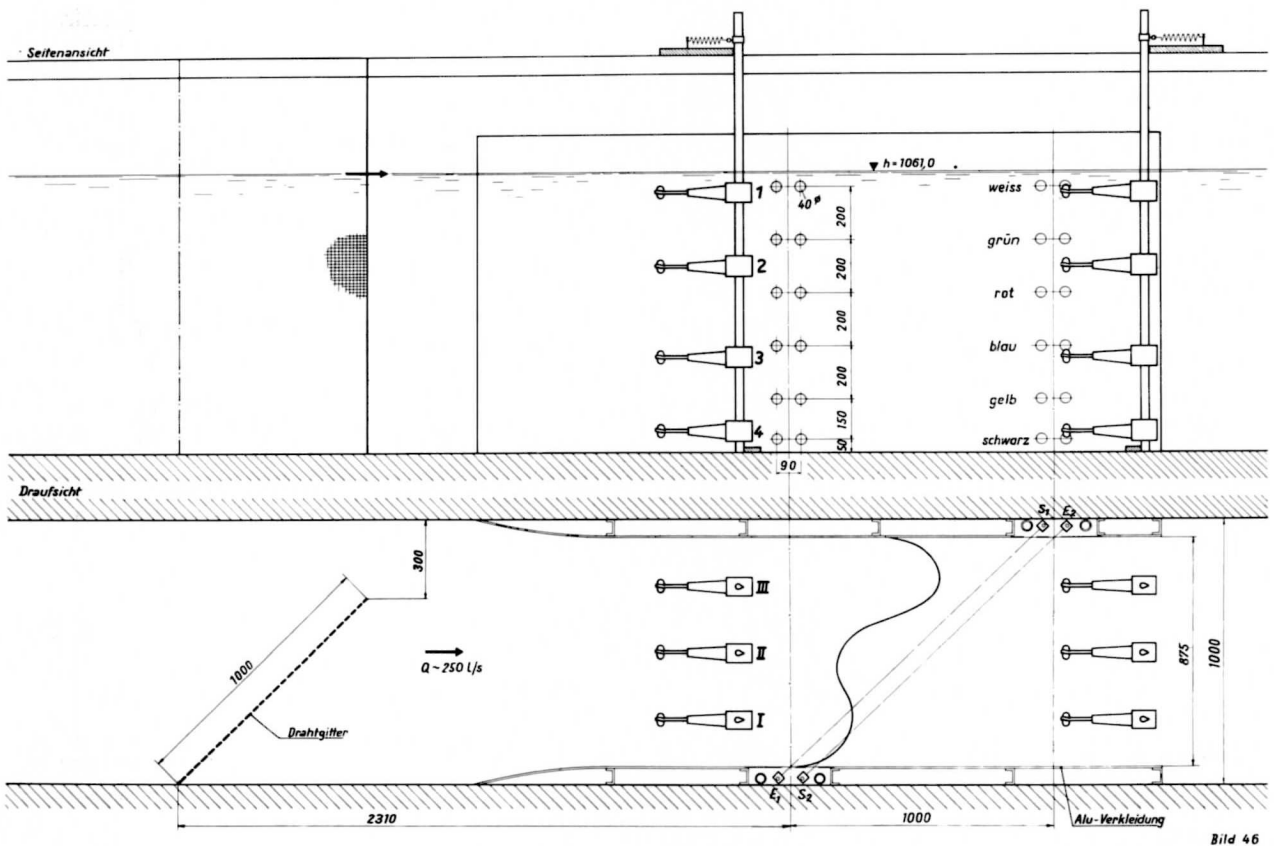


Bild 46

Bild 46. Anordnung der Einbauten zur Messung stark seitlicher Strömungen. Vorn ist das Drahtgitter zur Erzeugung der seitlichen Strömung erkennbar. Vor und nach der Ultraschallmeßeinrichtung wurden die Kleinflügel hineingehängt, wie auf dem Bild angedeutet. Versuche 89—91.



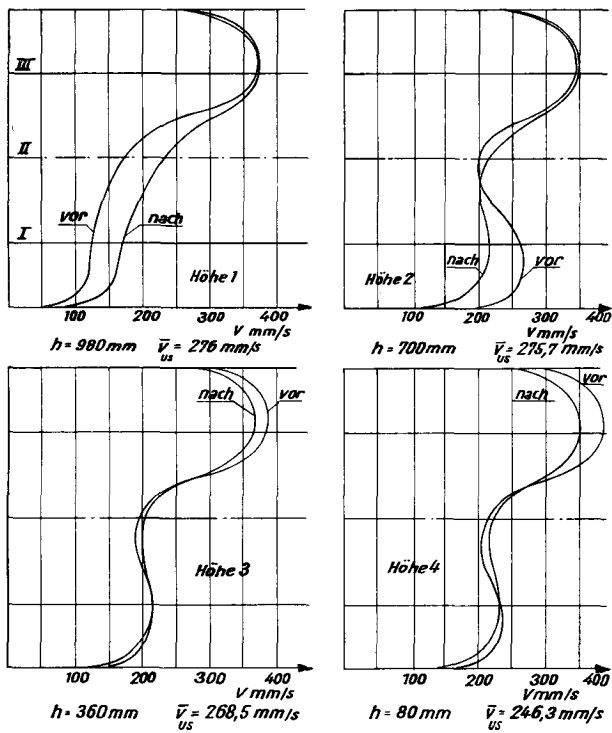


Bild 47. Horizontale Strömungsprofile, mittels Kleinflügel vor und nach der Ultraschall-Meßstelle gemessen. Anordnung zur Untersuchung einer starken Seitenströmung mittels Ultraschalls (Versuche 89—91).

