

Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen

IMPRESSUM

Anschrift

Quantum Hydrometrie GmbH
Geneststr. 5
10829 Berlin
Telefon: 030 / 69 81 10 – 0
Fax: 030 / 69 81 10 - 99
E-Mail: info@quantum-hydrometrie.de
Internet: <http://www.quantum-hydrometrie.de>

Stand

Juli 2011

INHALTSVERZEICHNIS

1	Vorbemerkung und Veranlassung	3
2	Anwendungsbereich	4
3	Theoretische Grundlagen	5
3.1	Übersicht der Messprinzipien	5
3.2	Sing-around-Prinzip	5
3.3	Ultraschall-dopplerprinzip	5
3.4	Laufzeitprinzip	6
3.5	Die Laufzeitmessung	6
3.6	Möglichkeiten der Anlagenkonfiguration	7
3.6.1	Einstreckenanlage	7
3.6.2	Kreuzstreckenanlage	7
3.6.3	Responderanlage	8
3.6.4	Reflektoranlage	8
3.6.5	Mehrebenenanlage	8
3.7	Berechnung der resultierenden Geschwindigkeit im Messpfad	9
3.7.1	Einstreckenanlage	9
3.7.2	Kreuzstreckenanlage	9
3.7.3	Responderanlage	10
3.7.4	Reflektoranlage	12
3.8	Durchflussberechnung	12
3.8.1	Einebenenanlage	12
3.8.2	Mehrebenenanlage	13
3.9	Kalibrierung	14
3.9.1	Geschwindigkeitskoeffizient k_1	14
3.9.1.1	Empirisch	14
3.9.1.2	Logarithmische Geschwindigkeitsverteilung	15
3.9.1.3	Hydronumerische Modellierung	15
3.9.2	Kalibrierfaktor k_2	16
3.10	Unsicherheiten bei der Messung der physikalischen Größe	17
3.10.1	Schwebstoffe	17
3.10.2	Luftblasen	18
3.10.3	Temperatur und Salzgehalt	18

2	Leitfaden für den Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen	© LfU
3.11	Fehlerbetrachtung	20
3.11.1	Zufällige Fehler	20
3.11.2	Systematische Fehler	21
4	Umweltverträglichkeit	22
5	Messstellenevaluierung / Standortwahl	23
5.1	Hydraulische Bedingungen	23
5.2	Morphologische Bedingungen	23
5.3	Physikalische Bedingungen	24
5.4	Praktische und logistische Bedingungen	24
5.5	Anlagenkonfiguration	25
6	Planung und Bau	27
6.1	Bauplanung	27
6.2	Bauausführung	27
6.3	Bauabnahme und Gewährleistung	28
7	Betrieb und Wartung von Ultraschallmesssystemen	29
7.1	Wandler	29
7.2	Signalkabel	29
7.3	Messelektronik	29
7.4	Messschrank	29
7.5	Software	29
7.6	Gewässerpflege	30
8	Arbeitsschutzvorschriften	31
9	Literatur	32

1 Vorbemerkung und Veranlassung

Ultraschall-Durchflussmessanlagen finden zunehmend Anwendung bei der Ermittlung von Durchflüssen oberirdischer Gewässer. Sie ergänzen oder ersetzen hierbei herkömmliche Pegelanlagen, bei denen die Durchflüsse aus gemessenen Wasserständen anhand einer Wasserstands-Durchfluss-Beziehung ermittelt werden. Der sich abzeichnende routinemäßige Einsatz dieses Messverfahrens im gewässerkundlichen Messnetz des Landes Baden-Württemberg macht es notwendig, den Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen in einer Arbeitsanleitung zu beschreiben.

Die vorliegende Schrift führt die Reihe der Arbeitsanleitungen für den Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg fort. Dabei nennt sie nicht nur die bei der Planung von Ultraschall-Durchflussmessanlagen zu beachtenden Grundsätze und die beim Betrieb erforderlichen Aufgaben und Tätigkeiten, sondern geht stärker, als dies bei den anderen Arbeitsanleitungen der Fall ist, auch auf die physikalischen Grundlagen und Prinzipien dieses Messverfahrens ein. Derartige theoretische Kenntnisse sind sowohl bei der Planung und Unterhaltung von Ultraschall-Durchflussmessanlagen als auch bei der Datenprüfung notwendig. Darüber hinaus sollen sie dazu dienen, das Verständnis für die Aufgaben beim Betreiben derartiger Anlagen zu wecken.

2 Anwendungsbereich

Der Durchfluss ist eine wichtige gewässerkundliche und hydrologische Messgröße für z.B.:

- die zweckmäßige Bewirtschaftung des Wasserdargebotes
- den Hochwasserschutz
- die Bemessung und den Betrieb wasserwirtschaftlicher Anlagen (z.B. Wehre, Schleusen, Pumpwerke, Heberanlagen, Talsperren etc.)
- die Kalibrierung und Validierung hydraulischer / hydrologischer Modellrechnungen
- die Erstellung gewässerkundlicher Statistiken, Jahrbücher, Gutachten etc.
- die Erteilung wasserrechtlicher Genehmigungen.

Es gibt verschiedene Methoden, die Fließgeschwindigkeit in einem Messquerschnitt zu erfassen und damit den Durchfluss zu bestimmen. Lag bisher der Schwerpunkt in der Fließgeschwindigkeitsmessung bei mechanisch arbeitenden Geräten, so hat sich auf Grund der Entwicklung in der modernen Elektronik ein Trend zu anderen Verfahren wie z.B. der Messung mit Hilfe von Ultraschall verbreitet.

Als traditionelles und bewährtes Verfahren zur Messung der Fließgeschwindigkeiten werden Messflügel benutzt, deren Umdrehungszahl ein Maß für die Fließgeschwindigkeit darstellt. Durchflussmessungen mittels Messflügel sind jedoch besonders bei größeren Gewässern sehr zeit- und kostenaufwendig. Eine kontinuierliche Durchflussermittlung ist deshalb nur bei freifließenden Gewässern auf der Basis von stabilen Abflusskurven möglich, die die Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss ausdrücken.

In staugeregelten Gewässern und in Tidegewässern, wo die Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss nicht existiert, kann eine kontinuierliche Durchflussmessung auf die traditionelle Weise nicht erfolgen. Insbesondere hier

bietet sich die Messmethode mit Hilfe von Ultraschall an.

Im Gegensatz zu der Messmethode mit Flügeln bietet dieses Prinzip der Fließgeschwindigkeitsmessung die Möglichkeit, kontinuierlich und vollautomatisch über lange Zeiträume ohne Personaleinsatz zu messen. Ein weiterer Vorteil besteht bei diesem Verfahren darin, dass die Strömung in keiner Weise beeinflusst wird.



Bild 1: Ultraschall-Durchflussmessanlage in einem Fließgewässer

Der vorliegende Leitfaden beschränkt sich im weiteren auf die Darlegung der Durchflussmessung mit Ultraschallanlagen bei freiem Wasserstand also für die Einsatzbereiche in natürlichen Fließgewässern, Kanälen oder Flussmündungen (Ästuarien).

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Übersicht der Messprinzipien

Das Ultraschall-Durchflussmessverfahren ist ein indirektes Messverfahren, d.h. der Durchfluss wird auf der Grundlage der Kontinuitätsgleichung aus einer Geschwindigkeitsmessung und einer dem Wasserstand zugeordneten Fließfläche berechnet.

Für die Messung der Geschwindigkeit mit Ultraschall kommen in der Praxis im wesentlichen drei Verfahren zur Anwendung:

- Sing-around-Verfahren
- Ultraschall-Dopplermessung
- Ultraschall-Laufzeitmessung

3.2 Sing-around-Prinzip

Ein von einem Sender erzeugter kurzer Ultraschallimpuls durchläuft eine definierte Messstrecke und löst beim Empfang mit Hilfe einer Rückführelektronik einen neuen Sendeimpuls aus (Bild 2).

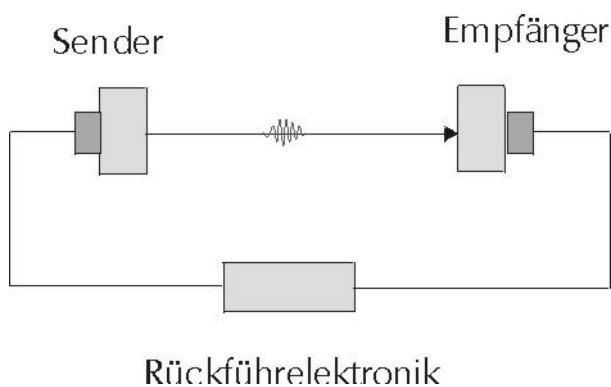


Bild 2: Prinzipskizze eines akustischen Sing-around-Kreises

Es ist somit möglich, Schallimpulse innerhalb kurzer Messstrecken über beliebig lange Zeiträume „einzufangen“ und zu „beobachten“. Zählt man die Anzahl der Umläufe in einem festgelegten Zeitraum, so erhält man die sogenannte Sing-around-Frequenz, welche ein Maß der Schallgeschwindigkeit und damit auch der Strömungsgeschwindigkeit ist.

Das Sing-around-Prinzip wird vorrangig in Sensoren zur punktuellen Geschwindigkeitsmessung angewendet.

3.3 Ultraschall-Dopplerprinzip

Beim Ultraschall-Dopplerprinzip wird die schallreflektierende Eigenschaft der im Wasser befindlichen Partikel ausgenutzt. Dabei wird postuliert, daß sich die Teilchen im Mittel wie die tragende Strömung bewegen. Der Ultraschallwandler empfängt die reflektierten Schallwellen bewegter Teilchen mit einer anderen Frequenz, als er sie ausgesandt hat (Bild 3)

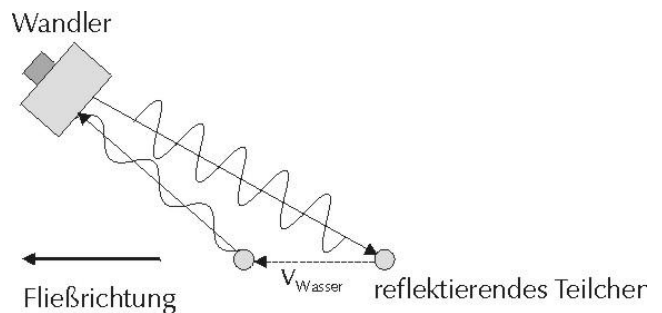


Bild 3: Prinzip der Dopplermessung

Die **Frequenzverschiebung** wird als Dopplerverschiebung bezeichnet und ist **proportional zur Geschwindigkeit** des reflektierenden Partikels. Außer der Frequenzverschiebung läßt sich die Zeit messen, die ein Signal benötigt, um zum Sender zurückzukehren. Aus dieser Zeit kann die Entfernung des Partikels bestimmt werden, womit letztlich auch die Bestimmung von Geschwindigkeitsverteilungen entlang einer Messlinie möglich wird.

Das Dopplerprinzip kommt in der Praxis z.B. in folgenden Bereichen zur Anwendung:

- ADCP-Messgeräte zur Durchflussmessung in Flüssen und Kanälen
- ADCP-Messgeräte für die Strömungsmessung in der Ozeanographie
- Ultraschall-Dopplersonden für die Durchflussmessung in Abwasserkanälen und kleinen Gerinnen

3.4 Laufzeitprinzip

Das Messprinzip beruht auf der direkten Messung der **Laufzeit** eines akustischen Signals zwischen zwei Ultraschallköpfen, den sogenannten hydroakustischen Wandlern.

Eine Schallwelle, die sich in einem Gewässer entgegen der Fließrichtung bewegt, benötigt eine längere Laufzeit als eine Schallwelle, die mit der Fließrichtung wandert.

Die Differenz der Laufzeiten ist direkt proportional zur **Fließgeschwindigkeit** im Messpfad und damit bei bekannter Querschnitts- und Strömungsgeometrie proportional zum **Durchfluss**.

Bei Fließquerschnitten mit freiem Wasserspiegel (Gerinneströmung) ist die durchströmte Querschnittsfläche vom Wasserstand abhängig, so dass zur Ermittlung der Querschnittsgeometrie immer auch der **Wasserstand** gemessen werden muss.

Bezüglich der Strömungsgeometrie sind geeignete Annahmen zu treffen, deren Gültigkeit durch Kalibriermessungen bestätigt werden müssen (siehe Kapitel 3.9).

