

DIN EN ISO 6416



ICS 17.120.20

**Hydrometrie –
Messung des Abflusses mit dem Ultraschallverfahren (akustisches
Verfahren) (ISO 6416:2004);
Deutsche Fassung EN ISO 6416:2005**

Hydrometry –
Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method (ISO 6416:2004);
German version EN ISO 6416:2005

Hydrométrie –
Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique) (ISO 6416:2004);
Version allemande EN ISO 6416:2005

Gesamtumfang 60 Seiten

Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN

Nationales Vorwort

Diese Europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 318 „Hydrometrie“ (Sekretariat: Vereinigtes Königreich) des Europäischen Komitees für Normung (CEN) ausgearbeitet.

Die nationalen Normenorganisationen sind verpflichtet, diese EN vollständig und unverändert in ihr nationales Normenwerk zu übernehmen.

Die vorbereitenden Arbeiten wurden von der Arbeitsgruppe „Hydrometrie“ des CEN/TC 318 durchgeführt, deren Federführung im Vereinigten Königreich (BSI) lag; für Deutschland war der Arbeitsausschuss NAW VI 10 „Hydrometrie“ an der Bearbeitung beteiligt.

Nach einem im CEN mit positivem Ergebnis durchgeführten einstufigen Annahmeverfahren (UAP) wird dieses Bestimmungsverfahren als Europäische Norm in das DIN-Normenwerk übernommen.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 748 siehe DIN EN ISO 748

ISO 772 siehe DIN EN ISO 772

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 748, *Durchflussmessung in offenen Gerinnen — Geschwindigkeitsflächen-Verfahren*

DIN EN ISO 772, *Hydrometrische Festlegungen — Begriffe und Zeichen*

Deutsche Fassung

**Hydrometrie —
Messung des Abflusses mit dem Ultraschallverfahren
(akustisches Verfahren) (ISO 6416:2004)**

Hydrometry —
Measurement of discharge by the ultrasonic
(acoustic) method (ISO 6416:2004)

Hydrométrie —
Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique
(acoustique) (ISO 6416:2004)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 11. Juli 2005 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: rue de Stassart, 36 B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Anwendung	4
4.1 Offene Gerinne	4
4.2 Gerinneaufteilung	5
4.3 Geschlossene Kanäle.....	5
5 Messverfahren.....	6
5.1 Durchfluss	6
5.2 Berechnung des Durchflusses aus der Laufzeitmessung	6
6 Fließgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Ultraschall-(Laufzeit-)Verfahren	7
6.1 Kurzbeschreibung	7
6.2 Schallausbreitung in Wasser.....	10
7 Anordnung der Messgeräte	14
7.1 Allgemeines.....	14
7.2 Einstreckenanlagen	15
7.3 Mehrebenenanlagen	16
7.4 Kreuzstreckenanlagen	17
7.5 Reflexionssysteme	18
7.6 Systeme mit Respondern.....	20
7.7 Anlagen mit aufgeteilten Querschnitten	21
7.8 Geneigte Messstrecken.....	22
8 Durchflussberechnung	22
8.1 Einstreckenanlagen	22
8.2 Mehrebenenanlagen	23
8.3 Systeme mit im Gerinne uferfern angeordneten Wandlern.....	26
9 Kalibrierung des Systems.....	27
9.1 Allgemeines.....	27
9.2 Einstreckenanlagen	28
10 Auswahl der Messstelle	30
10.1 Praktische Beschränkungen	30
10.2 Physikalische Beschränkungen für die Messstelle	31
10.3 Physikalische Beschränkungen außerhalb der Messstelle	32
11 Überprüfung des Standortes für die Messstelle – Vor Planung und Ausführung	32
11.1 Allgemeines.....	32
11.2 Sichtprüfung.....	33
11.3 Überprüfung des Querschnitts.....	33
11.4 Überprüfung der Geschwindigkeitsverteilung	34
11.5 Überprüfung der Signalausbreitung	34
11.6 Andere Überprüfungsmaßnahmen	35
12 Betriebliche Anforderungen für die Messung	35
12.1 Allgemeines.....	35
12.2 Grundlagen der Bestimmung des Durchflusses	35
12.3 Bestimmung der Wassergeschwindigkeit	36
12.4 Bestimmung des Wasserstandes oder der Wassertiefe	36
12.5 Gerinnebreite.....	36

	Seite
13 Ausrüstung einer Messstation	37
13.1 Allgemeines	37
13.2 Konstruktion und Bauweise der Ausrüstung	38
13.3 Reflektoren	39
13.4 Bauarbeiten	42
13.5 Zeitsteuerung und Verarbeitung von Signalen	42
13.6 Eigenkontrolle des Systems	45
13.7 Standortspezifische Angaben (oder Standortparameter)	45
13.8 Uhrzeit und Datum	46
13.9 Leistungskriterien des Systems	46
13.10 Systemausgabe	47
13.11 Einbau	48
13.12 Inbetriebnahme	49
13.13 Gebrauchsanleitung	49
13.14 Wartung	49
14 Messunsicherheiten	51
14.1 Allgemeines	51
14.2 Definition der Unsicherheit	51
14.3 Unsicherheit des Durchflusses	52
Literaturhinweise	58

Vorwort

Der Text von ISO 6416:2004 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 113 „Hydrometric determinations“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als EN ISO 6416:2005 durch das Technische Komitee CEN/TC 318 „Hydrometrie“ übernommen, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2006, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2006 zurückgezogen werden.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 6416:2004 wurde vom CEN als EN ISO 6416:2005 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

1 Anwendungsbereich

Die Internationale Norm beschreibt die Einrichtung und Arbeitsweise einer nach dem Ultraschall-Laufzeitverfahren arbeitenden Messstation zur kontinuierlichen Messung des Abflusses in einem Fluss, in einem offenen Gerinne oder in einem geschlossenen Kanal. Außerdem werden Verfahrensgrundlagen, Arbeitsweise der Messgeräte sowie Anforderungen an die Messgeräte und die Verfahren zur Inbetriebnahme festgelegt.