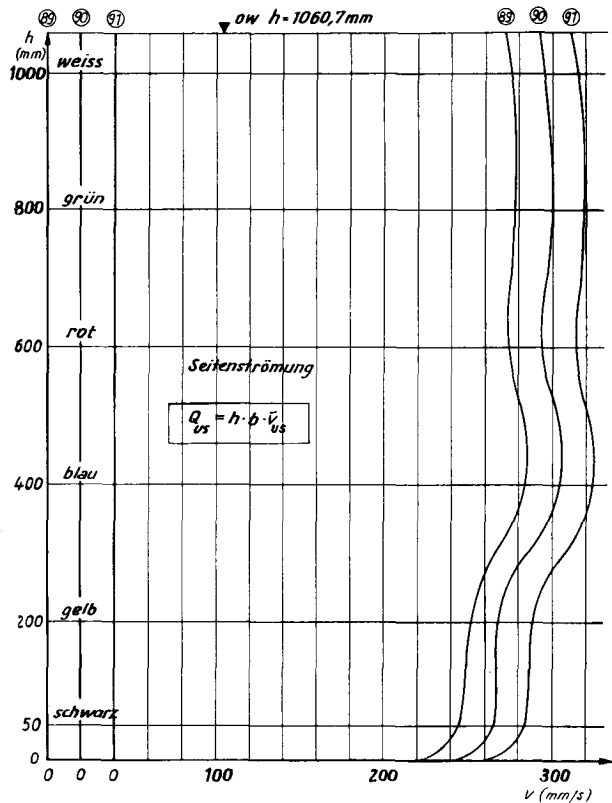


Bild 48. Senkrechtes Geschwindigkeitsprofil, gemessen mit Ultraschall bei den Versuchen 89—91. Es herrschte bei diesen Versuchen starke seitliche Strömung, wie aus Bild 47 ersichtlich.

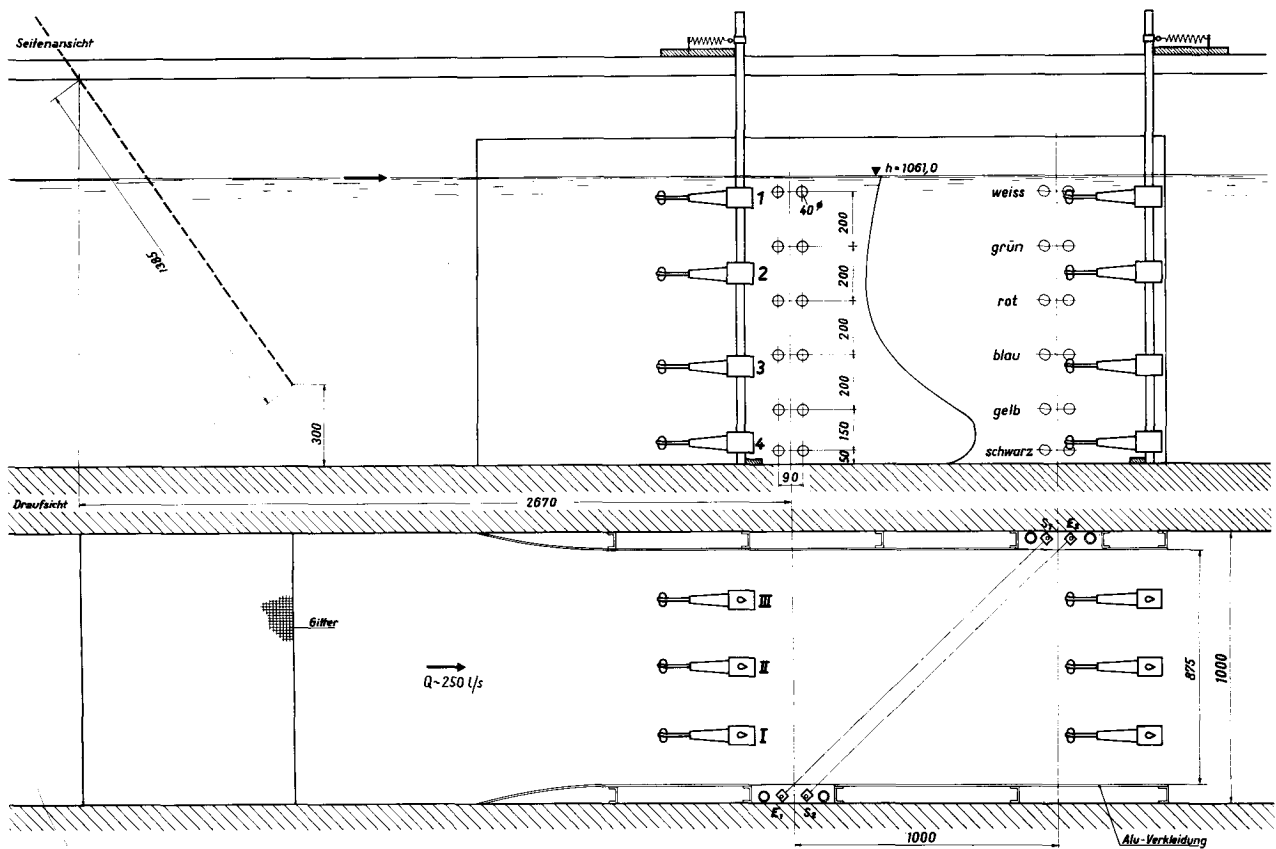


Bild 49

Bild 49. Anordnung zur Erprobung der Ultraschall-Meßeinrichtung bei ausgeprägter Bodenströmung, erzeugt mit Drahtgitter. Die geeignetste Lage des Gitters wurde mittels der angedeuteten Kleinflügel eingestellt (Versuche 92—94).

38 Die geeignetste Stellung dieses Gitters wurde mit Hilfe von 4 Kleinflügeln bestimmt, die auf einer versetzbaren senkrechten Stange befestigt waren. Die Umdrehungen dieser Kleinflügel wurden direkt mit Zählwerken gemessen. Aus Bild 46 ist die Anordnung der Flügel erkennbar. In Bild 47 sind die 4 gemessenen horizontalen Strömungsprofile dargestellt, und zwar decken sich die vor und nach der Ultraschallmessung gemessenen Strömungsverteilungen recht gut.