Die Laufzeitmessung wird technisch mit unterschiedlichen Verfahren realisiert. Genannt seien hier das **Frequenzbandverfahren** und das **Impulsverfahren**. Beim Frequenzbandverfahren wird eine definierte Frequenzfolge in das Gewässer abgegeben und dessen Laufzeit vom Sender zum Empfänger gemessen. Beim Impulsverfahren wird die Laufzeit eines kurzzeitigen Schallimpulses mit einer definierten Frequenz gemessen.

Das Prinzip der Laufzeitmessung mit dem Impulsverfahren hat im Bereich der kontinuierlichen Ultraschalldurchflussmessung in Flüssen und Kanälen traditionell eine weitverbreitete Anwendung gefunden, weshalb sich die Ausführungen der folgenden Kapitel auf dieses Prinzip beschränken sollen.

3.5 Die Laufzeitmessung

Zur Laufzeitbestimmung erhält der hydroakustische Wandler einen Spannungsimpuls in Form eines Rechteck- oder Sinussignals, das vom Wandler in ein akustisches Wellenpaket umgewandelt wird. Die Laufzeit dieses Wellenpakets im Gewässer wird gemessen (Bild 4).

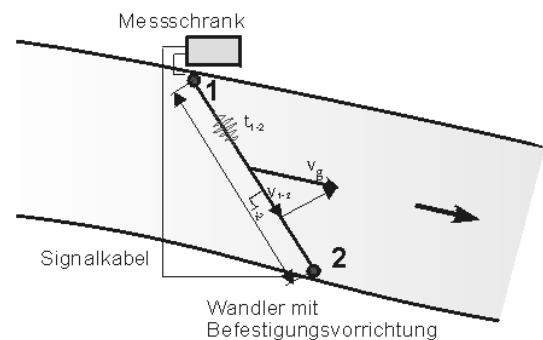


Bild 4 Prinzipskizze Laufzeitmessung

Die Laufzeiten t_{1-2} und t_{2-1} werden heute im allgemeinen durch die **direkte** Laufzeitmessung ermittelt, wobei je nach Hersteller der erste Nulldurchgang des Empfangssignals analog oder mit Hilfe einer digitalen Signalerkennung bestimmt wird.

Die Laufzeit in Fließrichtung wird berechnet mit

$$t_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{c + v_{1-2}} \quad (1)$$

und die Laufzeit t_{2-1} entgegen der Fließrichtung mit

$$t_{2-1} = \frac{L_{1-2}}{c - v_{1-2}} \quad (2)$$

wobei

- L_{1-2} Länge des akustischen Messpfades zwischen den Wandlern 1 und 2
- c Schallgeschwindigkeit im Wasser
- v_{1-2} Mittelwert der zwischen den Wandlern 1 und 2 vorhandenen lokalen Fließgeschwindigkeiten längs des akustischen Messpfades

bedeutet.

Die Laufzeitdifferenz Δt ist dann näherungsweise mit der Annahme $c \gg v$

$$\Delta t = \frac{2L_{1-2} v_{1-2}}{c^2} \quad (3)$$

Beispiel:

Die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt abhängig von Salzgehalt und Temperatur ca. 1400 bis 1500 m/s.

Bei einer Schallgeschwindigkeit von z.B. $c = 1450$ m/s, einer Pfadlänge von $L = 10$ m und einer Fließgeschwindigkeit von $v_{1-2} = 1$ mm/s (0,001 m/s) beträgt die zu messende Zeitdifferenz nur $\Delta t \cong 9,5 \times 10^{-9}$ s.

Die Zeitmessung muss also beim Laufzeitverfahren im Nanosekundenbereich erfolgen, um auch noch kleine Fließgeschwindigkeiten mit der erforderlichen Genauigkeit aufzulösen.

3.6 Möglichkeiten der Anlagenkonfiguration

Die Anordnung der Wandler hängt im Wesentlichen von den hydraulischen Verhältnissen, der Gewässergeometrie, der Infrastruktur an der jeweiligen Messstelle sowie der geforderten Messgenauigkeit ab.

3.6.1 Einstreckenanlage

Die einfachste Anordnung einer Ultraschallanlage bilden zwei sich schräg gegenüberliegende hydroakustische Wandler. Voraussetzung ist, dass die Hauptströmung parallel zu den Ufern verläuft (vgl. Kapitel 4).

Diese Voraussetzungen sind am besten in Kanälen und kanalartig ausgebauten Querschnitten von Fließgewässern gegeben.

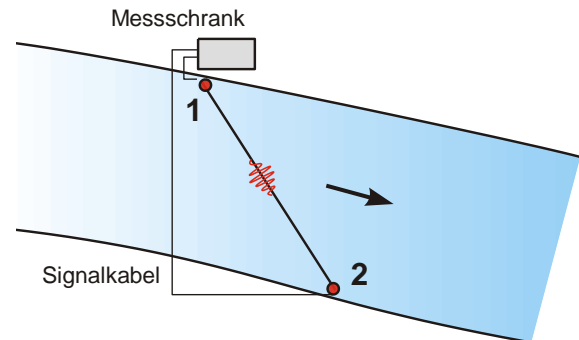


Bild 5: Einstreckenanlage

Die Wandler arbeiten als Sender und Empfänger. Die Laufrichtung des Ultraschallsignals ist abwechselnd 1-2 (in Fließrichtung) bzw. 2-1 (gegen die Fließrichtung).

3.6.2 Kreuzstreckenanlage

In natürlichen Gewässern verläuft die Hauptströmung nur selten parallel zum Ufer. Krümmungen des Gewässerverlaufs und die Querschnittsform beeinflussen die Hauptströmungsrichtung bei unterschiedlichen Wasserspiegellagen nachhaltig.

In solchen Fällen wird die Kreuzstrecken-Anordnung eingesetzt, bei der mit Hilfe des zweiten Messpfades zusätzlich der Winkel zwischen der Hauptströmungsrichtung und einem Ufer berechnet wird.

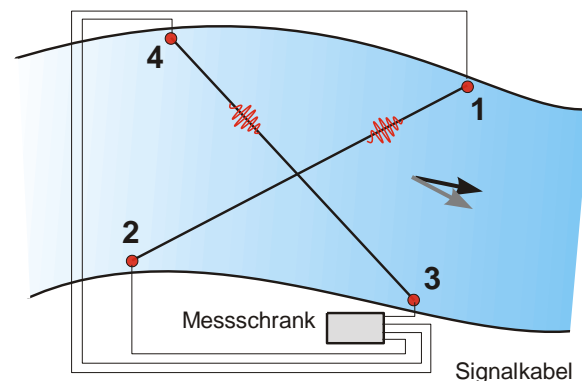


Bild 6: Kreuzstreckenanlage

Bei dieser Anordnung wird zunächst gleichzeitig die Laufzeit in den Messpfaden 1-2 und 3-4

gemessen, danach in umgekehrter Richtung die Laufzeit in den Messpfaden 2-1 und 4-3.

3.6.3 Responderanlage

Nicht immer ist eine Verlegung der die Wandler verbindenden Kabel zum gegenüberliegenden Ufer möglich. Alternativ werden dann die Wandler auf der gleichen Flussseite an das Ultraschallmessgerät angeschlossen und am anderen Ufer ein automatisch arbeitendes Antwortgerät (Responder) installiert.

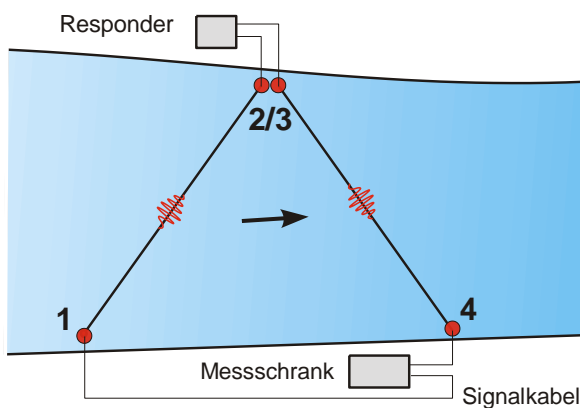


Bild 7: Responderanlage

Beim Einsatz eines Responders wird das Ultraschallsignal zunächst gegen die Fließrichtung entlang des Messpfades 4-3 gesendet. Das am Wandler 3 empfangene Signal wird an den Responder weitergeleitet, der mit minimaler elektronischer Zeitverzögerung ein entsprechendes Signal wiederum gegen die Fließrichtung entlang des Messpfades 2-1 aussendet. Die Messung der Laufzeit des Ultraschallsignals in Strömungsrichtung erfolgt umgekehrt entlang des Messpfades 1-2 nach 3-4.

Obwohl mit vier Wandlern ausgerüstet entspricht eine Responderanlage einer Einpfadanlage, da keine Informationen über die Hauptströmungsrichtung gewonnen werden.

3.6.4 Reflektoranlage

Während bei einer Responderanlage das Signal durch den Responder aktiv verstärkt wird, wird es bei einer Reflektoranlage ausschließlich

durch die sehr kleine Reflektoroberfläche reflektiert. Aufgrund der verdoppelten Pfadlänge und der daraus resultierenden Dämpfung des Signals ist das Einsatzgebiet dieses Anlagentyps auf geringe Gewässerbreiten beschränkt.

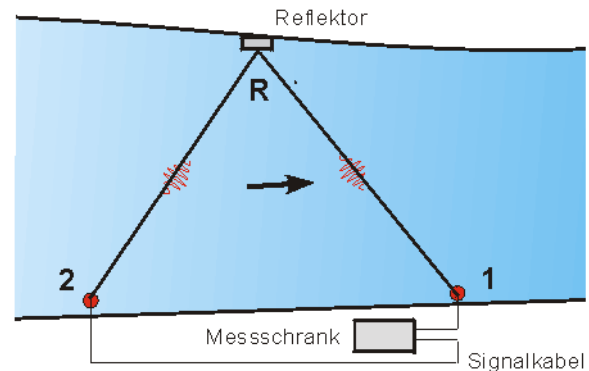


Bild 8: Reflektoranlage

3.6.5 Mehrebenenanlage

In Messquerschnitten mit extrem schwankenden Wasserständen oder ausufernden Gewässerquerschnitten (gegliederte Querschnitte) wird der Einsatz einer Mehrebenen-Anordnung empfohlen.

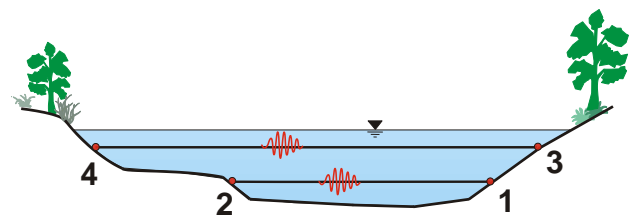


Bild 9: Mehrebenenanlage

Jede Ebene kann in Ein- oder Kreuzstreckenordnung konfiguriert werden.

Wird der gesamte Messquerschnitt mit einer ausreichenden Anzahl übereinander angeordneter Messstrecken erfasst, kann die hydrometrische Kalibrierung als Grundlage für die Durchflussermittlung entfallen, da durch die Messung in mehreren Ebenen das Strömungsprofil hinreichend bekannt ist.

Die Messgenauigkeit ist bei einer Mehrebenen-Kreuzstreckenanlage am höchsten, da bei dieser Anordnung die Unsicherheiten bezüglich der Annahmen über die Hauptströmungsrichtung und das Strömungsprofil am wenigsten Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben.

3.7 Berechnung der resultierenden Geschwindigkeit im Messpfad

3.7.1 Einstreckenanlage

Sind im einfachsten Fall einer Ultraschall-Durchflussmessung die beiden hydroakustischen Wandler 1 und 2 unter einem Winkel ϕ_{1-2} auf beiden Seiten der Strömungsbegrenzung (Ufer) wie in Bild 10 skizziert angeordnet, so berechnet sich aus den beiden Messgrößen t_{1-2} , siehe Gleichung (1), und t_{2-1} , siehe Gleichung (2), die Fließgeschwindigkeitskomponente v_{1-2} in Richtung des Messpfades zu:

$$v_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{2} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) = \frac{L_{1-2}}{2} \left(\frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right) \quad (4)$$

Wenn beide Gleichungen bezüglich der Schallgeschwindigkeit gleichgesetzt werden. Dies trifft nur dann zu, wenn gleichzeitig gesendet wird.