Die Norm beschränkt sich auf das Verfahren, bei dem die „Laufzeit akustischer Impulse“ ausgewertet wird; sie gilt nicht für Systeme, die das Doppler-Verfahren, das Korrelationsverfahren oder die Beziehung Wasserstand - Durchfluss anwenden.

Diese Internationale Norm gilt nicht für Messungen in mit Eis bedeckten Flüssen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 772:1996, *Hydrometric determinations — Vocabulary and symbols*

ISO 4373:1995, *Measurement of liquid flow in open channels — Water-level measuring devices*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 772.

4 Anwendung

4.1 Offene Gerinne

4.1.1 Das Verfahren ist für die Durchflussmessung in Flüssen geeignet, wobei ein wesentlicher Vorteil darin besteht, dass im Vergleich zu anderen verfügbaren Techniken keine besonderen Standortanforderungen bestehen. Dies gilt insbesondere für die Tatsache, dass das Messgerät nicht auf eine eindeutige Wasserstands-Durchflussbeziehung angewiesen ist und somit Regelung und Steuerung des Durchflusses unnötig sind.

4.1.2 Messgeräte, die nach diesem Verfahren arbeiten, sind in der Lage, die Durchflüsse an einem definierten Messquerschnitt über einen großen Durchflussbereich mit hoher Messgenauigkeit zu bestimmen. Sie sind unempfindlich gegenüber Rückstauwirkungen, wie sie durch Gezeiten, stromab gelegene Zuflüsse von Nebengewässern, Gewässerverkrautung, Wasserstandsregelung in Stauhaltungen und regelmäßig wiederkehrende Behinderungen des Gerinnes zurückzuführen sind.

ANMERKUNG An Messquerschnitten mit ständigen Sohlveränderungen kann der Einsatz von Ultraschall-Laufzeitanlagen problematisch sein.

4.1.3 Die Verkehrssicherheit der Schifffahrt wird durch das Verfahren nicht behindert. Das Verfahren stellt keine signifikante Gefährdung und keine Benachteiligung für andere Flussbenutzer oder Anlieger dar. Einige Arten von Fischen können jedoch empfindlich gegenüber bestimmten Ultraschallsignalen reagieren. Form und Befestigung des Messgerätes können so gewählt werden, dass es kein Strömungshindernis im Gewässer darstellt.

4.1.4 Der Betrieb der Elektronik ist für die Anwendung von Batteriebetrieb ausgelegt. Damit können die Systeme auch autark in abgelegenen Gebieten arbeiten. Zur Senkung des Energieverbrauchs wird das System gewöhnlich so eingestellt, dass der Durchfluss nur für kurze Zeitabschnitte erfasst wird, und das System zwischen den Messintervallen in einen Ruhezustand zurückkehrt. (Siehe 10.1.3 und 13.9.5.)

4.1.5 Das Verfahren ist eigentlich nicht für die Anwendung bei mit Eis bedecktem Gerinne geeignet, weil die Bestimmung des durchströmten Querschnitts erschwert ist. Obwohl das eine Beschränkung hinsichtlich der Anwendung ist, kann das Verfahren dennoch für die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Wassers unter dem Eis von Bedeutung sein, wenn die Wandler in nicht gefrorenem Wasser angebracht werden können.

4.2 Gerinneaufteilung

4.2.1 An den Stellen, an denen der Gesamtdurchfluss auf zwei oder mehrere einzelne Gerinne aufgeteilt ist, wie z. B. unter einer mehrfeldrigen Bogenbrücke, können die Geräte so konfiguriert sein, dass der Durchfluss in jedem Gerinne einzeln und daraus dann der Gesamtdurchfluss bestimmt werden kann.

4.2.2 Wenn das Wasser nicht innerhalb eines einzigen klar definierten Querschnitts strömt und besonders dann, wenn ein beträchtlicher Durchflussanteil den Hauptmessquerschnitt über ein ausgedehntes Überschwemmungsgebiet umfließt, kann das Überschwemmungsgebiet möglicherweise in eine Reihe von „Kanälen“ unterteilt werden, in denen der Durchfluss gemessen werden kann.

4.2.3 Der mit Planung und Aufbau der Messstation beauftragte Messtechniker trifft die Entscheidung, ob die oben beschriebene umfangreiche Durchflussmessung im Überschwemmungsgebiet oder lediglich eine Erfassung des Durchflusses oder der Fließgeschwindigkeit anzuwenden ist. Im letztgenannten Fall dürfen im Überschwemmungsgebiet Kanäle mit bekanntem Querschnitt angelegt werden. Sie durchziehen normalerweise nicht das gesamte Überschwemmungsgebiet, sondern bieten nur Stellen, an denen der Durchfluss im Überschwemmungsgebiet für eine spätere Untersuchung und Auswertung erfasst werden kann.

4.2.4 Es sollte bedacht werden, dass Systeme, die für die Messung des Durchflusses in Überschwemmungsgebieten ausgelegt sind, von folgenden praktischen Schwierigkeiten betroffen sein können:

- a) Unmöglichkeit der Inbetriebnahme des Systems, weil sich im Messquerschnitt kein Wasser befindet;
- b) Instandhaltung des Messquerschnitts, einschließlich Entkrautung, Beräumung von Geschiebe sowie der Reparatur von Zerstörungen durch Vandalismus.

4.3 Geschlossene Kanäle

Das Ultraschallverfahren kann auch auf die Durchflussmessung in geschlossenen Kanälen für Niederschlags- und Abwasser sowohl in Freispiegel- als auch in voll durchströmten Leitungen angewendet werden.

Bei in Abwasser angewandten Systemen sollte besonders auf Folgendes geachtet werden:

- a) die Herkunft des Wassers, besonders ob es von Belüftungsbecken, einer Strecke des Gerinnes mit Belüftung oder einem Wasserkraftwerk kommt. Die im Wasser aus derartigen Quellen gelöste Luft kann zur Bildung von Blasen führen, die wiederum die Arbeitsweise des Durchfluss-Messgerätes beeinträchtigen können (siehe 10.3.1);
- b) mögliche Belüftung des Wassers durch einen Wechselsprung oder ein Wehr oberhalb des Messquerschnitts, besonders unter Niederschlagsbedingungen (siehe 10.3.1);
- c) die Gestaltung der Befestigungen für die Wandler, um das Verschmutzungsrisiko durch Schmierfett, textile Stoffe und Papier zu beseitigen;
- d) die Anforderung an das System, dass die örtlichen Ausführungsbestimmungen in Bezug auf elektrische Ausrüstungen, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, eingehalten werden. Das erfordert in der Regel eine zertifizierte eigensichere Gestaltung der Wandler (die piezoelektrische Zündquellen sein können) und der elektronischen Bauteile (siehe zum Beispiel EN 50014);
- e) die Änderung des Algorithmus zur Berechnung des Durchflusses, wenn die Leitung unter Druck steht.