Die senkrechte Geschwindigkeitsverteilung ist aus Bild 48 ersichtlich. Eine Differenz der 3 gemessenen mittleren Geschwindigkeiten war praktisch nicht mehr feststellbar. Der Unterschied der gemessenen Wassermenge im Vergleich zur Schirmmessung betrug 0,24 %. In Tabelle IV sind die Ergebnisse angeführt. Ebenfalls sind die Versuche in Bild 41 eingetragen, siehe auch unter 3. 6 4 das als Muster angeführte Meß- und Auswert-Protokoll (Tabelle III) des Versuches 89 auf Seite 32.

### 3. 6 8 Versuche mit Bodenströmung

Ähnlich wie bei Seitenströmung interessiert das Verhalten der Ultraschall-Meßeinrichtung bei starker Bodenströmung und Oberflächenströmung. Da das Problem in beiden Fällen bei dieser Anordnung ähnlich ist, wird auf die Behandlung der Oberflächenströmung verzichtet, und es werden nur die Messungen mit stark ausgeprägter Bodenströmung besprochen.

Auch hier wurden die gewünschten Strömungsverhältnisse mit entsprechend angeordneten Drahtgittern hergestellt. Die beste Lage wurde wiederum mit Kleinflügeln ermittelt. Bild 49 zeigt die gewählte Anordnung.

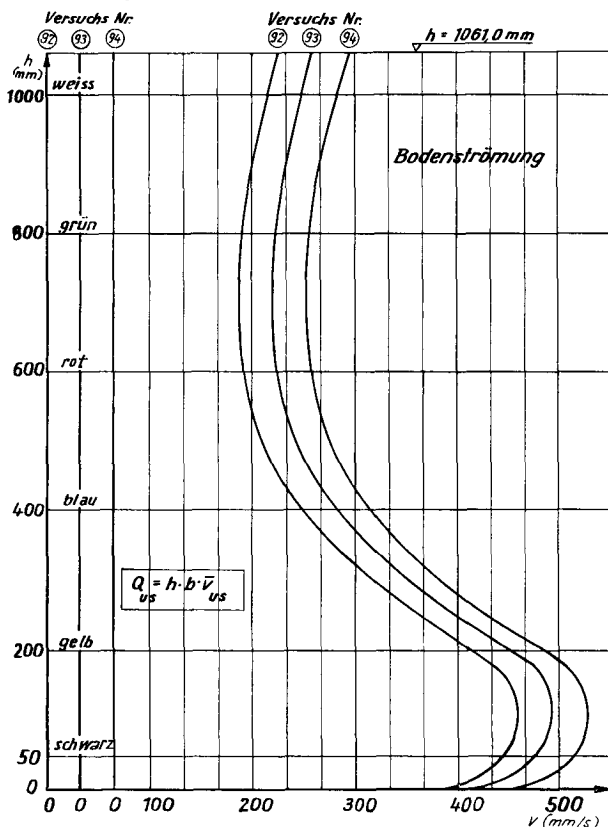


Bild 50. Senkrecht Geschwindigkeitsprofil bei ausgeprägter Bodenströmung. Max. Geschwindigkeit am untersten Meßpunkt (Versuche 92—94).

In Bild 50 ist das gemessene senkrechte Geschwindigkeitsprofil aufgezeichnet.

Es lag eine extrem starke Bodenströmung vor. Die mittlere Geschwindigkeit am untersten Meßpunkt, 50 mm über Boden, war 2,5-mal so groß wie die kleinste oberhalb des mittleren Punktes vorhandene. Die Versuchsergebnisse sind aus Tabelle IV und Bild 41 ersichtlich. Die Ultraschall-Wassermenge fiel 0,4 bzw. 0,24 % kleiner aus als die mit Schirm gemessene Wassermenge und 0,2 bzw. 0,04 % kleiner als die aus der korrigierten Schirmmessung ermittelte Wassermenge. Die maximale Abweichung dieser Versuche (92—94) voneinander betrug 0,16 %.

### 3. 6 9 Zusammenfassende Betrachtung der Versuchsergebnisse

Für eine neu entwickelte Meßmethode waren die ersten Versuchsergebnisse (Versuche 14—31, Tabelle II) zufriedenstellend.

Es gelang, durch Verbesserung auf den elektronischen, meßtechnischen und Ultraschallgebieten die Meßgenauigkeit zu steigern.

In Bild 41 und Tabelle IV sind die Hauptversuche 68—95 zusammengefaßt. Besonders wird auf die geringen Abweichungen zwischen den 3 Versuchen jeder Meßgruppe hingewiesen. Aus den gezeigten senkrechten Geschwindigkeitsprofilen (Bilder 48 und 50) und Tabelle IV ist ersichtlich, daß die mittlere Geschwindigkeit bei 3 gleichen Versuchen auf derselben Höhe immer sehr gut übereinstimmte.

Leider mußte, um die Arbeit in einem gewissen Rahmen zu halten, auf die Wiedergabe von anderen Geschwindigkeitsprofilen verzichtet werden.

Bis auf die Versuche mit ganz kleinen Geschwindigkeiten (Nr. 86—88) und die mit ausgeprägter Bodenwelle lagen alle mit Ultraschall gemessenen sekundlichen Wassermengen — bis auf die zwei unter 2. 6 5 besprochenen Versuche —  $\pm 0,4$  % an den mit der korrigierten Schirmmessung erhaltenen Wassermengen und lagen damit bereits nahezu im Toleranzgebiet der Schirmmessung.

Sogar die bei starker seitlicher Strömung durchgeführten Versuche (Nr. 89—91) blieben trotz der ungünstigen Strömungsverteilung innerhalb dieser Grenzen.