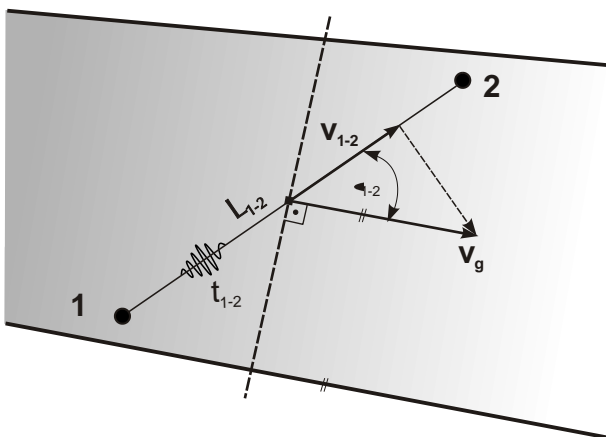


Bild 10: Skizze zur Geschwindigkeitsberechnung bei einer Einstreckenanlage

Ist der Winkel zwischen Messpfad und Strömungsrichtung wie vorausgesetzt bekannt, so wird aus der geometrischen Beziehung

$$v_g = \frac{v_{1-2}}{\cos \phi_{1-2}} \quad (5)$$

mit:

ϕ_{1-2} Winkel zwischen Messpfad und Strömungsrichtung,

ein Ausdruck für die Fließgeschwindigkeit v_g senkrecht zum Messquerschnitt erhalten, der neben den gemessenen Laufzeiten nur noch geometrische Größen enthält:

$$v_g = \frac{L_{1-2}}{2 \cos \phi_{1-2}} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) \quad (6)$$

3.7.2 Kreuzstreckenanlage

Die Durchflussberechnung bei einer Einpfad-Anlage setzt voraus, dass die Strömungsrichtung und damit der Winkel ϕ_{1-2} bekannt ist. Bei der Anordnung von zwei Messpfaden entsprechend Bild 11 kann der tatsächliche Strömungswinkel aus der zusätzlichen Information des zweiten Messpfades berechnet werden.

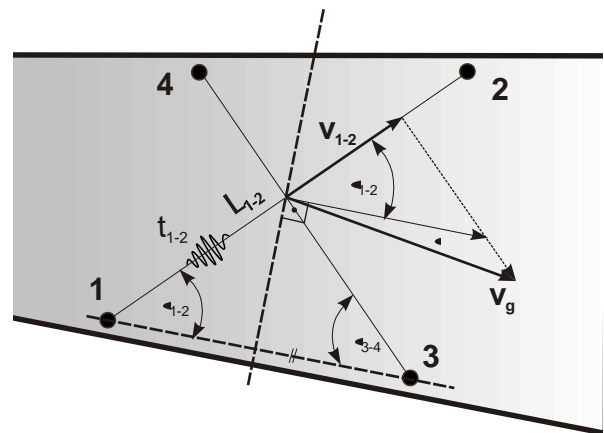


Bild 11: Skizze zur Geschwindigkeitsberechnung bei einer Kreuzstreckenanlage

Die gemessene Fließgeschwindigkeit v_g berechnet sich entsprechend Gleichung (6) zu:

$$v_{g,1-2} = \frac{L_{1-2}}{2 \cos(\phi_{1-2} + \alpha)} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) \quad (7)$$

bzw.:

$$v_{g,3-4} = \frac{L_{3-4}}{2 \cos(\phi_{3-4} - \alpha)} \left(\frac{1}{t_{3-4}} - \frac{1}{t_{4-3}} \right) \quad (8)$$

mit:

- α Winkel zwischen der Normalen des Messquerschnitts und der tatsächlichen Strömungsrichtung

Der Winkel α lässt sich nun unter der Annahme, dass die beiden Fließgeschwindigkeiten gleich groß sind, d.h.:

$$v_{g,1-2} = v_{g,3-4} \quad (9)$$

analytisch berechnen. Mit dieser Annahme folgt aus Gleichung (7) und (8):

$$\frac{L_{1-2}}{2 \cos(\phi_{1-2} + \alpha)} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) = \frac{L_{3-4}}{2 \cos(\phi_{3-4} - \alpha)} \left(\frac{1}{t_{3-4}} - \frac{1}{t_{4-3}} \right) \quad (10)$$

bzw. mit der Pfadgeschwindigkeit v_{1-2} nach Gleichung (4)

$$\frac{v_{1-2}}{\cos(\phi_{1-2} + \alpha)} = \frac{v_{3-4}}{\cos(\phi_{3-4} - \alpha)} \quad (11)$$

Wird diese nach dem gesuchten Winkel α aufgelöst, so folgt:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{v_{3-4} \cos \phi_{1-2} - v_{1-2} \cos \phi_{3-4}}{v_{3-4} \sin \phi_{1-2} + v_{1-2} \sin \phi_{3-4}} \right) \quad (12)$$

3.7.3 Responderanlage

Beim Responder setzt sich die gemessene Laufzeit aus drei Teilzeiten zusammen:

$$t_{1-4} = t_{1-2R} + t_0 + t_{3R-4}, \quad (13)$$

mit:

- t_{1-2R} Laufzeit zwischen den Wandlern 1 und 2R
 t_{3R-4} Laufzeit zwischen den Wandlern 4 und 3R
 t_0 Systemlaufzeit

wobei die Systemlaufzeit t_0 die Zeit zwischen Signaleingangs- und -ausgang im Responder sowie die Laufzeit in den Kabellängen auf der Responderseite berücksichtigt.

In entgegengesetzter Richtung ergibt sich entsprechend:

$$t_{4-1} = t_{4-3R} + t_0 + t_{2R-1}, \quad (14)$$

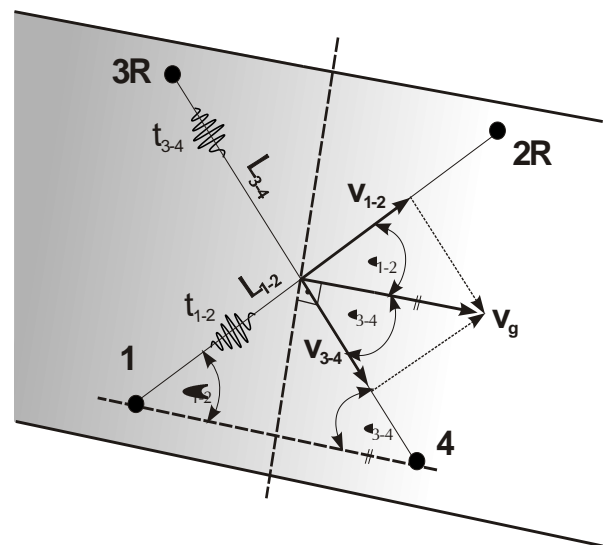


Bild 12: Skizze zur Geschwindigkeitsberechnung bei einer Responderanlage

Für die weitere Ableitung zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit v_g muss die weitreichende Annahme gleicher Laufzeiten zwischen den beiden Wandlerpaaren getroffen werden, d.h.:

$$t_{2R-1} = t_{4-3R} \text{ (gegen die Fließrichtung)} \quad (15)$$

bzw.

$$t_{1-2R} = t_{3R-4} \quad (\text{in Fließrichtung}) \quad (16)$$

Damit folgt dann aus Gleichung (13) bzw. Gleichung (14) für die Laufzeit im Messpfad zwischen zwei Wandlern:

$$2 \cdot t_{1-2R} = t_{1-4} - t_0 \quad \text{bzw.} \quad 2 \cdot t_{2R-1} = t_{4-1} - t_0 \quad (17)$$

mit:

t_0 Summe der Laufzeitverzögerung

Eingesetzt in Gleichung (6) erhält man als Bestimmungsgleichung für die Einpfad-Anlage die Fließgeschwindigkeit v_g senkrecht zum Messquerschnitt mit:

$$\begin{aligned} v_g &= \frac{L_{1-2}}{2 \cos \phi_{1-2}} \left(\frac{2}{t_{1-4} - t_0} - \frac{2}{t_{4-1} - t_0} \right) \\ &= \frac{L_{1-2}}{\cos \phi_{1-2}} \left(\frac{1}{t_{1-4} - t_0} - \frac{1}{t_{4-1} - t_0} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

ergibt.

Das gleiche Ergebnis muss natürlich auch bei einem Vertauschen der Indizes für den zweiten Messpfad erhalten werden:

$$v_g = \frac{L_{3-4}}{\cos \phi_{3-4}} \left(\frac{1}{t_{4-1} - t_0} - \frac{1}{t_{1-4} - t_0} \right) \quad (19)$$

Aus beiden Gleichungen folgt zusammen mit der Annahme gleicher Laufzeiten:

$$\frac{L_{1-2R}}{\cos \phi_{1-2}} = \frac{L_{3R-4}}{\cos \phi_{3-4}} \quad (20)$$

Geometrisch entspricht dies der Forderung nach gleich großen Basislängen L_{1-2} und L_{1-3} auf beiden Uferseiten.

Die Annahme gleicher Laufzeiten t_{1-2R} und t_{3R-4} lässt sich geometrisch mit Hilfe der Beziehung:

$$t_{1-2R} = \frac{L_{1-2R}}{c + \bar{v}_{1-2}} \quad \text{bzw.} \quad t_{3R-4} = \frac{L_{3R-4}}{c + \bar{v}_{3-4}} \quad (21)$$

interpretieren, wonach gelten muss:

$$\frac{L_{1-2R}}{c + \bar{v}_{1-2}} = \frac{L_{3R-4}}{c + \bar{v}_{3-4}} \quad (22)$$

Da $c \gg v_{1-2}$ bzw. v_{3-4} ist dies nur für den Fall gleicher Pfadlängen möglich, d.h.

$$L_{1-2R} = L_{3R-4} \quad (23)$$

Zusammen mit der Forderung gleich großer Basisbreiten, folgt daraus auch die Forderung nach gleich großen Pfadwinkel, d.h.

$$\phi_{1-2} = \phi_{3-4} \quad (24)$$

Da sich dies aufgrund der örtlichen Gegebenheiten beim Einbau der Anlage selten exakt realisieren lässt, ist die Fließgeschwindigkeit v_g am genauesten aus dem geometrischen Mittel zu berechnen, d.h. mit

$$L = \frac{L_{1-2R} + L_{3R-4}}{2} \quad (25)$$

und

$$\phi = \frac{\phi_{1-2} + \phi_{3-4}}{2} \quad (26)$$

gilt dann:

$$v_g = \frac{L}{\cos \phi} \left(\frac{1}{t_{1-4} - t_0} - \frac{1}{t_{4-1} - t_0} \right) \quad (27)$$

mit:

L mittlere Pfadlänge zwischen zwei Wandlern

ϕ mittlerer Pfadwinkel

3.7.4 Reflektoranlage

Bei einer Reflektoranlage lautet die entsprechende Gleichung:

$$v_g = \frac{L_{1-R-2}}{2L'} \left(\frac{1}{t_{1-R-2}} - \frac{1}{t_{2-R-1}} \right) \quad (28)$$

mit:

L_{1-R-2} Länge des akustischen Messpfades zwischen den Wandlern 1 und 2

L' Länge der Basis zwischen den beiden Wandlerköpfen

t_{1-R-2} Laufzeit in Fließrichtung

t_{2-R-1} Laufzeit gegen die Fließrichtung

3.8 Durchflussberechnung

3.8.1 Einebenenanlage

Werden die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Anlagenkonfigurationen (Einfad-, Responder- oder Kreuzstreckenanlage) nur in einer Messebene ausgeführt, so muss zur Durchflussberechnung mit Hilfe der Kontinuitätsbedingung

$$Q = v_m A \quad (29)$$

mit:

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit

A Fläche des Fließquerschnitts

ein Geschwindigkeitskoeffizient k eingeführt werden:

$$k = \frac{v_m}{v_g}, \quad (30)$$

der den Unterschied zwischen der mittleren Geschwindigkeit v_g in der Messebene und der mittleren Geschwindigkeit v_m im Querschnitt berücksichtigt.

Der Durchfluss berechnet sich damit dann aus den gemessenen Laufzeiten zu:

$$Q = k \cdot A \cdot v_g = k \cdot A \frac{L_{1-2}}{2 \cos \phi_{1-2}} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) \quad (31)$$

Um so idealer die Strömung (Verhalten und Geometrie), um so eher lassen sich theoretische Ableitungen für den Geschwindigkeitskoeffizienten k angeben.