Bei Abwasserkanälen mit einer Breite von weniger als etwa 4 m stellt eine hohe Schwebstofffracht wahrscheinlich kein ernsthaftes Problem hinsichtlich der Signalschwächung dar (siehe 6.2.3).

5 Messverfahren

5.1 Durchfluss

5.1.1 Der Durchfluss, wie in ISO 772 definiert, ist das Flüssigkeitsvolumen, das in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt fließt. Er wird gewöhnlich mit dem Symbol q und in Kubikmeter je Sekunde (m^3/s) angegeben. Die Definition des Durchflusses ist das Produkt aus der benetzten Querschnittsfläche und dem senkrecht dazu verlaufenden Vektor der mittleren Geschwindigkeit.

5.1.2 Mit den Messverfahren kann der Betrag des Gesamtdurchflusses q entweder direkt durch Messung der Zeit, die zum Füllen eines Behälters von bekanntem Volumen benötigt wird, bestimmt werden oder die Verfahren können indirekt sein und die Berechnung des Durchflusses aus den gemessenen Fließgeschwindigkeiten an allen Stellen des benetzten Querschnittes erfordern. Letztere werden allgemein als „Geschwindigkeitsflächenverfahren“ bezeichnet. In der Praxis ist es nicht möglich, die Geschwindigkeiten an allen Stellen zu messen, und deshalb befassen sich die Geschwindigkeitsflächenverfahren nur mit einer begrenzten Anzahl von Messpunkten.

Das Laufzeitverfahren ist ein Geschwindigkeitsflächenverfahren, bei dem Fließgeschwindigkeiten angewendet werden, die durch die Messeinrichtung bestimmt wurden und deren Mittelwert entlang einer oder mehrerer Linien bestimmt wird, die gewöhnlich, aber nicht unbedingt, horizontal sind.

5.2 Berechnung des Durchflusses aus der Laufzeitmessung

5.2.1 Die Durchflussmessung mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren ist analog der Durchflussmessung mit Fließgeschwindigkeitsmessgeräten. Während jedoch das gebräuchlichste Fließgeschwindigkeitsmessverfahren auf der Schätzung der mittleren Geschwindigkeit bei mehreren über den Messquerschnitt verteilten Vertikalen beruht, sind beim Laufzeitverfahren die Geschwindigkeitserfassungen horizontal orientiert (und vertikal verteilt). Prinzipiell kann der Durchfluss nach genau den gleichen Verfahren wie bei den Fließgeschwindigkeitsmessverfahren (siehe ISO 748) errechnet werden. In der Praxis erleichtern jedoch die unterschiedlichen graphischen Verfahren die automatische Berechnung nicht unbedingt, so dass nur arithmetische Verfahren nutzbar sind.

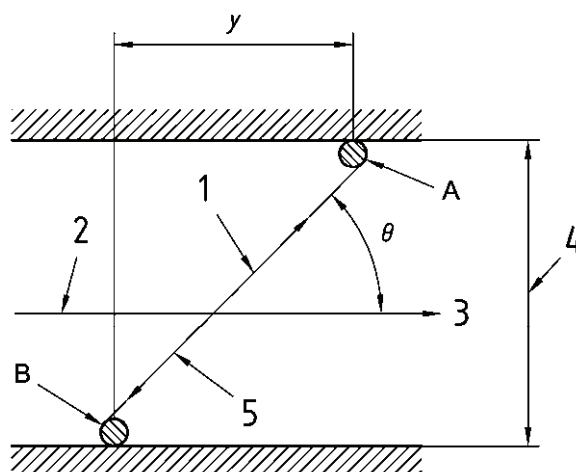
5.2.2 Der Durchfluss kann unter der Voraussetzung berechnet werden, dass zwischen der horizontal gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit und der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit eine Beziehung besteht. Wenn die bei einer einzelnen Höhenlage gemessene Geschwindigkeit für die Festlegung dieser Beziehung nicht ausreichend ist, können an weiteren Höhenlagen Messungen durchgeführt werden. Die sich ergebenden Stichproben der Fließgeschwindigkeit können vertikal integriert werden, um einen Schätzwert der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit zu erhalten.

5.2.3 Die Durchflussberechnung erfordert auch, dass die Querschnittsfläche des Gewässers bekannt ist. Ein Ultraschall-Laufzeit-System ist demzufolge im Normalfall nicht nur in der Lage, Stichprobenmessungen der Geschwindigkeit durchzuführen, sondern auch die Wassertiefe zu bestimmen (oder ein Signal eines anderen Gerätes, das die Wassertiefe bestimmt, zu übernehmen) und Einzelheiten der Beziehung zwischen Wassertiefe und Querschnittsfläche zu speichern. Es ist üblicherweise auch in der Lage, die mathematischen Funktionen auszuführen, die für die Berechnung des Durchflusses aus den relevanten gespeicherten und direkt bestimmten Daten notwendig sind.

6 Fließgeschwindigkeitsbestimmung mit dem Ultraschall-(Laufzeit-)Verfahren

6.1 Kurzbeschreibung

6.1.1 Ein Ultraschallimpuls breitet sich stromabwärts schneller aus als ein vergleichbarer Impuls stromaufwärts. Die Geschwindigkeit eines Schallimpulses, der sich diagonal zur Strömung stromabwärts ausbreitet, wird durch die Geschwindigkeitskomponente des Wassers erhöht. Umgekehrt verringert sich die Geschwindigkeit eines Schallimpulses, der sich in entgegengesetzter Richtung bewegt. Der Unterschied in der Laufzeit zwischen den beiden Richtungen kann zur Trennung der Geschwindigkeit des Schalls im Wasser von der Geschwindigkeitskomponente entlang der vom Ultraschall durchlaufenen Strecke verwendet werden.