Die Versuchsergebnisse bei forcierter Bodenströmung überschritten die oben erwähnte Grenze ebenfalls nicht.

Es darf hervorgehoben werden, daß kein einziger Versuchspunkt außerhalb der engen Grenzen lag, wiederholt werden mußte oder unberücksichtigt blieb.

Zu der Versuchseinrichtung selbst ist zu sagen, daß sich der Einbau hinter der wasserundurchlässigen, aber ultraschalldurchlässigen seitlichen Wand gut bewährte.

Die elektronische Meßapparatur erfüllte die an sie gestellten Erwartungen. Anfangsschwierigkeiten konnten bis zu den Hauptversuchen überwunden werden. Insbesondere darf auf die Schnelligkeit der Versuchsdurchführung und Auswertung hingewiesen werden.

#### 4. Meßversuche in der Wasserkraftanlage Peccia

Auf Vorschlag von Herrn Prof. H. Gerber konnte im Zusammenhang mit den in der Wasserkraftanlage Peccia (Maggiatal, Schweiz) durchgeführten Abnahmeversuchen die hier entwickelte Ultraschall-Strömungsmesseinrichtung erstmals bei einem Großversuch eingesetzt werden. Besonders interessant gestalteten sich diese Versuche, da gleichzeitig die bewährte Flügel-Messung mit 2 neuen Methoden, nämlich der thermodynamischen und der Ultraschall-Messung durchgeführt wurden.

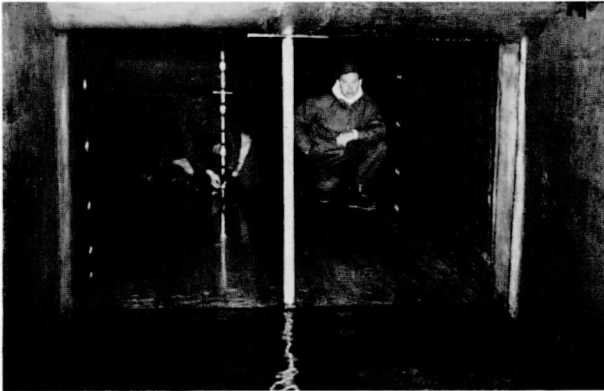


Bild 51. Meßdüse im Unterwasser der Anlage Peccia, in Strömungsrichtung gesehen. Die Bohrungen für die Ultraschallmeßeinrichtung sind in den beiden seitlichen Wänden erkennbar. Am Austritt sieht man die bewegliche Flügelstange.

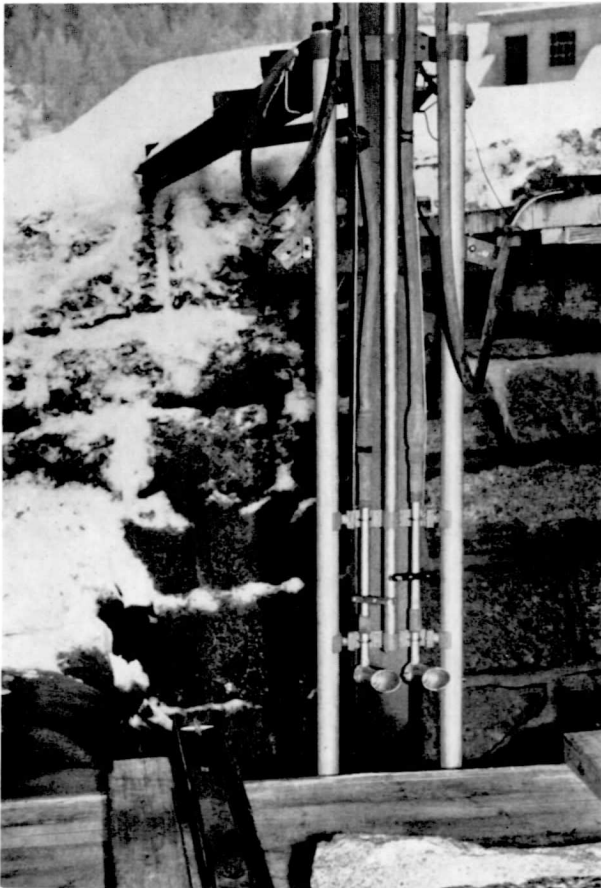


Bild 52. Blick von der oberen Decke der Holzdüse aus auf einen der hochgefahrenen, seitlich angeordneten Ultraschallmeßschlitten.

Bild 51 zeigt die Holzdüse, an der die Ultraschall- und die Flügelmessung angebracht waren. In diese 1,4 m hohe und 2,1 m breite Düse wurde eine Wassermenge bis zu ca. 8,0 m<sup>3</sup>/s geleitet. In der Anlage sind 4 Peltonturbinen mit liegender Welle eingebaut, von denen je 2 auf einen gemeinsamen Generator arbeiten. Die maximale Leistung jeder Gruppe beträgt bei etwa 400 m Fallhöhe und ca. 7,2 m<sup>3</sup>/s Wassermenge 24 500 kW.

Die Ultraschallstangen, an denen die Meßschlitten vertikal bewegbar waren, waren außerhalb der Meßdüse, wie in Bild 52 erkennbar, angeordnet.

In beiden Seitenwänden der Düse waren, wie aus Bild 53 ersichtlich, je 2 Öffnungen auf den 5 gewählten Meßhorizontalen vorgesehen. Zur genauen Kontrolle wurde mit den Flügeln auf gleichen Höhen gemessen.