In der Regel wird die Strömung jedoch an jeder Messstelle mehr oder weniger von den theoretischen Annahmen abweichen, d.h. die Durchflussberechnung muss mit Hilfe von Vergleichsmessungen kalibriert werden.

Bei der Gerinneströmung ist die Querschnittsfläche A eine Funktion des Wasserstands h :

$$A = f(h) \quad (32)$$

Für einfache Querschnittsformen (Rechteck, Trapez usw.) lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen Wasserstand und Querschnittsfläche explizit angeben, z.B.

$$A = b \cdot h \text{ (Rechteckquerschnitt)} \quad (33)$$

Für Querschnitte von natürlichen Gerinnen wird die Querschnittsform dagegen in der Regel aus einer Anzahl n von Profilkordinaten x_i, y_i beschrieben (n -Eck), für die die Querschnittsfläche für den jeweiligen Wasserstand nur aus der Integration über die Profilkordinaten berechnet werden kann.

Numerisch vorteilhaft ist die Berechnung nach der GAUßschen Flächenformel:

$$A = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n \left[x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i \right] \quad (34)$$

Erster und letzter Punkt des geschlossenen Polygonzuges müssen aus dem Schnittpunkt des Wasserspiegels mit den Profilkordinaten ermittelt werden.

Beispiel:

Gegeben ist einfacher Trapezquerschnitt mit den folgenden xy-Koordinaten:

Tabelle 1 Beispiel Trapezquerschnitt

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅ =P ₁
x _i	1	2	3	4	1
y _i	2	1	1	2	2

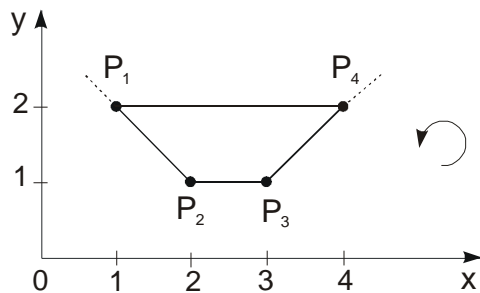


Bild 13: Skizze zur Querschnittsberechnung nach der GAUßschen Flächenformel

Die schrittweise Berechnung für i = 1 bis 4 nach Gleichung (34) liefert das Ergebnis A = 2, was bei diesem Beispiel einfacher natürlich auch mit $A = h \cdot (a+b)/2 = 1 \cdot (3+1)/2 = 2$ erhalten wird.

i=1	$1 \times 1 - 2 \times 2 =$	-3
i=2	$2 \times 1 - 3 \times 1 =$	-1
i=3	$3 \times 2 - 4 \times 1 =$	2
i=4	$4 \times 2 - 1 \times 2$	6
	$\Sigma () =$	4
	$A = 0,5 \Sigma ()$	2

Anstelle der diskreten Profilgeometrie kann der funktionale Zusammenhang auch in Form einer oder mehrerer, dann abschnittsweise gültiger Regressionsbeziehungen angegeben werden, z.B. in der Form eines in seinen Koeffizienten an das jeweilige Profil angepassten Polynom- oder Splineansatzes.

3.8.2 Mehrebenenanlage

Bei der Messung in mehreren Messpfaden, in denen jeweils die Geschwindigkeit ermittelt wird, wird die Unsicherheit bezüglich der Geschwindigkeitsverteilung mit zunehmender Anzahl der Messebenen reduziert.

Nach ISO 6416,1992 wird der Durchfluss bei mehreren parallelen Messebenen nach der Mittenmethode oder der Mittelmethode berechnet. Bei der Mittenmethode entsprechend Bild 14 wird die Pfadgeschwindigkeit als mittlere Geschwindigkeit für den Querschnittsstreifen zwischen zwei Messpfaden betrachtet. Bei der Mittelmethode wird die mittlere Geschwindigkeit aus den zwei Pfadgeschwindigkeiten berechnet und gilt für den Streifen zwischen zwei Wandlern.

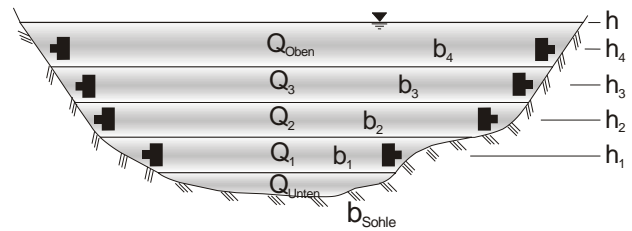


Bild 14: Skizze zur Durchflussberechnung bei einer Mehrebenenanlage (Querschnittsmittenverfahren)

Für die Berechnung des Durchflusses nach der Mittenmethode (ISO 6416,1992) gilt am Beispiel einer 4-Ebenen-Anlage :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{unten}} &= 0,8 \cdot 0,5 \cdot h_1 \cdot b_{\text{Sohle}} \cdot v_{g,1} \\
 Q_1 &= 0,5 \cdot h_2 \cdot b_1 \cdot v_{g,1} \\
 Q_2 &= 0,5 \cdot (h_3 - h_1) \cdot b_2 \cdot v_{g,2} \\
 Q_3 &= 0,5 \cdot (h_4 - h_2) \cdot b_3 \cdot v_{g,3} \\
 Q_{\text{oben}} &= 0,5 \cdot (h_4 + h_3) \cdot b_4 \cdot v_{g,4}
 \end{aligned} \tag{35}$$

mit:

- h Wassertiefe
- h_i Wassertiefe im i-ten Messpfad

b_i Querschnittsbreite in halber Höhe zwischen den Wandlern.

die addiert den Gesamtdurchfluss ergeben.

$$Q = Q_{\text{unten}} + Q_{\text{oben}} + \sum Q_i, \text{ mit } i \geq 2 \quad (36)$$

3.9 Kalibrierung

In Anlehnung an DIN 1319 ist im weiteren unter dem Begriff „kalibrieren“ zu verstehen, dass die Abweichung eines Messwertes von einem Sollwert (Referenzwert) festgestellt wird.

Übertragen auf die hydrometrische Kalibrierung von Ultraschallanlagen muss also aufgrund des im allgemeinen unbekanntem Geschwindigkeitsprofils (siehe Bild 15) ein Bezug zwischen der Fließgeschwindigkeit v_g und der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m , siehe Gleichung (30), hergestellt werden.

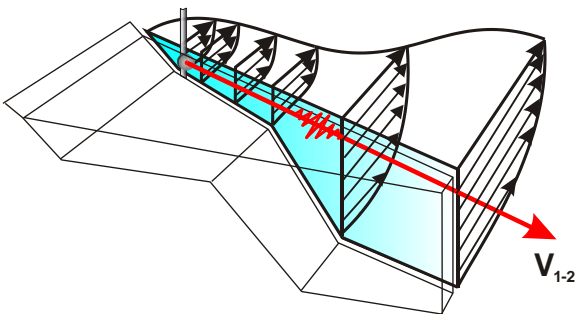


Bild 15: Beispiel für ein typisches Geschwindigkeitsprofil bei gegliedertem Querschnitt (Hauptgerinne/Vorland)

Dieser Bezug kann näherungsweise durch theoretische Ableitungen, mathematische Modelle oder Naturmessungen hergestellt werden.

Um zwischen einem theoretisch begründeten Geschwindigkeitskoeffizienten und einem messstellenspezifischen Kalibrierfaktor unterscheiden zu können, ist es sinnvoll, den k-Faktor, siehe Gleichung (31), in zwei Anteile zu zerlegen:

$$k = k_1 \cdot k_2 \quad (37)$$

mit:

- k_1 theoretisch ableitbarer Geschwindigkeitskoeffizient
- k_2 messstellenspezifischer Kalibrierfaktor

Damit berechnet sich der Durchfluss dann zu:

$$Q = k_1 \cdot k_2 \cdot A \cdot v_g \quad (38)$$

d.h. neben den beiden Messgrößen v und A ist für die Berechnung des Durchflusses Q die möglichst genaue Kenntnis der Größe der Kalibrierfaktoren k_1 und k_2 von entscheidender Bedeutung.

3.9.1 Geschwindigkeitskoeffizient k_1

3.9.1.1 Empirisch

Für breite (natürliche) Gerinne ist die Geschwindigkeitsverteilung näherungsweise nur noch eine Funktion der Wassertiefe. Nach ISO 6416, 1992 gelten für den (theoretischen) Geschwindigkeitskoeffizienten k_1 der Gerinneströmung in Abhängigkeit der Einbautiefe der Messebene die folgenden in Tabelle 2 zusammengestellten Zahlenwerte.

Tabelle 2 Vorbelegung des k_1 -Faktors nach ISO 6416

z/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
k_1	0,846	0,863	0,882	0,908	0,937

z/h	0,6	0,7	0,8	0,9	
k_1	0,979	1,039	1,154	1,424	

mit:

z/h Einbautiefe der Wandler / Wassertiefe

Diese Werte wurden aus 15 in situ-Messungen an sieben verschiedenen Messstellen (1,94 m < h_m < 2,20m) experimentell ermittelt.

3.9.1.2 Logarithmische Geschwindigkeitsverteilung

Zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit kann in natürlichen Gerinnen ebenso auch näherungsweise das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz angewendet werden. Dies stellt sich bei Gewässern mit großer Breite ($b > 10 h$) senkrecht zur Sohle ein. Grundlage bei diesem Verfahren ist, dass in einer Ebene, die in 40% der Wassertiefe über der Gewässersohle liegt, die dort gemessene Fließgeschwindigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit des gesamten Strömungsquerschnittes entspricht. Damit nimmt der Kalibrierfaktor, also das Verhältnis zwischen der Fließgeschwindigkeit v_g und der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m , den Wert = 1 an.

Bezogen auf eine Ultraschallanlage bedeutet dies, dass bei einem akustischen Pfad, der in 40% der Wassertiefe installiert wird, die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m direkt gemessen wird.

Je kleiner die Breite des Gewässers im Verhältnis zur Wassertiefe und je rauher die Gewässersohle, um so stärker wirken sich allerdings sogenannte Sekundärströmungen an den Ufern auf die Geschwindigkeitsverteilung aus. Diese der Hauptströmung überlagerten Sekundärströmungen bewirken unter anderem, dass langsam fließende Wasserteilchen aus den Uferzonen an die Wasseroberfläche transportiert werden. Die Folge davon ist eine Reduktion der Geschwindigkeit nahe der Wasseroberfläche und eine Erhöhung der Reibungsverluste, wodurch das logarithmische Geschwindigkeitsverteilungsgesetz seine allgemeine Gültigkeit verliert.

3.9.1.3 Hydronumerische Modellierung

Für kompakte Querschnitte (z.B. Rechteck- oder Trapezquerschnitt mit $b < 10 h$) ist daher der Einfluss der seitlichen Ränder auf das Geschwindigkeitsprofil nicht mehr zu vernachlässigen.

In diesem Fall lässt sich heute mithilfe hydronumerischer Modelle (z.B. SIMK-Modellierung, KOELLING, 1994) die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt unter der Annahme stationär

gleichförmiger Strömung berechnen und daraus die Größe des Geschwindigkeitskoeffizienten k_1 für jede beliebige Höhenlage des Messpfades bestimmen (siehe Bild 16).

Außerdem können aufgrund der Profildiskretisierung auch entlang des hydraulischen Umfangs variierende Profilrauheiten detailliert erfasst werden, denn jeder Außenkante des Finiten-Element-Netzes können unabhängig voneinander beliebige Wandrauheiten zugewiesen werden, die im Strömungsmodell in der Regel auf der Grundlage des universellen logarithmischen Wandgesetzes berücksichtigt werden.

Durch Wiederholung der Simulationsberechnungen und -Auswertungen für verschiedene Wasserstände wird die vollständige Messstellenkalibrierung als Funktion $k_1(h)$ in Abhängigkeit vom Wasserstand erhalten.