Legende

- 1 v_{path} -Komponente der Geschwindigkeit des Wassers entlang des Weges
- 2 v_{line} -Komponente der Geschwindigkeit des Wassers in Fließrichtung
- 3 Fließrichtung
- 4 Gerinnebreite
- 5 Weg des Ultraschalls

- A, B Wandler
- θ Winkel zwischen dem Weg und der Fließrichtung
- y Abstand zwischen den Wählern in Fließrichtung

Bild 1 — Schematische Darstellung des Grundprinzips

6.1.2 Für den Weg zwischen den Wählern A und B in Bild 1 beträgt die Laufzeit der Ultraschallimpulse:

$$t_{AB} = L/(c - v \cos \theta) \text{ und } t_{BA} = L/(c + v \cos \theta) \quad (1)$$

Dabei ist

- t_{AB} die Laufzeit vom Wandler A zum Wandler B, in Sekunden;
- t_{BA} die Laufzeit vom Wandler B zum Wandler A, in Sekunden;
- L die Weglänge (Abstand zwischen Wandler A und Wandler B), in Meter;
- c die Geschwindigkeit des Schalls in Wasser, in Meter je Sekunde;
- v_{line} die Hauptströmungsrichtung oder die mittlere Geschwindigkeit des Wassers im Gerinne in Fließrichtung, in Meter je Sekunde;
- θ der Winkel zwischen dem Weg und der Fließrichtung.

Die Auflösung nach der Liniengeschwindigkeit ergibt:

$$v_{\text{line}} = L \times (t_{\text{AB}} - t_{\text{BA}}) / (t_{\text{AB}} \times t_{\text{BA}} \times 2 \cos \theta) \quad (2)$$

6.1.3 Die Laufzeiten in Gleichung (2) gelten nur für die Strecke im Wasser und umfassen nicht die Festwerte von Verzögerungen durch die Laufzeiten durch die Wandleroberflächen und Kabel, Verzögerungen in Schaltkreisen von Sendern und Empfängern sowie Verzögerungen bei der Signalerkennung (die durch Signalverzerrung beeinträchtigt sein kann). Diese festen Verzögerungen beeinträchtigen nicht die Laufzeitdifferenz von $(t_{\text{AB}} - t_{\text{BA}})$, sie beeinträchtigen jedoch den Ausdruck $(t_{\text{AB}} \times t_{\text{BA}})$. Dieser Faktor ist von besonderer Bedeutung bei kleinen Gerinnen oder wenn lange Kabel notwendig sind, die zu den Wandlern verlaufen.

Typische Verzögerungszeiten von Wandlern und elektronischen Schaltungen liegen zwischen 4 µs und 20 µs.

Die Verzögerungszeit bei Kabeln beträgt üblicherweise 1 µs je 200 m Kabel, d. h. 100 m in jede Richtung – Senden und Empfangen.

Unter Berücksichtigung der Signalverzögerungen ergibt sich aus Gleichung (2) für die berechnete Wassergeschwindigkeit:

$$v = L \times (t_{\text{R}} - t_{\text{F}}) / [(t_{\text{R}} - \delta) \times (t_{\text{F}} - \delta) \times 2 \cos \theta] \quad (3)$$

Dabei ist

- t_{R} die Laufzeit vom elektronischen Bauteil über Wandler A zum Wandler B und zurück zum Bauteil, in Sekunden;
- t_{F} die Laufzeit vom elektronischen Bauteil über Wandler B zum Wandler A und zurück zum Bauteil, in Sekunden;
- δ die Signalverzögerung.

Bei einem Gerinne mit einer Breite von 1 m, einem Wegwinkel von 45° und einer Gesamtsignalverzögerung von 10 µs wird ein Fehler von 2 % in die berechnete Wassergeschwindigkeit eingeführt, wenn der Verzögerungseffekt vernachlässigt wird.

Bei breiteren Gerinnen verringert sich der Effekt der Signalverzögerung im Verhältnis zur Weglänge und kann bedeutungslos sein.

6.1.4 Es sollte bedacht werden, dass die Berechnung der Wassergeschwindigkeit

- unabhängig ist von der Schallgeschwindigkeit in Wasser;
- proportional der Differenz der Laufzeiten ist;
- umgekehrt proportional zum Produkt der Laufzeiten ist;
- entscheidend vom Winkel zwischen dem Weg und der Fließrichtung abhängt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 — Systematische Fehler bei Parallelitätsabweichungen der angenommenen Fließrichtung von der Gerinneachse

Wegwinkel θ	Fehler der Fließgeschwindigkeit bei 1° Differenz zwischen tatsächlicher und angenommener Fließrichtung
Grad	%
30	1,0
45	1,7
60	3,0

6.1.5 Für Durchflussmessungen im offenen Gerinne wird aus praktischen Erwägungen festgelegt, dass

- a) die einen „Ultraschallweg“ begrenzenden Wandler an gegenüberliegenden Ufern des Wasserlaufs angeordnet werden;
- b) die Verbindungslinie zwischen den Wandlern einen Winkel mit der mittleren Fließrichtung bildet, der zwischen 30° und 65° betragen sollte.