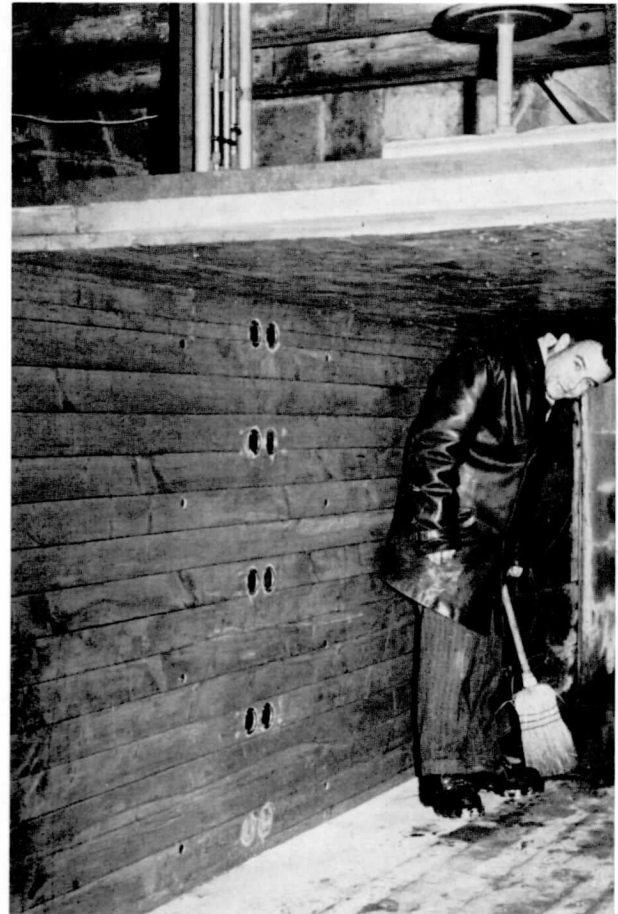


Bild 53. Blick gegen Strömungsrichtung in die Meßdüse. Abgedeckte Öffnungen für die Ultraschallmessungen sind in der Mitte der Wand erkennbar. Oberhalb der Düsendecke ist der hinter diesen Öffnungen angeordnete Meßschlitten zu sehen.

Diese Öffnungen wurden mit einer schalldurchlässigen, aber wasserundurchlässigen Spezialabdeckung versehen. Dahinter waren die Meßköpfe angeordnet. Auf dem erwähnten Bild sind oberhalb der Düse die Meßstangen noch erkennbar. Der Meßwinkel betrug ca. 53° und der Geberabstand ca. 2,8 m.

Die elektronischen Geräte waren über der Düse auf einer Meßbrücke angebracht. Bild 54 zeigt eine Fotografie der Meßgeräte. Es ist die gleiche Apparatur, die bei den im Labor durchgeführten Versuchen

40 entwickelt wurde. Lediglich wurde ein neuer Kathodenstrahl-Oszillograph, der wegen seiner kleinen Abmessungen besonders geeignet war, verwendet. Auf dem Bild sind die Stangen, an denen die beiden Meßschlitten gleiten, noch erkennbar.

Die Meßbedingungen dürfen als äußerst hart bezeichnet werden. Die Messungen wurden, teilweise nachts, bei  $-6^{\circ}\text{C}$  (7. und 8. Dez. 1957) im Freien durchgeführt. Außerdem mußte die komplette Ultraschalleinrichtung, durch besondere Umstände bedingt, in 8 Stunden betriebsbereit eingebaut werden, wovon  $1\frac{1}{2}$  Stunden für die elektronischen Geräte und die restlichen  $6\frac{1}{2}$  Stunden zum Einbau der Meßschlitten benötigt wurden. Dagegen konnte die gesamte Einrichtung in 2 Stunden demontiert und verpackt werden.

#### 4. 1 Versuchsergebnisse

Von den 8 durchgeführten Versuchen konnten die mittels Ultraschall bestimmten sekundlichen Wassermengen sofort bekanntgegeben werden. Diese Messungen ergeben Werte, die um 0,3 bis 0,8 % größer waren, als die gleichzeitig mittels Flügel gemessenen sekundlichen Wassermengen. Die aus der thermodynamischen Methode errechneten Wassermengen lagen um 0,3 bis 0,9 % unterhalb der mittels Flügel gemessenen Werte. Dieses Ergebnis darf unter Berücksichtigung, daß dies die erste Anlagemessung mit dieser neuen Ultraschall-Methode unter äußerst schwierigen Meßbedingungen war, als zufriedenstellend betrachtet werden.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich allen beteiligten Herren der Officine idroelettriche della Maggia SA, Locarno, danken, daß sie diese interessanten Versuche ermöglichten.

Herr Dipl.-Ing. G. Schatzmann, Assistent von Prof. Gerber, der mir zur Einarbeitung bei diesen Versuchen zugeteilt wurde, war mir sehr behilflich, wofür auch ihm an dieser Stelle gedankt sei.<sup>\*)</sup>

## 5. Ausblick

Die durchgeführten Versuche beschränken sich auf Messungen mit vertikal beweglichen Ultraschallgebern in rechteckigen Querschnitten.

### 5. 1 Wasserturbinen

Nach dem gleichen Verfahren können Messungen in Rohrleitungen bei einigermaßen symmetrischer Geschwindigkeitsverteilung mit 4 festen Gebern durchgeführt werden. Die Entwicklung der Geber, auch für hohen einseitigen Druck, ist ähnlich wie in der Unterwasserschalltechnik mit Verbundschwingern möglich, worauf schon hingewiesen wurde. Bei unsymmetrischer Verteilung müßten entsprechend mehr Geber in der Leitung angeordnet werden.

Auf die Verwendung der Meßmethode in Niederdruckanlagen wurde bereits hingewiesen.

### 5. 2 Flußmessungen

Wie in der Problemstellung schon erwähnt, fehlt bisher bei Flußmessungen zur Pegel-Eichung mit veränderlichem Rückstau eine geeignete Methode, so daß dieses Ultraschall-Verfahren als Lösung geeignet erscheint.