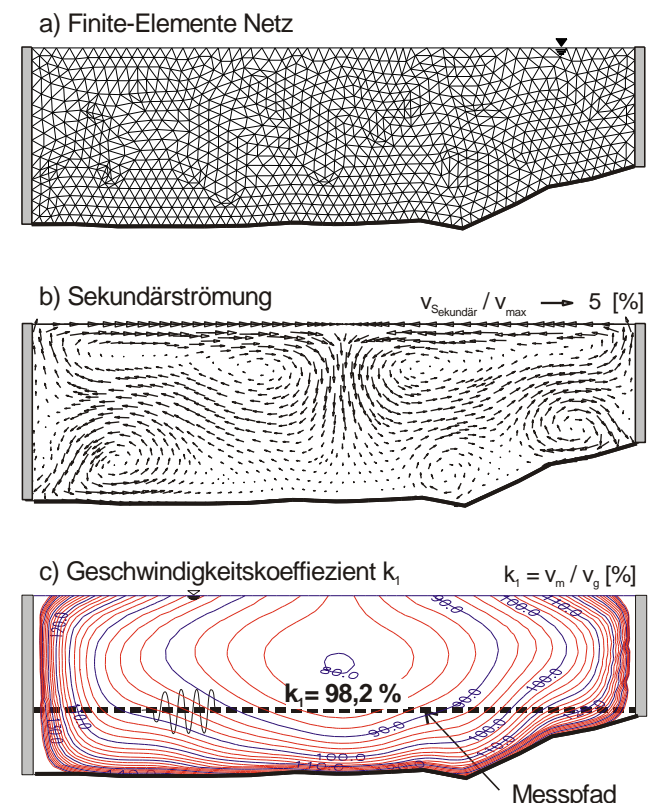


Bild 16: Bestimmung des k_1 -Wertes im Messpfad mithilfe des SIMK-Verfahrens (aus: KOELLING, 1994)

3.9.2 Kalibrierfaktor k_2

Bei natürlichen Gewässern mit stau- und tidebeeinflussten Fließquerschnitten oder unterschiedlichen Sohlenrauheiten bzw. wechselnder Gerinnegeometrie in Quer- und Längsrichtung ist immer mit einer Abweichung vom theoretischen Geschwindigkeitsprofil zu rechnen.

Weitere Auswirkungen auf das Geschwindigkeitsprofil ergeben sich z.B. durch Krümmungen im Gewässerverlauf, durch Wind an der Wasseroberfläche oder durch Grund- oder Oberflächenströmungen vor Grundablässen oder Wehren. Bild 17 zeigt z.B. die unterschiedliche Ausbildung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit von der Sohlenrauheit.

Diese messtellenspezifische Abweichungen in den Annahmen des theoretisch hergeleiteten Geschwindigkeitskoeffizienten k_1 werden über einen zweiten Geschwindigkeitskoeffizienten, den Kalibrierfaktor k_2 , bei der Durchflussberechnung korrigiert.

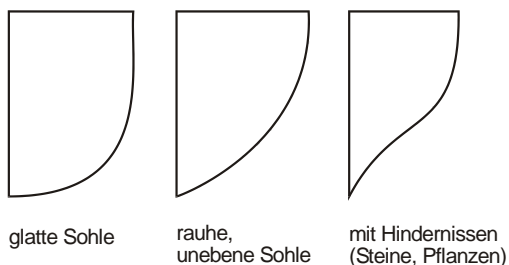


Bild 17: Unterschiedliche Ausbildung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit der Sohlenrauheit

Sowohl nach PEGELVORSCHRIFT, ANLAGE D (1992) als auch nach ISO-6416 (1992) wird daher aufgrund der theoretisch nicht exakt vorhersagbaren Strömungsverhältnisse im Bereich der Messstelle eine vom Betreiber durchzuführende hydrometrische Kalibrierung von Ultraschall-Durchflussmessanlagen als unerlässlich angesehen.

Dabei können sich je nach Wasserstand und Durchfluss unterschiedliche Kalibrierfaktoren ergeben, so dass für den Kalibrierfaktor k_2 bei der Gerinneströmung der folgende allgemeine funk-

tionale Zusammenhang angenommen werden muss:

$$k_2 = f(\text{Wasserstand } w, \text{ Strömungswinkel } \phi)$$

bzw. mit $A = f(w)$ und $Q = f(\phi)$:

$$k_2 = f(\text{Querschnittsfläche } A, \text{ Durchfluss } Q)$$

Die Hinterlegung des durch Referenzmessungen ermittelten funktionalen Zusammenhangs für den Kalibrierfaktor k_2 erfolgt zweckmäßig in Form einer Kalibriermatrix.

In der Praxis kommt dafür in der Regel die Vielpunktmessung mit dem hydrometrischen Flügel (Flügelmessung) zum Einsatz, bei der punktweise die Fließgeschwindigkeiten über den Querschnitt gemessen und anschließend durch vertikale (über die Messlotrechten) und horizontale (über die Breite) Integration der Gesamtdurchfluss ermittelt wird (siehe Bild 18).

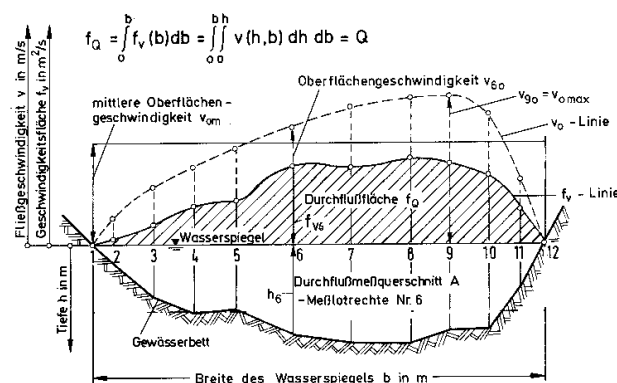


Bild 18: Durchflussermittlung nach dem Geschwindigkeitsflächenverfahren (aus: PEGELVORSCHRIFT, ANLAGE D 1992)

Bei großen Flüssen, bei denen eine Vielpunktmessung nicht oder nur mit einem erheblichen Aufwand möglich ist, kommt als weiteres das Geschwindigkeitsprofil erfassendes Messverfahren das ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) zum Einsatz, das auf der Grundlage des Doppler-Effektes die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Das Messsystem ist auf einem speziellen Messschiff oder Messfloß montiert.

Um einen funktional zusammenhängenden Kalibrierfaktor k_2 herleiten zu können, ist es notwendig, dass die Ultraschallanlage vor, während und nach der Referenzmessung stabile Messwerte

liefert. Die Referenzmessung sollte im Bereich der Ultraschallmessstelle erfolgen. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass die Ultraschallsignale nicht gestört werden.

3.10 Unsicherheiten bei der Messung der physikalischen Größe

3.10.1 Schwebstoffe

Wird ein Ultraschallsignal durch Wasser gesendet, geht ein Teil der Energie der Ultraschallwellen verloren. Dabei verringert sich kontinuierlich die Amplitude der Ultraschallwelle. Die Welle wird gedämpft. Diese Dämpfung bedeutet, dass die Intensität des empfangenen Signals gegenüber dem Ausgangssignal abnimmt. Dabei wird nur die Amplitude des Signals vermindert, andere Parameter, wie z.B. die Frequenz, bleiben unverändert.

Die Dämpfung der Schallwellen ist auf zwei Mechanismen zurückzuführen:

Reibung:

Umwandlung von akustischer Energie in Reibungswärme infolge der Viskosität von Wasser.

Streuung:

Beim Auftreffen auf einen festen Partikel (Schwebstoff) im Wasser wird ein Teil der akustischen Energie gestreut (siehe Bild 19).

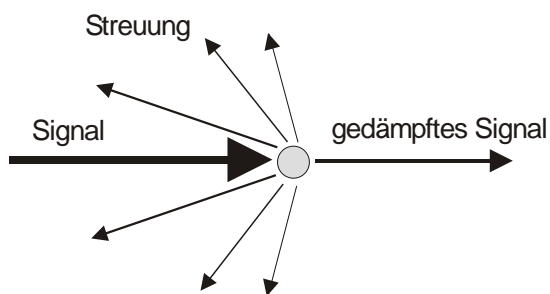


Bild 19 Streuung eines Ultraschallsignals an einem Schwebstoffpartikel

Sehr kleine Partikel schwingen mit der Frequenz der Schallwelle mit, wobei relativ viel akustische Energie über die viskose Reibung verloren geht. Größere Partikel (ab einem Durchmesser von 0,1 bis 1 mm) streuen zunehmend die akustische Energie (siehe Diagramm Bild 20).

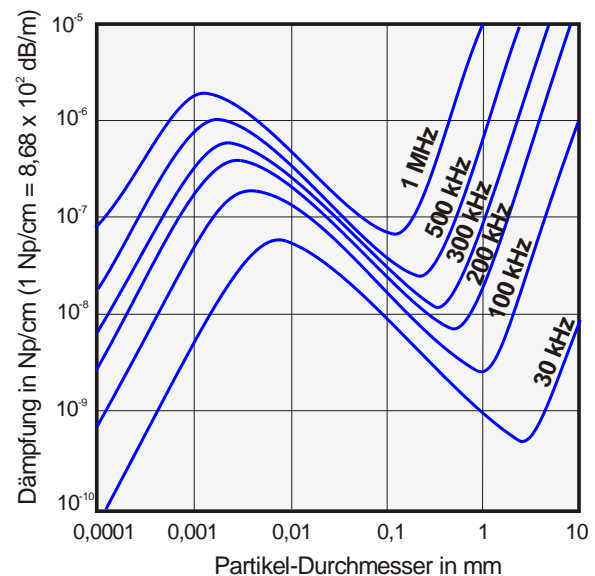


Bild 20 Dämpfung einer akustischen Schwingung in Abhängigkeit des Partikel-Durchmessers und der Frequenz (aus: LAENEN, SMITH, 1982)

Dem Diagramm ist weiterhin zu entnehmen, dass bei gleicher Schwebstoffkonzentration (in Bild 20 1 mg/l) und Partikelgröße die Dämpfung im Wesentlichen von der Frequenz der Schallwelle abhängig ist.

So wird etwa ein Signal mit einer Sendefrequenz von 30 kHz etwa um den Faktor 10 weniger gedämpft als bei einer Frequenz von 200 kHz.

Da die Sendeleistung auf Grund der konstruktiven Eigenschaften der Piezokristalle nur begrenzt gesteigert werden kann, wird die maximale Pfadlänge bei gleichen Randbedingungen damit im Wesentlichen durch die akustische Frequenz bestimmt.

Umgekehrt wird im Hochwasserfall (bei gleicher Pfadlänge) mit u.U. hohen Schwebstoffkonzentrationen die Zuverlässigkeit der Messwerterhe-

bung bei einer niedrigen Sendefrequenz wesentlich gesteigert.

3.10.2 Luftblasen

Luftblasen, wie sie zum Beispiel unterhalb von Wehren bei freiem Überfall in das Wasser eingetragen werden oder aber auch sauerstoffproduzierende Pflanzen bzw. Faulgase, die von der Gewässersohle aufsteigen, dämpfen das akustische Signal. Die physikalischen Effekte sind die gleichen wie bei festen Partikeln, also viskose Reibung (Umwandlung der Schallenergie in Wärme) und Streuung. Im Gegensatz zum Wasser und Schwebstoffen sind Luftblasen aber auch leicht kompressibel, was einen weiteren Effekt auf die Schallgeschwindigkeit hat.

Es ist typisch für Installationen, die bei starker Sonneneinstrahlung durch biologischen Sauerstoff gestört werden, dass die Messungen während des Tages aussetzen, und dass sich die akustischen Bedingungen nach Sonnenuntergang durch mechanisches Ablösen von Gasbläschen und durch Zehrung des Sauerstoffs durch biologische Prozesse oft soweit bessern, dass die Messungen wieder einsetzen.

Ebenso unterbricht das Schraubenwasser von Schiffen, in das Luftblasen eingetragen werden, die Schallausbreitung. Wegen der Kürze der Beeinträchtigung verursacht dies jedoch in der Regel keinen Datenausfall, sondern allenfalls eine reduzierte Anzahl von Messwerten innerhalb der Integrationszeit.

3.10.3 Temperatur und Salzgehalt

Die Schallgeschwindigkeit im Wasser wird durch Dichteunterschiede infolge Temperatur- oder Salzgehaltgradienten beeinflusst. Bei einer starken Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser erfolgt ein Energieaustausch an der Grenzfläche. Dies führt zu einem Temperaturgradienten im Wasser, der das akustische Signal von seiner normalerweise horizontalen Ausbreitung ablenkt. Die Auslenkung ereignet sich im ungünstigsten Fall so weit, dass das Signal nicht mehr auf den Empfänger trifft. Da dann

keine akustische Verbindung mehr zwischen Sender und Empfänger besteht, kann auch keine Messung mehr durchgeführt werden. Salzgehaltgradienten haben einen ähnlichen Einfluss.