6.1.6 Bei der Durchflussmessung im offenen Gerinne gibt es folgende Beschränkungen.

- a) Bei Schnittwinkeln über 65° können in entgegengesetzten Richtungen so geringe Laufzeitdifferenzen zwischen Schallimpulsen auftreten, dass diese besonders bei geringen Fließgeschwindigkeiten einer relativ großen Messunsicherheit unterworfen sind.
- b) Bei einem Schnittwinkel von 90° gibt es keine Laufzeitdifferenz zwischen Hin- und Rücklaufimpulsen und demzufolge kann die Fließgeschwindigkeit nicht ermittelt werden.
- c) Bei großen Schnittwinkeln vergrößert sich auch der Fehler bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit, der sich aus den Annahmen bei der Abschätzung des Winkels ergibt. Die Begründung dafür liefert die Cosinusfunktion in der Gleichung, die den Zusammenhang zwischen Laufzeitdifferenz und Fließgeschwindigkeit angibt (siehe 6.1.3). Tabelle 1 zeigt die entsprechenden Auswirkungen.
- d) Bei Schnittwinkeln unter 30° können folgende Probleme auftreten.
 - 1) Die Messstrecke im Gerinne kann zu lang werden und aufhören quasi-gleichförmig zu sein.
 - 2) Die Fließrichtung bezüglich des Weges könnte nicht konstant zu sein.
 - 3) Bei der Standortwahl können praktische Probleme durch die Länge des Gerinneabschnitts auftreten, der für das Durchflussmessgerät zu präparieren und frei von Ablagerungen und Unkraut zu halten ist.
 - 4) Zu lange Wege können zu Problemen im Zusammenhang mit der Signalintensität und/oder Reflexion des Signalimpulses von der Gerinnesohle oder der Wasseroberfläche führen, besonders, wenn vertikale Temperaturgradienten vorliegen.

6.1.7 Zur Berechnung des Durchflusses sollte das Durchflussmessgerät eine Einrichtung zum Speichern von Einzelheiten der Beziehung von Wassertiefe und Querschnittsfläche enthalten, die Wassertiefe oder den Wasserstand ermitteln, für jede Messstrecke die Wassergeschwindigkeit bestimmen und in der Lage sein, die mathematischen Funktionen auszuführen, die für die Berechnung des Durchflusses aus den entsprechenden gespeicherten und direkt bestimmten Daten benötigt werden (siehe Abschnitt 7).

6.2 Schallausbreitung in Wasser

6.2.1 Allgemeines

Schall ist eine mechanische Störung des Mediums, in dem er sich ausbreitet. Er umfasst einen großen Frequenzbereich. Der hörbare Bereich liegt zwischen etwa 50 Hz und 15 000 Hz und wird allgemein als „Schall“ bezeichnet. Für Frequenzen unter 50 Hz wird im Allgemeinen die Bezeichnung „Unterschall“ und für Frequenzen über 15 000 Hz die Bezeichnung „Ultraschall“ angewendet. Laufzeitsysteme werden im Ultraschallbereich bei Frequenzen betrieben, die üblicherweise zwischen 100 kHz und 1 MHz liegen.

Die Leistung von Laufzeitsystemen hängt stark von den Kenngrößen der Schallausbreitung in Wasser ab. Diese Kenngrößen sind nachfolgend kurz beschrieben.

6.2.2 Schallgeschwindigkeit in Wasser

Die Schallgeschwindigkeit in Wasser hängt von der Temperatur und vom Salzgehalt des Wassers sowie dem Wasserdruck, nicht aber von der Frequenz ab. In offenen Gerinnen ist die Wirkung des Wasserdrucks vernachlässigbar. Innerhalb der üblichen Umgebungstemperaturen schwankt die Schallgeschwindigkeit in Süßwasser von etwa 1 400 m/s bis zu Werten etwas über 1 500 m/s (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 — Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Süßwasser

Temperatur °C	(Ungefähre) Schallgeschwindigkeit m/s
0	1 402
10	1 447
20	1 482
30	1 509
40	1 529
ANMERKUNG 1 Die oben angeführten Zahlen gelten für Wasser in den meisten natürlichen Süßwasserflüssen und Abwasserkanälen.	
ANMERKUNG 2 In Salzwasser sind die entsprechenden Schallgeschwindigkeiten etwa um 50 m/s höher.	

Die Schallgeschwindigkeit c in Wasser wird nach folgender Gleichung berechnet [6]:

$$c = 1\,402,4 + 5,01T - 0,055\,1\,T^2 + 0,000\,22\,T^3 + 1,33S + 0,000\,13S^2 - 0,013\,T\,S + 0,000\,1\,T^2S + 0,016d \quad (4)$$

Dabei ist

- c die Schallgeschwindigkeit in Wasser, in Meter je Sekunde;
- T die Wassertemperatur, in Grad Celsius;
- S der Salzgehalt des Wassers, in Gramm Salz je Liter Wasser;
- d die Wassertiefe, in Meter.

6.2.3 Ausbreitungsverluste

Nur ein Teil der übertragenen Schallenergie erreicht das Ziel. Der Verlust der Signalintensität wird Ausbreitungsverlust genannt und setzt sich aus dem Divergenzverlust und dem Dämpfungsverlust zusammen.

Der Divergenzverlust ist die Verringerung der Schallintensität durch die Vergrößerung der Fläche, über die sich die gegebene Schallenergie verteilt. Diese Verluste hängen von der Beziehung zwischen Weglänge sowie Durchmesser und charakteristischer Frequenz des Wandlers ab. Die Schallausbreitung erfolgt nach dem quadratischen Abstandsgesetz, das im Allgemeinen für alle Formen von Strahlungsenergie gilt. Falls jedoch Signale in Form elektrischer Spannungen gemessen werden und die Strahlungsenergie dem Quadrat der Spannung proportional ist, folgt der Divergenzverlust einem einfachen Abstandsgesetz. Dieser Effekt kann nur über kurze Weglängen bis etwa 20 m in sauberem Wasser beobachtet werden. Bei längeren Weglängen beginnen sich Dämpfungsverluste durch Absorption und Streuung auszuwirken.

Absorption ist der Vorgang, bei dem Schallenergie in Reibungswärme zwischen den Wassermolekülen umgewandelt wird, wenn eine Schallwelle wiederholten Kompressionen und Expansionen des Mediums ausgesetzt wird. Im Allgemeinen ist dieser Verlust eine Funktion der ins Quadrat erhobenen Frequenz.

Streuung ist die Änderung der Richtung, in der sich die Schallenergie ausbreitet und die durch Reflexionen an zahlreichen Inhomogenitäten im Wasser verursacht wird, z. B. an Mikroluftblasen und Schwebstoffteilchen. Diese Inhomogenitäten führen zu Veränderungen der spezifischen Schallimpedanz und bewirken, dass das Signal reflektiert und gestreut wird. Die Wirkung ist bei höheren Frequenzen des Wandlers größer.