### 5. 3 Andere Gebiete

Mit der hier entwickelten Methode können auch andere Flüssigkeiten gemessen werden. Aus den vielen Möglichkeiten, die sich mit Ultraschall ergeben, seien nur einige herausgegriffen: Mengenkontrolle bei Pipelines, Durchflußmessung in der chemischen Industrie, Volumenbestimmung bei Transporten flüssiger Lebensmittel, Treibstoffkontrolle bei Strahltriebwerken.

<sup>\*)</sup> Über diese Versuche wird noch im einzelnen berichtet werden.

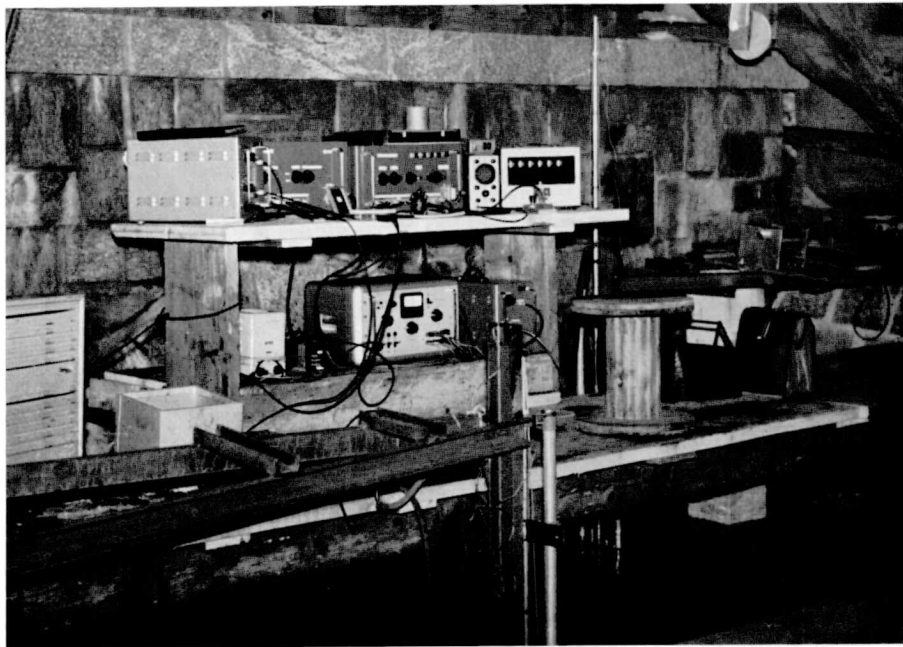


Bild 54. Fotografie des Meßplatzes bei den Versuchen in der Anlage Peccia. In der Mitte die elektronischen Geräte für die Ultraschallmessung. Im Vordergrund und ganz hinten sind die Stangen, an denen die Meßschlitten gleiten, noch erkennbar.

## Die wichtigsten verwendeten Symbole

Symbol	Einheiten	Benennung der Größe	Symbol	Einheiten	Benennung der Größe
a	m/s	Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit	e	mm; m	Stablänge in der Flüssigkeit
a <sub>W</sub>	"	Schallgeschwindigkeit in Wasser	F	%	maximaler prozentualer Fehler
a <sub>St</sub>	"	Schallgeschwindigkeit im Stahl	$\bar{F}$	%	mittlerer prozentualer Fehler
a <sub>o</sub>	"	örtliche Schallgeschwindigkeit	h <sub>Ub</sub>	mm	Überfallhöhe über Kante
v	m/s; mm/s	Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit	h <sub>US</sub>	"	Wasserhöhe bei Ultraschallmeßstelle
v <sub>a</sub>	"	Strömungsgeschwindigkeit in Senderichtung	Q <sub>Ub</sub>	l/s; m <sup>3</sup> /s	mit Überfall bestimmte sekundliche Wassermenge
$\bar{v}$	"	mittl. Strömungsgeschwindigkeit	Q <sub>US</sub>	"	mit Ultraschall bestimmte sekundliche Wassermenge
$\bar{v}_a$	"	mittl. Strömungsgeschwindigkeit in Senderichtung	Q <sub>Sch</sub>	"	sekundliche Wassermenge aus Schirmmessung
v <sub>US</sub>	"	mit Ultraschall bestimmte Strömungsgeschwindigkeit	Q <sup>x</sup> <sub>Sch</sub>	"	sekundliche Wassermenge aus korrigierter Schirmmessung
$\alpha$	°	Mach'scher Winkel	Q <sub>Fl</sub>	"	sekundliche Wassermenge aus Flügelmessung
$\beta$	"	Winkel zwischen Strömung und Senderichtung	Q <sub>Beh</sub>	"	sekundliche Wassermenge aus Behältermessung
$\Delta\varphi$	"	Phasenwinkeldifferenz	Z <sub>S</sub>	$\Omega$ ; k $\Omega$	akustischer Schallstrahlungswiderstand
t <sub>1</sub>	s	Laufzeit des Ultraschallsignales in der Flüssigkeit unter Winkel $\beta$ gegen die Strömung	$\rho_0 a_0$	g/cm <sup>2</sup> /s	Schallwiderstand
t <sub>2</sub>	"	Laufzeit des Ultraschallsignales in der Flüssigkeit unter Winkel $\beta$ mit der Strömung	J	W/cm <sup>2</sup> ; erg/cm <sup>2</sup> s	Schallintensität
$\Delta t$	"	Laufzeitdifferenz	J <sub>o</sub>	"	Schallintensität am Sendekristall
f	Hz; kHz; MHz	Schwingungsfrequenz des Ultraschallgebers, Trägerfrequenz	J <sub>x</sub>	"	Schallintensität im Abstand x
f <sub>1</sub>	"	Impulsfolgefrequenz in Kanal I	$\alpha_{th}$	s <sup>2</sup> /cm	Schallabsorptionskoeffizient, theoretisch
f <sub>2</sub>	"	Impulsfolgefrequenz in Kanal II	$\alpha_{ex}$	"	Schallabsorptionskoeffizient, experimentell
f <sub>E</sub>	"	Differenzfrequenz beim Eichen (Senden in gleicher Richtung)	$\bar{E}$	Ws/cm <sup>3</sup> ; erg/cm <sup>3</sup>	Schalldichte
f <sub>M</sub>	"	Differenzfrequenz beim Messen (Senden in entgegengesetzter Richtung)	P <sub>W</sub>	at	Schallwechseldruckamplitude
f <sub>D</sub>	"	Differenzfrequenz der beiden Impulsfolgefrequenzen, auch $f_M - f_E = f_D$	S <sub>L</sub>	dyn/cm <sup>2</sup>	Schallstrahlungsdruck
$\lambda$	mm; cm; m	Wellenlänge	U <sub>W</sub>	cm/s	Geschwindigkeitsamplitude
$\lambda_W$	"	Wellenlänge in Wasser	A <sub>W</sub>	$\mu$ ; cm	Schwingungsamplitude
b	"	Abstand der seitl. Begrenzungen	B <sub>W</sub>	cm/s <sup>2</sup>	Beschleunigungsamplitude
b <sub>K</sub>	"	Innerer Wandabstand bei seitlichen Einbauten	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Flüssigkeitsdichte
l	"	Geberabstand zwischen Sender und Empfänger	m	%; $m = \frac{\rho_2 a_2}{\rho_1 a_1}$	Reflexionskoeffizient
$\Delta l$	mm	Geberabstandsdifferenz zwischen 2 Kanälen	1/m	%	Durchlässigkeitskoeffizient
d	"	Ultraschallgeberdurchmesser	$\vartheta$	°	halber Schallstrahlwinkel
			P <sub>ak</sub>	W	akustische Leistung
			A <sub>G</sub>	cm <sup>2</sup>	Geberstrahlfläche
			U <sub>eff</sub>	V; kV	notwendige Wechselspannung zur Schwingungsanregung am Piezo-Kristall