Diese physikalischen Randbedingungen müssen bei der Auswahl der Messstelle und ihrer Komponenten berücksichtigt werden.

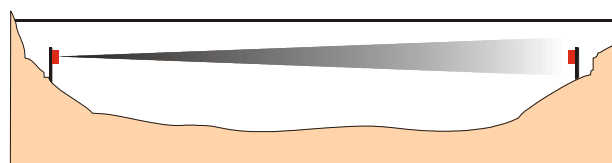


Bild 21 kein vertikaler Dichteunterschied

Temperaturänderungen von 1°C pro Meter und mehr treten vorwiegend in langsam fließenden Gewässern an der Wasseroberfläche auf und reichen ca 0,5 m tief. In den darunter liegenden Wasserschichten sind die Temperaturänderungen geringer.

Auch Sprungschichten von mehreren $^{\circ}\text{C}$ in langsamfließenden Gewässern sind bereits mehrfach beobachtet worden. Sprungschichten können vermieden werden, wenn für ausreichende Turbulenz im Fließvorgang gesorgt wird.

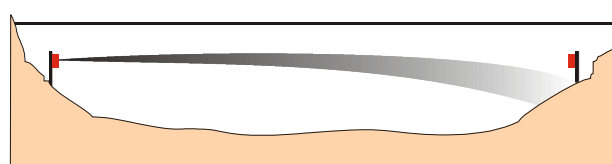


Bild 22: signifikanter vertikaler Dichteunterschied infolge Sonneneinstrahlung

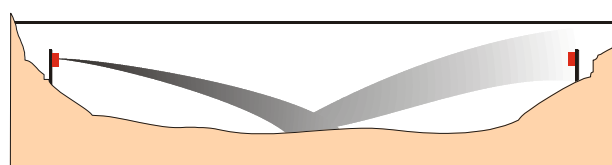


Bild 23: extremer vertikaler, Dichteunterschied infolge Salzgehalt

Temperaturänderungen sind dort von Bedeutung, wo durch Kühlwassereinflüsse erheblich wärmeres Wasser in einen Fluss eingeleitet wird, wo Wasser aus einem Kraftwerkskanal und

das aus dem natürlichen Flusslauf wieder zusammenfließen, wo Wasser aus einem Altarm mit demjenigen aus dem Hauptfließquerschnitt zusammenströmen, wo durch Tiefenentnahme aus einem Staudamm Wasser mit dem natürlichen Durchfluss vermischt wird oder wo im Bereich der Mündung See- und Flusswasser mit unterschiedlichen Temperaturen aufeinander treffen.

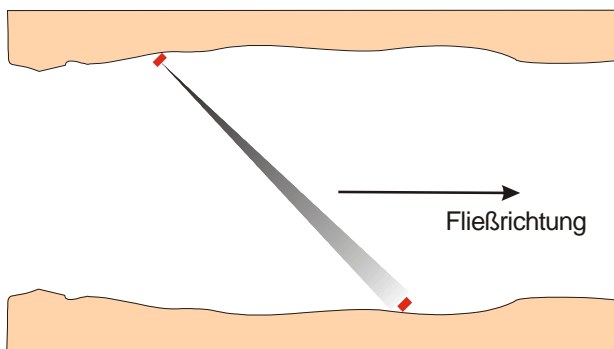


Bild 24 kein horizontaler Dichteunterschied

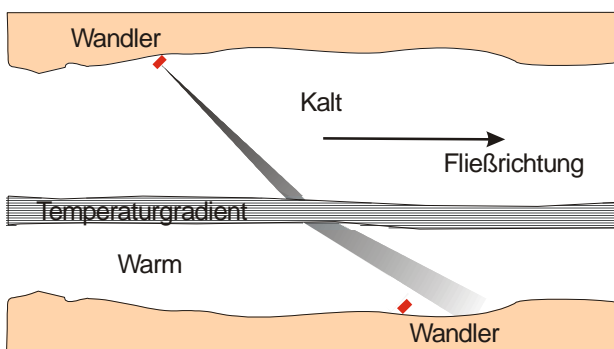


Bild 25 horizontaler Dichteunterschied infolge Einleitung von wärmerem Wasser

In Bild 26 ist die Strahlablenkung infolge Temperaturänderung dargestellt. Beträgt der Temperaturgradient z.B. $0,1^\circ\text{C}$ pro Meter und die Entfernung zwischen den Wandlern 200 m , so erreicht der maximale Energieanteil den Empfänger um ca. 4 m von der Ideallinie versetzt. Da die gesendete Druckwelle sich aber mit dem Abstrahlwinkel des Wandlers ausbreitet, kann das Signal z.B. bei einem Abstrahlwinkel von 5° empfangen werden. Bei einer Pfadlänge von 500 m beträgt die Ablenkung bei gleichem Temperaturgradienten schon 24 m . Ein Abstrahlwinkel von 5° reicht dann nicht mehr aus, um das Signal am anderen Ufer zu detektieren.

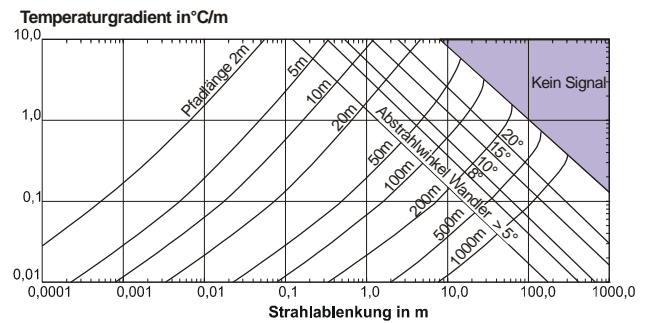


Bild 26 Abschätzung der Strahlablenkung bei einem linearen Temperaturgradienten und unterschiedlichen Pfadlängen

Da diese Effekte nur bei intensiver Sonneneinstrahlung bei extrem niedrigen Fließgeschwindigkeiten bzw. bei Flüssen im Tidegebiet oder bei Einleitung großer salzhaltiger Volumenströme auftreten, ist diese Störung bei Installationen in Binnengewässern nicht sehr verbreitet. Die meist intensive vertikale Durchmischung in Flüssen macht zudem die Wahrscheinlichkeit solcher Ausfälle noch geringer.

Die Berechnung der Strahlablenkung lässt sich mit den Formeln nach VIGOREUX (1979) durchführen. Eine Formel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit wird von DEL GROSSO (1974) angegeben.

Für die Schallgeschwindigkeit c gilt:

$$c = 1402,39 + 0,156 \cdot P + 5,011 \cdot T - 0,05509 \cdot T^2 + 0,2215 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 1,330 \cdot S + 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot S^2 - 0,0128 \cdot T \cdot S + 0,097 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \cdot S \quad (39)$$

mit:

- c Schallgeschwindigkeit in m/s
- T Wassertemperatur in $^\circ\text{C}$
- S Salzgehalt in ‰
- P Tiefe der Messebene von der Wasseroberfläche in m

Die Anwendung dieser Formel ist beschränkt auf $0^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$ und $0\text{ ‰} < S < 40\text{ ‰}$. Innerhalb dieser Grenzen übersteigt die Genauigkeit der empirischen Formel $0,5\text{ ‰}$.

Für den Krümmungsradius eines akustischen Signals im Wasser gilt:

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial n} \quad (40)$$

mit:

- c Schallgeschwindigkeit in m/s
- R Krümmungsradius in m
- n Normalenrichtung zur Signalausbreitung

Als erste Näherung für den Krümmungsradius eines horizontalen Signals in Wasser von 10°C ergibt sich:

$$R = -1450 \left(3,63 \frac{\partial T}{\partial P} + 1,13 \frac{\partial S}{\partial n} \right)^{-1} \quad (41)$$

Im Sommer ist bei starker Sonneneinstrahlung die Wassertemperatur in den oberen Schichten größer als in den unteren, so dass ein negativer Temperaturgradient entsteht. Im Winter, unterhalb von 4°C, ist es genau umgekehrt.

Bei unterschiedlichem Salzgehalt ist der größere Salzgehalt immer in den unteren Schichten, der Gradient ist deshalb immer positiv.

Nach Gleichung (41) verursacht ein negativer Temperaturgradient im Sommer eine Ablenkung des Signals nach unten, in die tieferen Schichten, während ein positiver Salzgehaltgradient den Strahl zur Oberfläche ablenken würde.

3.11 Fehlerbetrachtung

3.11.1 Zufällige Fehler

Bei einer Fehlerrechnung wird zwischen zufälligen und systematischen Fehlern unterschieden.

Nach LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1992) ist die Unsicherheit bei Ultraschall-Durchflussmessungen hauptsächlich den folgenden vier Punkten zuzuordnen:

1. Auswahl der Messstelle

Veränderliche Strömungsrichtung, Luftblasen, Schwebstoffführung, Temperaturschichtun-

gen, Sauerstoffübersättigung, zu kleine Fließgeschwindigkeiten

2. Einrichten und Kalibrieren der Messanlage

Geräteeinstellung, ungenaue oder falsche Geometrieangaben, ungenaue oder falsche Referenzmessungen (abhängig vom verwendeten Verfahren)

3. Betrieb der Messanlage

Gestörte oder defekte Messanlage (Ausfall der Elektronik), Wahl zu großer (> 10 min) oder zu kleiner (<1 min) Integrationszeiten

4. Auswerten der Messdaten

Falsche Bewertung von Störeinflüssen, unzureichende Anpassung der Bezugskurven an veränderte Randbedingungen.

Die erzielbare Genauigkeit einer Durchflussermittlung mit einer Einpfad-Anlage gibt RACK (1982) mit $f_{\text{ges.}} = 5\%$ an, wobei allein zufällige Fehler bei der Ermittlung der Eingangsgrößen (Längen-, Winkel- und Zeitmessung) sowie die Unsicherheit bei der Zuordnung zwischen Messwert v_g und dem Durchfluss Q berücksichtigt worden sind.

Für eine Abschätzung der Größenordnung des zu erwartenden zufälligen Messfehlers sind die einzelnen Messfehler bei der Messung der Fließgeschwindigkeit im Messpfad (f_v), der Querschnittsfläche (f_A) und des Kalibrierfaktors (f_k) mithilfe des quadratischen Fehlerfortpflanzungsgesetzes zum Gesamtfehler der Durchflussmessung (f_Q) zu überlagern:

$$f_Q = \sqrt{f_v^2 + f_A^2 + f_k^2} \quad (42)$$

Beispiel:

Die Fließgeschwindigkeit im Messpfad v_g aus der Laufzeitmessung und der Messung der Pfadlänge lässt sich mit der heutigen Messtechnik mit einer Genauigkeit von ca. $f_v \leq \pm 0,02\%$ bestimmen, für die Ermittlung des Wasserstandes gilt eine Genauigkeit $\leq \pm 2\%$ von . Wird die Querschnittsgeometrie als bekannt vorausgesetzt, was bei natürlichen Gerinnen mit beweglicher Sohle keineswegs der Fall ist, so sei hier

angenommen, dass auch die Querschnittsfläche mit der gleichen Genauigkeit wie die Wasserstandserfassung bestimmt werden kann, also $f_A \leq \pm 2\%$.

Lässt sich nun z.B. aufgrund wechselnder Strömungsverhältnisse oder ungenügenden Kalibriermessungen der Kalibrierfaktor k dagegen nur mit einer Genauigkeit von $f_k = \pm 10\%$ angeben, so beträgt der Gesamtfehler der Durchflussmessung nach Gleichung (42):

$$f_Q = \sqrt{f_v^2 + f_A^2 + f_k^2} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 10^2} = 10,4\% \quad (43)$$

Angenommen die Unsicherheit bezüglich des k -Faktors ließe sich auf $f_k = \pm 4\%$ reduzieren, so wäre entsprechend der Gesamtdurchfluss mit einer Genauigkeit von

$$f_Q = \sqrt{f_v^2 + f_A^2 + f_k^2} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 4^2} = 4,9\% \quad (44)$$

zu bestimmen.