Verluste durch Absorption und Streuung steigen exponential mit zunehmender Weglänge. Das bedeutet, dass, wenn die Schwebstofffracht im Abwasser so hoch ist, dass sie bei der Ausbreitung des Signals in einem Meter Wasser zum Verlust der Hälfte der Signalenergie führt, sich das Signal beim Durchlaufen eines weiteren Meters Wasser erneut halbiert. Bei einer Weglänge von 20 m würde sich das Signal auf ein Millionstel des für sauberes Wasser erwarteten Wertes verringern.

Bei einer Weglänge von 5 m in einem Abwasserkanal wäre eine Signalabminderung mit einem Faktor von 30 (ein Faktor von etwa 5,5 bei der Spannung) zulässig, bei einer Weglänge von 20 m ist es jedoch unwahrscheinlich, dass ein Signal wahrgenommen werden kann.

Aus diesem Grund werden für längere Wege Wandler mit geringerer Frequenz verwendet. Der Bereich der Werte der Wandlerfrequenz f für eine vorgegebene Weglänge L ist in Bild 2 dargestellt.

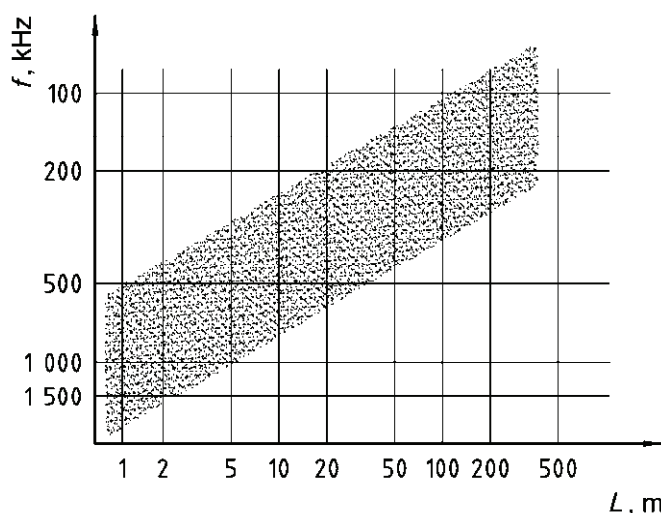


Bild 2 — Üblicherweise angewendete Wandlerfrequenzen für unterschiedliche Weglängen

6.2.4 Krümmung der Messstrecke

6.2.4.1 Ein Schallimpuls wird von seinem Weg abgelenkt, wenn Temperatur oder Salzgehalt des Wassers, in dem sich der Impuls ausbreitet, merklich schwankt. In langsam strömenden Flüssen mit geringer vertikaler Durchmischung kann durch die Wirkung von Sonneneinstrahlung auf die Oberfläche ein Temperaturgradient mit vertikaler Verteilung auftreten. Dadurch wird der Schallimpuls in Richtung zur Sohle des Flusses abgelenkt.

Die Schallwelle breitet sich quer zum Gerinne in Form eines Kegels aus. Wenn ein vertikaler Temperaturgradient vorliegt, erreicht nur der Strahl das andere Ende der Messstrecke, der in einer bestimmten Richtung nach oben beginnt. Bei einem Temperaturgradienten von 0,5 °C je Meter Tiefe beträgt die vertikale Ablenkung D_r (wie in Bild 3 festgelegt) über eine Weglänge von 50 m etwa 0,5 m. Im Gegensatz dazu hat ein vertikaler Dichtegradient (der z. B. mit der Einbringung von Salzwasser in den Messbereich verbunden sein kann) die Wirkung, dass der Schallimpuls in Richtung zur Oberfläche abgelenkt wird.

Ähnliche Wirkungen können durch Temperatur- oder Dichtegradienten mit horizontaler Verteilung erzeugt werden, wie z. B. im Fall der Teilbeschattung einer der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Wasseroberfläche, oder die z. B. am Zusammenfluss, an dem ein Nebenfluss mit Wasser mit anderen Eigenschaften einmündet, auftreten können.

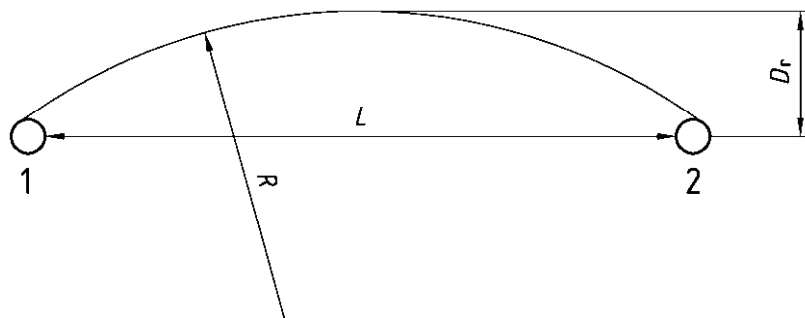
6.2.4.2 Der ungefähre Grad der Krümmung des Schallimpulses ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$R = c_1 (d_2 - d_1) / (c_1 - c_2) \quad (5)$$

Dabei ist

R der Radius der Krümmung des Ultraschallweges, in Meter (siehe Bild 3);

c_1, c_2 die Geschwindigkeit des Schalls in der Tiefe d_1 bzw. d_2 , in Meter je Sekunde [die nach Gleichung (4) berechnet werden kann].



Legende

- 1 Wandler
- 2 Wandler

D_r Ablenkung des Ultraschallweges

L Weglänge

R Radius der Krümmung des Ultraschallweges

Bild 3 — Signalkrümmung als Ergebnis eines vertikalen Temperaturgradienten

Die Ablenkung D_r des Ultraschallweges von einer geraden Linie ist durch folgende Gleichung gegeben

$$D_r = R - \sqrt{R^2 - 0,25 L^2} \quad (6)$$

Dabei ist

L die Weglänge, in Meter.