## Literatur-Verzeichnis

- [1] Schweizer Regeln für Wasserturbinen III. Auflage, herausgegeben vom SEV, Schweiz. Elektrotechnischer Verein. Bull. Schw. elektr. Ver. Bd. 48 (1957) Nr. 3 S. 121
- [2] *G. Willm und P. Campas* Mesure du rendement des turbines hydrauliques par la méthode thermométrique Poirson, Houille blanche Bd. 9 (1954) Nr. 4 S. 449—460 Nr. 5 S. 590—607
- [3] *P. Weber* Demonstration des Prinzips der Wassermessung mittels Ultraschall. Rezension von Artikel (23). Bull. Schw. elektr. Ver. Bd. 46 (1955) Nr. 23 S. 1117/18
- [4] *H. Bircher und E. Walser* Kontinuierliche Bestimmung der Abflußmengen in Gewässerstrecken mit veränderlichem Rückstau. Wasser- und Energiewirtschaft (1950) Nr. 6, 7, 8
- [5] *H. Hönl* Über das Schallfeld einer gleichförmig-translatorisch bewegten punktförmigen Schallquelle. Annalen der Physik Bd. 43 (1943) S. 437
- [6] *W. Schaafs* Molekular-kinetische Theorie der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten. Zeitschrift der Physikalischen Chemie Bd. 1 (1951) 96 S. 397—412
- [7] *N. Rott* Das Feld einer rasch bewegten Schallquelle. Promotionsarbeit ETH Zürich S. 9
- [8] *H. P. Kalmus* Electronic Flowmeter System. The Review of Scientific Instruments Vol. 25 Nr. 3 (März 1954) S. 201—206
- [9] *Oskar Rütten* Deutsches Patent Nr. 520484 (Nov. 1928)
- [10] *J. W. Gray* Amerikan. Patent 2.534.712 (19.12.1950)
- [11] *B. O. Sproule* Britisches Patent, Spezifikation 623.022 (11. 5. 1943)
- [12] *Antonio Fiorenzi*: Methodo acustico per la misura della velocità dei fluidi in movimento entro condotti chiusi con particolare riguardo all' acqua fluente nelle tubazioni forzate dagli impianti idroelettrici. Italien. Patent. Brevetto Industriale Nr. 287653 (1931)
- [13] *H. E. Hartig* Fluid Meter, Amerikan. Patent Nr. 2.015.933 (1.10.1935)
- [14] *H. E. Hartig* Fluid Meter and Method of Measuring the Rate of Flow of Fluids. Amerikan. Patent Nr. 2.151.203 (21.3.1939)
- [15] *I. Wolf* Air Speed Indicator. Amerikan. Patent Nr. 2.328.546 (7.9.1943)
- [16] *N. J. Cafarelli* Fluid Velocity Indicator. Amerikan. Patent Nr. 2.328.546 (7.9.1943)
- [17] *R. C. Svengel* Fluid Velocity Measuring System. Amerikan. Patent Nr. 2.746.291
- [18] *K. S. Stull jr.* Ultrasonic Phase Meter measures water velocity. Electronics Bd. 28 (Sept. 1955) Heft 9 S. 128—131
- [19] *R. C. Svengel* Antenna-type Transducers for Ultrasonic Flowmetering. Convention Records of IRE, Vol. 3 (1955) Part 9
- [20] *W. P. Mason und R. F. Wick* Use of barium titanat transducers capable of large motion at an ultrasonic frequency. J. acoust. Soc. Ame. Bd. 23 (1951) S. 209—214. Amerikan. Patent Nr. 2.573.168 (1950)
- [21] *W. P. Mason und R. F. Wick* Mechanical impedance transformer. Amerikan. Patent Nr. 2.573.168 (1950)
- [22] *W. B. Hess, R. C. Svengel und S. K. Waldorf* Measuring Water Velocity by an Ultrasonic Method. Electr. Engineering, Vol. 69 (Nov. 1950) S. 983
- [23] *R. C. Svengel, W. B. Hess, S. K. Waldorf* Demonstration of the Principles of the Ultrasonic Flowmeter. Electr. Engineering, Vol. 73 (1954) Nr. 12 S. 1082—1085
- [24] *R. C. Svengel, W. B. Hess, S. K. Waldorf* The Ultrasonic Measurement of Hydraulic Turbine Discharge. Transactions of the ASME Vol. 77 (Okt. 1955) Nr. 7 S. 1037—1043
- [25] *R. C. Svengel, W. B. Hess, S. K. Waldorf* Principles and Application of the Ultrasonic Flowmeter. Power Apparatus and Systems (1955)
- [26] *L. Sani* Sulla misura delle velocità medie di una corrente liquida a mezzo di ultrasuoni modulati. L'Energia elettrica (März 1957) Nr. 3 S. 237—251
- [27] *Gulton Industries Inc.* Glennite Ultrasonic Flowmeter, Metuchen, New Jersey, USA (Pamphlet)
- [28] *Fisher & Porter Company* Ultrasonic Flowmeter. Hattsov, Pennsylvania USA (Pamphlet)
- [29] *Jack Kriß* Ultrasonic Flowmeter. Instruments & Automation Vol. 28 (Nov. 1955) S. 1912/13