Praktisch bedeutet dies, dass sich mit der gleichen Messtechnik bei entsprechender Kalibrierung der Durchfluss mit einer Genauigkeit $f_Q < 5\%$ bestimmen lässt.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass neben der Genauigkeit der Messtechnik das Messergebnis wesentlich von der Güte der Kalibrierung und damit indirekt von der richtigen Wahl der Lage der Messstelle bestimmt wird (ERB, 2000).

3.11.2 Systematische Fehler

Die Größenordnung aller systematischen Fehler (Störungen innerhalb des Messquerschnitts, Auswertefehler, Gerätedefekte usw.) lässt sich dagegen nicht abschätzen. Ihr Einfluss kann von einer nur geringen gleichbleibenden Beeinflussung des Messwertes (vgl. Kapitel 5.4.2) bis zum totalen Messwertausfall reichen.

Eine Beurteilung, ob eine systematische Messwertabweichung vorliegt, kann nur durch eine Prüfung auf einen signifikanten Zusammenhang zwischen der als störend bekannten Größe und dem Messwert selbst vorgenommen werden.

Weicht bei einer Einstreckenanlage die tatsächliche mittlere Strömungsrichtung von der angenommen (uferparallelen) Strömungsrichtung ab, so berechnet sich nach Gleichung (5) bzw. (6) eine Geschwindigkeit senkrecht zum Messpfad, die nicht der tatsächlichen Geschwindigkeit entspricht.

Das Verhältnis des daraus berechneten Durchflusses zum tatsächlichen Durchfluss ist dabei abhängig vom Pfadwinkel ϕ und der Größe der Winkelabweichung α zwischen angenommener und tatsächlicher Strömungsrichtung.

Bild 27 zeigt, um so größer der Pfadwinkel ist, umso größer wirken sich bereits kleine Abweichungen in der angenommen mittleren Strömungsrichtung aus.

Ist die Strömungsrichtung konstant, so wird dieser systematische Fehler indirekt durch die Kalibriermessungen korrigiert, da von der Ultraschall-Durchflussmessanlage immer ein zu großer oder zu kleiner Geschwindigkeits- bzw. Durchflussmesswert angezeigt wird.

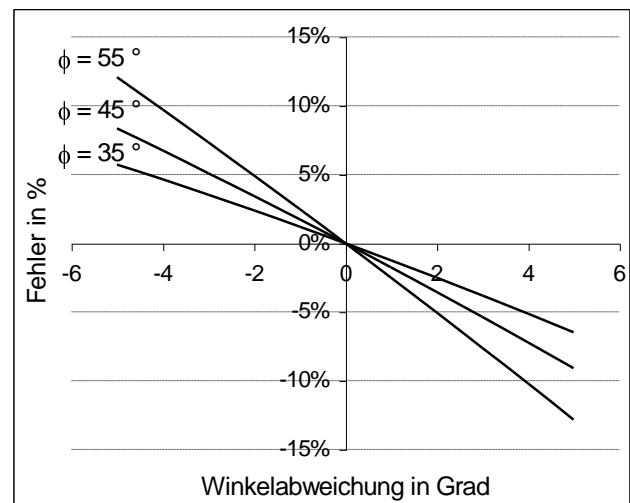


Bild 27 Relativer Fehler bei der Durchflussberechnung in Abhängigkeit der Winkelabweichung zwischen angenommener und tatsächlicher Strömungsrichtung (Einstreckenanlage)

4 Umweltverträglichkeit

Prinzipiell werden Ultraschallanlagen so errichtet, dass die ökologische Funktion des Gewässers möglichst wenig beeinträchtigt wird. Die baulichen Eingriffe konzentrieren sich vornehmlich auf lokal begrenzte Sohl- und Böschungsgebiete, welche zum Verlegen der Kabel bzw. zum Arretieren der Ultraschallwandler benötigt werden. Bei der Errichtung von Ultraschallanlagen in besonders sensiblen städtebaulichen und landschaftlichen Gebieten spielen auch gestalterische Elemente beim Bau der Anlage eine Rolle (z.B. Einpassung des Pegelhauses / Messschrankes in die Umgebung).

Die Ultraschallsignale haben keine negativen Auswirkungen auf die im Wasser lebenden Fischarten. Zu diesem Ergebnis kam eine Studie, welche in den Jahren 1999 – 2001 im Auftrag des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Rostock durch die Universität Rostock, Fachbereich Biowissenschaften an einer Kreuzstrecken-Ultraschallanlage im Gewässer Warnow durchgeführt wurde. Geklärt werden sollte der Einfluss von Ultraschall-Strömungsmesssonden auf das Wander- und Bewegungsverhalten von Fischen. Es erfolgten u.a. Langzeitbeobachtungen des Wanderverhaltens verschiedener Arten, sowie Videobeobachtungen der in verschiedenen Tiefen lebenden Fischarten bei ein- und ausgeschaltetem Messsystem. Näheres kann der Literatur entnommen werden.

5 Messstellenevaluierung / Standortwahl

Hierzu kann der Fragebogen (Anhang 1) verwendet werden.

5.1 Hydraulische Bedingungen

Die Überprüfung der Eignung eines Fließquerschnittes für die Durchflussmessung mit Ultraschall beginnt mit der Begutachtung der hydraulischen Situation vor Ort. Tabelle 3 fasst die wichtigsten Kriterien zusammen.

Tabelle 3: Hydraulische Bedingungen

Kriterium	Bedingung	Prüfmöglichkeit
Anströmung	<p>Optimal: Gerader Verlauf des Gewässers in einem Bereich der 5 bis 10-fachen Gewässerbreite oberhalb und der 1 bis 2-fachen Gewässerbreite unterhalb der Messstelle</p> <p>Alternativ: Mäandrierende Abschnitte → Kreuzpfadanordnung vorsehen !</p>	<p>Messstellenbesichtigung vor Ort</p> <p>Einsichtnahme Lageplan</p>
Gestaute- und rückgestaute Bereiche	Problemlos	Messstellenbesichtigung vor Ort
Wasserstand	Gewährleistung der herstellerabhängigen Mindestüberdeckung der Wandler → Konsultation des Herstellers	Berücksichtigung der gewässerkundlichen Statistik
Geschwindigkeitsverteilung	Keine Messquerschnitte mit überwiegender Rückströmungszonen zulassen	Messstellenbesichtigung vor Ort u.U. hydrometrische Probemessung im vorgesehenen Querschnitt

Windeinfluss	vernachlässigbar	
--------------	------------------	--

5.2 Morphologische Bedingungen

Morphologische Kriterien begutachten den physischen Zustand der Messstelle. Sie können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Morphologische Bedingungen

Kriterium	Bedingung	Prüfmöglichkeit
Gewässersohle	Stabile Ausbildung, keine Ablagerungen und Auskolkungen	Vergleich von zeitlich versetzten Querschnittsaufmessungen, Geologische Untersuchungen
Ufer	Definierte Form, stabile Ausbildung, Vorländer mit flacher Neigung müssen an der Abflussbildung teilnehmen	Messstellenbesichtigung vor Ort
Messpfad	Keine Steine oder andere Hindernisse im Messpfad, keine Krautfahnen im Messpfad	Messstellenbesichtigung vor Ort Profilaufnahme längs des Messpfades mit Höhenbezug
Lage oberhalb von Staustufen	Messquerschnitt in einer Entfernung des 3 bis 4-fachen Wertes der Stautiefe anordnen	Messstellenbesichtigung vor Ort

Im Falle einer instabilen Gewässersohle müssen Sohlveränderungen schnell erfassbar sein, da die Querschnittsfläche direkt in das Messergebnis Durchfluss eingeht.

Ebenso sind Messstellen mit weitem Vorland zu vermeiden. Wird das Vorland nur wenig überflutet, ändern sich die Größe des Durchflussquerschnittes und die mittlere Fließgeschwindigkeit sprunghaft. Da eine Messung der Fließgeschwindigkeit auf dem nur gering oder teilweise überfluteten Vorland nicht möglich ist, ist bei derartigen Durchflusssituationen keine zuverlässige

sigen Messungen mit der hier beschriebenen Methode möglich.

5.3 Physikalische Bedingungen

Die Einhaltung der physikalischen Randbedingungen ist notwendig, um eine Funktion des Messprinzips Ultraschall an sich zu gewährleisten.

Tabelle 5: Physikalische Bedingungen

Kriterium	Bedingung	Prüfmöglichkeit
Temperaturgradient	Messstelle nicht unterhalb von Kühlwassereinläufen und Altarmzuflüssen anordnen. Bei Temperaturunterschieden von > 3 bis 5 °C im Wasserkörper → Hersteller konsultieren Siehe auch Kap. 3.10.3	Temperaturprofil vor Ort aufnehmen
Salzgradient	i.d.R. nur in Küstengewässern problematisch → Hersteller konsultieren	Messung der Salinität
Luftblasen	Messstelle um das 5 bis 10-fache der Gewässerbreite unterhalb von Wehranlagen anordnen Bei möglichem Eintrag von mikroskopisch kleinen Luftbläschen infolge stromauf angeordneter Pumpen → Hersteller konsultieren	Ortsbesichtigung Lageplan

Schwebstoffe	ab 10 g/l → Hersteller konsultieren, dieser entscheidet über die zu verwendende Frequenz	Schwebstoffmessungen
--------------	--	----------------------

5.4 Praktische und logistische Bedingungen

Allgemein gilt: Die Messstelle muss von jedem Ufer gut zugänglich sein, da während der Installation der einzelnen Komponenten umfangreiche Tiefbauarbeiten notwendig sind. So sind z.B. für die Befestigung der Wandler am Ufer wasserbauliche Arbeiten durchzuführen, die je nach Ausführung den Einsatz von schwerem Gerät erfordern.

Trotz der geringen Leistungsaufnahme sollte für einen zuverlässigen und dauerhaften Betrieb ein Stromanschluss an der Messstelle vorhanden sein. Zwar können die Systeme auch mit Solarenergie versorgt werden, jedoch ist ein Anschluss an das Stromnetz gegenüber einer lokalen Stromversorgung im Hinblick auf den geringeren Aufwand für Wartung und Erneuerung auch bei höheren Investitionskosten oft wirtschaftlicher. Für die kurzfristige Überbrückung von Ausfällen der Energieversorgung wird die Integration einer USV-Anlage in das Messsystem empfohlen.

Da im Laufe der Zeit Vergleichsmessungen durchgeführt werden, sollte die Messstelle nicht ausschließlich für Ultraschall geeignet sein. Es sollte auch die Möglichkeit bestehen, an der Messstelle selbst oder in ihrer Nähe mit einem anderen Verfahren die Durchflussmessung zu kontrollieren.

In Tabelle 6 sind die wichtigsten Randbedingungen zusammengestellt.

Tabelle 6: Logistische Randbedingungen

Kriterium	Bedingung	Prüfmöglichkeit
Zugang zur	Guter Zugang u.U. auch für	Vor Ort

Messstelle	schweres Gerät möglich	
Energieversorgung	Optimal: Energieversorgung mit 220 V Alternativ: Solarenergie 12 bzw. 24V	Vor Ort
Datenübertragung	Optimal: Festnetzanschluss Alternativ: Funkmodem	Vor Ort
Kabelführung	Am Ufer: in Schutzrohren in Kabelgräben Gewässerquerung: vorhandene Brücken nutzen oder Kabel in Gewässersohle einspülen, alternativ auch Durchtunnelung der Gewässersohle möglich Gewässerquerung nicht möglich: Responderanlage → Aufstellmöglichkeit für Responder am Gegenufer prüfen	Vor Ort
Eignung für Vergleichsmessungen mit anderen Verfahren	Möglichkeit der Vergleichsmessung mit hydrometrischen Flügeln oder Sonden: Brücke in der Nähe ? Freies Profil ? Bei ADCP-Messungen: Wo kann Messboot in das Wasser gelassen werden ?	Vor Ort

5.5 Anlagenkonfiguration

Verläuft die Strömung parallel zu den Ufern und wird das Geschwindigkeitsprofil durch Wasserspiegelschwankungen bzw. unterschiedliche Anströmbedingungen nicht beeinflusst, so stellt die Anordnung mit zwei Wandlern die einfachste Möglichkeit der Durchflussmessung mit Ultraschall dar.