6.2.5 Reflexion

6.2.5.1 Schall wird an der Wasseroberfläche und in geringerem Umfang auch an der Gerinnesohle reflektiert. Die Sohle des Gerinnes ist gewöhnlich nur schallschluckend. Bei Ausbreitung einer Schallwelle quer über ein Gerinne (im Allgemeinen erfolgt die Ausbreitung in Form eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von 5°) schneidet ein Teil von ihr die Wasseroberfläche und wird unter einer Phasenänderung von 180° reflektiert. Die Sekundärwelle breitet sich quer über das Gerinne aus und erreicht das gegenüberliegende Ufer. Am Ziel-Wandler trifft sie später als die direkte Schallwelle ein, und die Laufzeitdifferenz ergibt sich als Funktion der Differenz der jeweiligen Längen für den direkten und den indirekten Weg.

Fehler bei der Zeitsteuerung der Signale treten auf, wenn das Sekundärsignal mit dem ersten Zyklus des direkten Signals interferiert. Um diesen Effekt zu verhindern, sollte die Differenz zwischen den beiden Weglängen größer sein als eine Schallwellenlänge (Schallgeschwindigkeit/Frequenz). Dazu muss über dem Schallweg eine Wassersäule vorhanden sein, die größer ist als die durch Gleichung (7) angegebene Mindestwassertiefe:

$$D_{\min} = 27 \sqrt{\frac{L}{f}} \quad (7)$$

Dabei ist

$D_{\min}$ die Mindestwassertiefe über dem Weg und auch der Mindestabstand zwischen der Sohle und dem Weg, in Meter;

L die Weglänge, in Meter;

f die Frequenz des Wandlers, in Hertz.

6.2.5.2 Die Mindestwassertiefe über dem Weg für unterschiedliche Frequenzen des Wandlers und Weglängen ist in Tabelle 3 angeführt.

Tabelle 3 — Beispiele für den Mindestabstand für unterschiedliche Frequenzen des Wandlers und Weglängen

Weglänge L m	Frequenz des Wandlers f kHz	Mindesttiefe $D_{\min}$ m
1	1.500	0,02
1	1.000	0,03
1	500	0,04
3	1.000	0,045
3	500	0,065
10	500	0,12
10	200	0,19
30	500	0,21
30	200	0,33
50	500	0,27
50	200	0,43
100	200	0,60
100	100	0,90

6.2.5.3 Eine ähnliche Einschränkung kann für die Gerinnesohle und besonders für eine glatte Sohle gelten, die ein Schallsignal eher reflektiert als absorbiert. Von der Sohle reflektierte Signale unterliegen keiner Phasenverschiebung.

7 Anordnung der Messgeräte

7.1 Allgemeines

7.1.1 Durchflussmessstationen, bei denen das Ultraschallverfahren angewendet wird, können auf verschiedene Weise angeordnet werden, wobei Folgendes zu beachten ist

- a) die örtlichen Gegebenheiten des jeweiligen Standorts;
- b) die geforderte Messunsicherheit und Betriebssicherheit;
- c) der Bereich von Durchflusswerten, für den zuverlässige Daten erforderlich sind;
- d) die für den Anwender verfügbaren Betriebsmittel zur Aufrechterhaltung des betriebssicheren Zustandes des Messgerätes.

7.1.2 Die Anzahl der Tiefenmessfühler, die Anzahl der Wege, der vertikale Abstand, der Winkel zur Strömung, die Anwendung der geradlinigen, Kreuzstrahl- oder Reflexionsstrahlanordnungen können festgelegt werden.

Die Wassertiefe ist entweder mit einem oder mehreren der in ISO 4373 festgelegten Geräte oder mit nach oben gerichteten Ultraschallgeräten zu messen, die in das elektronische System des Durchflussmessgerätes eingebaut sind. Ein Fehler bei der Bestimmung der Tiefe nach diesem Verfahren tritt auf, wenn zwischen der mittleren Temperatur des Flusses und der Temperatur an der Stelle, an der der Ultraschall-Tiefenmessfühler angebracht ist, ein Unterschied vorhanden ist. Ein Temperaturunterschied von 5 °C verursacht einen Fehler von etwa 1 %, in Abhängigkeit von der Versetzung zwischen dem Wandler und der Sohle. Der mit Planung und Aufbau des Systems beauftragte Techniker sollte sich der Möglichkeit des Auftretens einer derartigen Wirkung bewusst sein und sie in den Schätzwert der Messunsicherheit einschließen oder, im Extremfall, ein anderes Verfahren zur Tiefenbestimmung auswählen. Der mit Planung und Aufbau des Systems beauftragte Techniker sollte sich auch bewusst sein, dass im Fall des Vorliegens derartiger Temperaturunterschiede im Fluss das Auftreten einer starken Krümmung des Wellenbündels wahrscheinlich ist und das Ultraschallverfahren für die Durchflussmessung ohnehin ungeeignet sein kann (siehe 6.2.4).

Es sollte betont werden, dass ein geeigneter Standort von größter Wichtigkeit ist (siehe Abschnitt 10). Obwohl die Wirkungen einiger unerwünschter Standortmerkmale durch den Einbau eines technisch stärker ausgeprägten Systems verringert werden können, wird eine überlegene Leistung bei geringeren Gerätekosten an einem besseren Standort erreicht. Es ist zu bedenken, dass der mit Planung und Aufbau des Systems beauftragte Techniker oft die vorliegenden Standortmerkmale akzeptieren muss, diese können jedoch letzten Endes die erreichbare Leistung begrenzen, sowohl in Bezug auf Messunsicherheit als auch auf die Zuverlässigkeit unter ungünstigen Bedingungen.

7.2 Einstreckenanlagen

7.2.1 In seiner einfachsten Form kann das Ultraschallmessgerät mit nur einem Wandlerpaar ausgerüstet sein und eine zufrieden stellende Bestimmung nur einer einzigen „Liniengeschwindigkeit“ ermöglichen. Dieses eine Wandlerpaar braucht nicht unbedingt horizontal befestigt zu werden.

Unter der Voraussetzung, dass zwischen dieser Erfassung und der mittleren Fließgeschwindigkeit im erfassten Querschnitt ein Verhältnis hergestellt werden kann, kann der Durchfluss errechnet werden. Die Unsicherheit der Durchflussbestimmungen ist jedoch zwangsläufig größer als die Unsicherheit der Verfahren, die bei der Kalibrierung des Geschwindigkeitsverhältnisses angewendet werden. Die Kosten der Kalibrierung, die die Durchflussbestimmungen nach einem alternativen Verfahren bei unterschiedlichen Strömungen und zu unterschiedlichen Jahreszeiten einschließen, können hoch sein.