- [30] *H. S. Kahn* Ultrasonic Meters Mass Fuel Flow. Aviation (Sept. 1955)
- [31] *N. E. Dorsay* Properties of ordinary water substance. Reinhold Publishing Company, New York, NY. (1940) S. 5191/93
- [32] *Siehe L. Bergmann*  
bis Der Ultraschall und seine Anwendung  
[40] in Wissenschaft und Technik.  
6. Auflage, Hirzelverlag Stuttgart (1954)  
[32] S. 630—32; [33] S. 440; [34] S. 468/9;  
[35] S. 344; [36] S. 85—170; [37] S. 179/80;  
[38] S. 847; [39] S. 177; [40] S. 461
- [41] *R. L. Garman, M. E. Droz und J. W. Gray*  
Supersonic Flowmeter.  
Amerikan. Patent Nr. 2.669.121 (1948)
- [42] *M. G. Hangen und Mitarbeiter*  
An Ultrasonic Flowmeter.  
Proc. Nat. Electronics Conf. (1956)  
S. 465—475
- [43] *M. Merle* Etude experimentale des ondes de choc  
à l'aide d'un faisceau d'ultra-sons.  
Elettronica Bd. 4 (1955) S. 36—39
- [44] *R.M. Schotland* The measurement of wind velocity by  
sonic means.  
J. Meteorology Bd. 12 (1955) S. 386—390
- [45] *J. u. P. Curie* Développement par pression d'électricité  
polaire dans les cristaux lamiedres à  
faces inclinées.  
C. R. Acad. Sci. Paris Bd. 91 (1880)  
S. 294/95
- [46] *M.P. Langevin* Procédé et appareil d'émission et de  
réception des ondes élastiques sous-  
marines à l'aide des propriétés piézo-  
électrique du quartz.  
Franz. Patent Nr. 505703 (1918)
- [47] *A. Lutsch* Das Ultraschall-Impuls-Reflexions-Ver-  
fahren zur zerstörungsfreien Werkstoff-  
prüfung.  
Archiv für technisches Messen. Liefere-  
rung 212, 218, 219, 220
- [48] *R. Esche* Untersuchungen der Schwingungskavi-  
tation in Flüssigkeiten.  
Akustische Beihefte (1952) S. 208—218
- [49] *R. Dubs* Angewandte Hydraulik  
Rascher Verlag Zürich (1947)
- [50] *Hans Thoma* Research and Development.  
Engineering (20. 12. 1957) S. 781/82

## Lebenslauf

Geboren wurde ich am 17. März 1927 in Madrid. Mit 6 Jahren kam ich in die deutsche Schule in Madrid, die ich bis zum 9. Lebensjahr besuchte. Die Zeit des spanischen Bürgerkrieges von 1936—1939 durfte ich in einem Internat in Bad Godesberg a.Rh., dem evangelischen Pädagogium, verbringen.

1939—1945 war ich Schüler der deutschen Oberschule in Madrid und gleichzeitig auch der entsprechenden spanischen Schule. 1944 legte ich das spanische Staatsexamen ab und 1945 das deutsche Abitur. Bis 1946 studierte ich an einer spanischen Ingenieurschule und absolvierte meine für das Schweizer Studium notwendige 9-monatige Werkstattpraxis.

Ab Oktober 1947 konnte ich in Zürich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Maschineningenieurwesen studieren, nachdem ich dort das Aufnahmeexamen abgelegt hatte. 1951 schloß ich mein Studium mit dem Schlußdiplom ab, wobei ich als Hauptfach hydraulische Maschinen wählte.

Herr Prof. Hans Gerber rief mich anschließend an das Institut für Hydraulische Maschinen und Anlagen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Dort blieb ich als Assistent bis April 1953.

1953 bis Ende 1954 war ich bei der Firma J. M. Voith GmbH. in Heidenheim an der Brenz in verschiedenen Konstruktions-Abteilungen des Wasserturbinenbaus und im Betrieb tätig. Dann trat ich als stellvertretender Betriebsleiter in die Firma Boetticher y Navarro, Madrid, ein, wo ich neben anderen Fabrikationszweigen weiterhin mit dem Wasserturbinenbau in Berührung blieb. In dieser Zeit konnte ich einen mehrmonatigen Spezialkurs mit theoretischem und praktischem Schlußexamen zur Ausbildung als Schweißingenieur absolvieren.

Von April 1956 bis Dezember 1957 beschäftigte ich mich am Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen an der ETH Zürich mit der Ausarbeitung dieser Dissertation.

Ab 1. Januar 1958 bin ich bei der Firma J. M. Voith GmbH., Heidenheim, tätig.

Zürich, den 19. Dezember 1957.

Carlos Knapp