Wenn das Verhältnis unter Anwendung der mittleren Werte des Geschwindigkeitskoeffizienten (Durchflusskoeffizient) C_v aus Tabelle 4 (siehe 9.2) abgeschätzt wird, kann gewöhnlich eine Unsicherheit von 15 % erwartet werden. Unter bestimmten Umständen kann eine Einstrecken-Anordnung eine viel bessere Messunsicherheit haben. Diese Umstände sind

- a) der Bereich der Tiefe ist auf d/D zwischen 0,4 und 0,7 begrenzt;
- b) das Geschwindigkeitsprofil kann quantitativ bestimmt werden;
- c) das Geschwindigkeitsprofil ändert sich bei Wasserstands- oder Strömungsänderungen nicht wesentlich.

7.2.2 Die Befestigungen für die Wandler dürfen so konstruiert sein, dass sie in der vertikalen Ebene beweglich sind. Dadurch kann, wenn das Messgerät ähnlich wie ein Fließgeschwindigkeitsmessgerät mit Flügelrad angewendet wird, ein vertikales Geschwindigkeitsprofil bestimmt werden. Zu betrieblichen Zwecken dürfen die Wandler auf eine Höhenlage eingestellt werden, die möglichst genau der abgeschätzten mittleren Querschnittsgeschwindigkeit entspricht (siehe Bild 10).

7.2.3 Bei diesem Verfahren können die Einstellungen des Wandlers auch saisonbedingt verändert werden, um unterschiedliche Durchflussverhältnisse zu berücksichtigen; es kann jedoch praktische Beschränkungen für die Frequenz geben, mit der derartige Änderungen vernünftigerweise vorgenommen werden können, und demzufolge Beschränkungen hinsichtlich der allgemeinen Anwendbarkeit dieser Geräteanordnung.

7.2.4 Bei der Einstreckenmessung mit beweglichen Wandlern sollten sich die Wasserstandsbereiche an der Messstelle nur wenig oder zumindest langsam verändern. Stark unterschiedliche Wasserstände können mitunter ausgeglichen werden, wenn sie saisonbedingt auftreten, z. B. in einem Wasserlauf mit Grundwasserversorgung, in dem der Abfluss von einem Tag zum nächsten nur wenig schwankt, während sich die Durchflussverhältnisse im Winter und im Sommer beträchtlich unterscheiden können. Da die Veränderungen langsam erfolgen, können die Wandler entsprechend der Saison auf unterschiedliche Höhen eingestellt werden.

7.2.5 Die Einstreckenanlage setzt auch ein relativ beständiges Geschwindigkeitsprofil voraus, das durch Veränderungen des Verhältnisses zwischen Wasserstand und Durchfluss nicht wesentlich beeinflusst wird. An Messstellen mit signifikanter Änderung des Geschwindigkeitsprofils, hervorgerufen von Unkrautwachstum oder Ablagerung von Schluff stromaufwärts, und an Standorten mit signifikanter Stauwasserwirkung kann die Einstreckenanlage ungeeignet sein.

7.2.6 Die Einstreckenanlage ist von Natur aus anfällig gegenüber einer Beschädigung oder einem Funktionsausfall des Wandlers. Es gibt keine Redundanz durch den Einbau weiterer Bauteile (siehe 7.3.3). Das System ist jedoch einfach und kostengünstig.

7.3 Mehrebenenanlagen

7.3.1 Der Einbau eines Mehrebenen-Durchflussmesssystems ist an Messstellen notwendig, an denen

- a) es eine starke und häufige Schwankung des Wasserstandes und/oder des Durchflusses gibt;
- b) die vertikale Geschwindigkeitsverteilung merklich von der theoretischen Verteilung abweicht und sich abhängig vom saisonbedingten Unkrautwachstum ändern kann;
- c) eine signifikante Stauwasserwirkung das vertikale Geschwindigkeitsprofil beeinträchtigt.

7.3.2 Die Anzahl der möglichen Messstrecken wird durch die Montagekosten und durch die Konstruktion des Messgerätes begrenzt. Das Ziel besteht darin, eine geeignete Darstellung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils im Messquerschnitt für alle zu messenden Wasserstände oder Durchflüsse, vom höchsten bis zum niedrigsten, zu erreichen.

Die Unsicherheit bei der Durchflussbestimmung sollte nach den in Abschnitt 14 angeführten Verfahren bewertet werden. Für eine bestimmte Anordnung sollten die Berechnungen für einen Bereich von Wasserständen und Durchflüssen durchgeführt werden.

7.3.3 Wenn bei dem Verfahren außerdem eine hohe Gebrauchssicherheit (d. h. ohne betriebsbedingte Unterbrechungen oder Beeinträchtigungen) angestrebt wird, können zusätzliche „redundante“ Wege sowie Wassertiefen-Messfühler günstig sein, damit eine physikalische Beschädigung, Behinderungen oder ein Funktionsausfall auf einem oder mehreren Wegen nur eine minimale Auswirkung auf die Gesamtmessunsicherheit hat.

7.3.4 In einigen Gerinnen, besonders wenn ein Überstau möglich ist, können zum Erhalt von Daten über den gesamten Betriebsbereich Wassertiefen-Messfühler notwendig sein, bei denen unterschiedliche Techniken Anwendung finden und die für unterschiedliche Bereiche gelten. Zur Auswahl des geeignetsten Messfühlers ist ein automatisch arbeitendes Entscheidungsprogramm notwendig.

7.3.5 Mehrebenen-Messanordnungen sind auch an Standorten geeignet, bei denen die Strömung in mehrere Gerinne aufgeteilt wird und bei denen sich der Querschnitt des Gerinnes in Abhängigkeit von der Tiefe auf komplizierte Art ändert. Das ist insbesondere bei Gerinnen mit Überstau oder bei Lage des Durchflussmessquerschnittes unter einer Brücke der Fall.