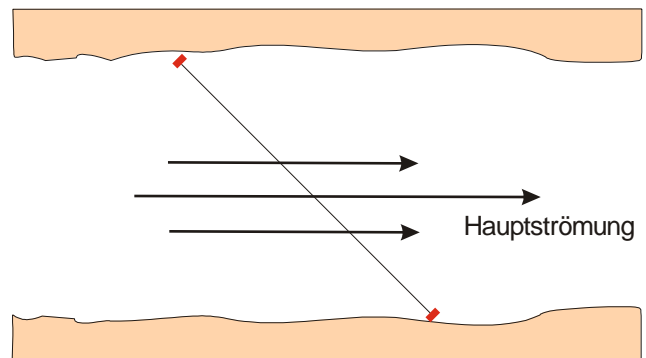


Bild 28 Einpfadanlage, parallele Strömung

Als Nachteil muss jedoch erwähnt werden, dass die Wandler im Gewässer nicht redundant ausgeführt sind und bei einem Defekt, z.B. im Falle einer mechanischen Beschädigung durch Treibgut bei Hochwasser oder durch einen Schiffsstoss, kein zweiter Messpfad zur Durchflussermittlung herangezogen werden kann.

Grundvoraussetzung für die Messung mit Ultraschall ist, dass der Winkel zwischen der Hauptströmung und demjenigen des akustischen Messpfades sehr genau bekannt ist (siehe Kapitel 3.11.2).

Variiert bzw. oszilliert dagegen die Strömung in der Art einer Mäanderströmung oder verändert ihre Richtung in Abhängigkeit des Wasserstandes oder in Abhängigkeit der Wasserführung eines oberhalb einmündenden Nebenflusses, so ist der Einsatz einer Kreuzstreckenanlage erforderlich, um damit den veränderlichen Strömungswinkel bei der Durchflussberechnung berücksichtigen zu können. **Bei einem natürlichen Gewässer ist die Kreuzstreckenanlage die sicherste Lösung, um den Durchfluss mit hoher Genauigkeit zu erfassen.**

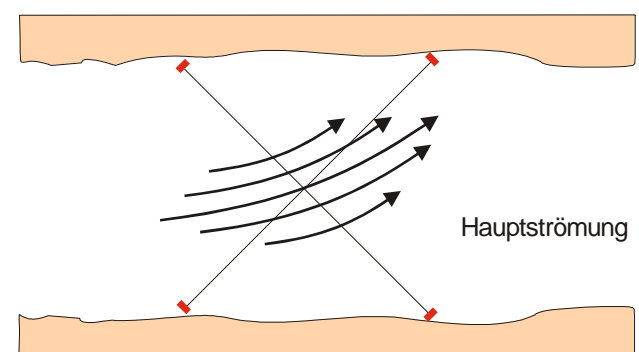


Bild 29 Kreuzstreckenanlage

Während es vor wenigen Jahren noch als wichtig erachtet wurde, in möglichst vielen Ebenen zu messen, ist heute die Beurteilung von Mehrebenenanlagen zurückhaltender. Natürlich entfällt bei einer Mehrebenenanlage der anfängliche Kalibrieraufwand, bis bei verschiedenen Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten die unterschiedlichen k-Werte für den ganzen Messbereich vorliegen. Neue numerische Methoden bei der Kalibrierung und die Tatsache, dass in den Systemen auf die wasserstands- und durchflussabhängigen K-Werte tabelliert zugegriffen werden kann, bieten nunmehr eine Alternative zu den höheren investiven Kosten einer Mehrebenenanlage. Als Vorteil bleibt jedoch die Möglichkeit, bei Ausfall einer Messebene die Durchflüsse anhand der noch funktionsfähigen zu ermitteln. **Mehrebenenanlagen kommen bevorzugt bei gegliederten Querschnitten und Messquerschnitten mit großen Wasserspiegelschwankungen zum Einsatz.**

Die maximale Reichweite eines Schallsignals in einem Gewässer wird durch die akustische Frequenz und die Sendeleistung bestimmt, wobei die Sendeleistung auf Grund konstruktiver Eigenschaften der Piezokristalle nur begrenzt gesteigert werden kann. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei stark schwebstoffhaltigem Wasser die akustischen Schwingungen bei hohen Frequenzen mehr gedämpft werden als bei niedrigeren (siehe Kapitel 3.10.1). Gerade im Hochwasserfall wird daher durch niedrigere Sendefrequenzen die Zuverlässigkeit des Messwertempfangs wesentlich gesteigert.

Wandler mit einer **niedrigeren Frequenz** werden für **längere Messstrecken** (maximale Gewässerbreite: 1500m) eingesetzt oder bei einem hohen Schwebstoffgehalt im Gewässer. Von ihren Abmessungen her sind diese Wandler größer. **Höher frequente Wandler** werden bei Messungen auf **kurzen Strecken** (minimale Gewässerbreite: 0,5m) und in vergleichsweise klarem Wasser verwendet.

6 Planung und Bau

6.1 Bauplanung

Die Durchführung der Bauplanung erfolgt in mehreren Schritten (siehe hierzu auch *Arbeitsanleitung für den Bau von Pegeln und Datendienst Baden-Württemberg – Planung und Bau von Pegeln*).

Am Beginn stehen die Voruntersuchungen. Hierzu zählt vor allem die Auswahl eines geeigneten Standortes für die Ultraschallanlage (siehe hierzu Kapitel 5 Messstellenevaluierung / Standortwahl und Anhang 1). Im Anschluss erfolgt der Vorentwurf. Er ist Grundlage für die Ausschreibung und Vergabe der Bauplanung. In ihm sind auch die durch AG und AN zu erbringenden Leistungen zu definieren. Der anschließende Bauentwurf wird erstellt, wenn die Klärung der Eigentumsverhältnisse herbeigeführt und die Realisierung des Vorhabens zeitlich absehbar ist. Im Bauentwurf enthalten sind:

- Bauzeichnungen und Montagehinweise
- Pläne für Elektro- und Blitzschutzeinrichtungen
- Leistungsverzeichnis für die Ausschreibung (siehe Anhang 2)
- Kostenvoranschlag

Erforderliche Unterlagen sind:

- Örtlicher Lageplan (Maßstab mind. 1:5.000)
- Querprofilaufnahmen des vorgesehenen Messquerschnittes (mindestens drei)
- Gewässerkundliche Hauptwerte (siehe auch Fragebogen , Anhang 1)
- Infrastrukturelle Kartierung der Medien (Strom, Telefon, bzw. weitere betroffene Medien, z.B. Gasleitungen, Wasserleitungen)
- Auszug aus dem Katasterplan

Das Genehmigungsverfahren umfasst im Wesentlichen Anfragen bei folgenden für den betroffenen Gewässerabschnitt zuständigen Institutionen:

- Landesumweltbehörden
- Untere Wasserbehörden
- Wasser- und Bodenverbände
- Wasser- und Schifffahrtsämter (bei Baumaßnahmen an BWStr.)
- Stadt-/Gemeindeverwaltungen
- Straßenbauämter
- Energieversorgungsunternehmen
- Gasversorgungsunternehmen
- Deutsche Telekom

Der Antragstellung muß in der Regel eine Beschreibung des Vorhabens inklusive Projektzeichnung, Lageplan, Kabelverlegelan, Bestandszeichnungen etc. beigefügt werden.

6.2 Bauausführung

Die Bauausführung kann sowohl schlüsselfertig durch den Auftragnehmer als auch unter Einbeziehung von Eigenleistungen des Auftraggebers erfolgen. Geeignet für die Erbringung von **Eigenleistungen** sind:

- Erstellung von Kabelgräben
- Verlegung der Kabelschutzrohre und Einziehen der Signalkabel
- Energiezuführung
- Zuführung Telefonleitung
- Einbau Wasserstandssensor / Pegellatte
- Einbringen von der Befestigungsvorrichtungen für die Wandlernaufnahme
- Errichtung eines Pegelhauses / Messschrankes

Der **Hersteller** übernimmt in der Regel folgende Leistungen:

- Montage und Anschluss der Wandler
- Montage und Anschluss des Messsystems inkl. Externer Sensorik (z.B. Einlesen Wasserstand, Ausgabe W und Q an externe Datensammler)

- Inbetriebnahme des Messsystems

6.3 Bauabnahme und Gewährleistung

Die Bauabnahme erfolgt nach VOB § 12. Geprüft werden in diesem Zusammenhang

- alle In- und Outputschnittstellen
- die Messwertausgabe vor Ort und die Datenfernübertragung (Datenfluss)
- die Genauigkeit des Messwertes Wasserstand mit Hilfe eines definierten Referenzwertes
- die Genauigkeit des Messwertes Durchfluss mit Hilfe eines geeigneten Vergleichsmessverfahrens.
- die ordnungsgemäße Bauausführung
- der ordnungsgemäße Anschluss und die Beschriftung aller Komponenten
- die Vollständigkeit aller Dokumentationen (Handbücher, Messstellendokumentation etc.)

Die Gewährleistung für alle ausgeführten Bauleistungen beträgt 24 Monate, für das Messsystem selbst 12 Monate.

7 Betrieb und Wartung von Ultraschallmesssystemen

Der technische Betrieb und die Wartung von Ultraschall-Messsystemen können an die Gewährleistung bestimmter allgemeingültiger Kriterien geknüpft werden

7.1 Wandler

- Möglichkeit der Applikation des Messsystems auf unterschiedliche Messbedingungen durch die Verwendung verschiedener Wandlerfrequenzen
- Einfache und sichere Wandlerrmontage und -demontage
- Einfache Ausrichtung und Arretierung
- Sichtbare Vermarkung der Wandlerposition am Ufer

7.2 Signalkabel

- Geschützte über- und unterirdische Verlegung
- Eindeutige Beschriftung der Anschlüsse nach einem definierten Schema
- Dokumentation in einem Kabelverlegeplan

7.3 Messelektronik

- Einfache modulare Bauweise
- Leichte Zugänglichkeit und Austauschbarkeit von Bausteinen im Reparaturfall (z.B. Austausch von Platinen etc.)
- Optische Kontrollmöglichkeit der Funktionalität des Messsystems (z.B. durch Leuchtdioden, LCD etc.)
- Verfügbarkeit entsprechender Schnittstellen für die Datenübernahme bzw. -übergabe von / an externe Geräte.

- Einfache Kommunikation mit dem Messsystem vor Ort und über DFÜ
- Gewährleistung der Datenerhebung und –sicherung über einen vorgegebenen Zeitraum bei Ausfall der Energieversorgung (z.B. durch Implementierung einer USV-Einheit)
- Selbsttätiger Start der USV bei Stromausfall
- Möglichkeit des Anschlusses eines Messwertsimulators zu Prüfzwecken

7.4 Messschrank

- Übersichtliche beschriftete Kabelführung
- Übersichtliche Anordnung aller Komponenten
- Leichte Austauschbarkeit von Zusatzbausteinen (z.B. Modem, Heizung, Lüfter, Sicherung etc.)

7.5 Software

- Einfache grafische Benutzeroberfläche für die Parametrierung und Bedienung des Messsystems.
- Passwortgeschützter Zugang zu Wartungsebenen
- Datenplausibilisierungsmöglichkeit der Messwerte in Form einer übersichtlichen Ganglinie für W und Q.
- Grafische Online-Qualitäts-Prüfung des Ultraschallsignals
- Online-Visualisierung der Rohdaten (z.B. Fließgeschwindigkeit, Durchfluss, Wasserstand, Schallgeschwindigkeit etc.)
- Protokollierung von Systemaktivitäten
- Datenausgabe in ASCII-Format
- Dokumentation der Software und der verwendeten Algorithmen

7.6 Gewässerpflege

Der Aufwand zur Pflege des Messquerschnittes hängt in erster Linie von der Beschaffenheit des Ufers und der Gewässersohle sowie den Anströmbedingungen ab. Wichtig sind :

- das Freihalten der Meßpfade von Krautbewuchs und anderen Hindernissen
- das Aufnehmen veränderter Querschnittsgeometrien nach Hochwässern
- die Überprüfung der Lage der Gewässersohle in Meßquerschnitten langsamfließender Gewässer, bei denen die Gefahr der Sohlaufhöhung durch Anlandungen und Ablagerungen gegeben ist.

Pauschale Vorgaben sind schwer zu realisieren. Pflegemaßnahmen und deren Häufigkeit müssen individuell festgelegt werden. Die Hersteller unterstützen den Betreiber bei der Erstellung messstellenspezifischer Pflegepläne.

8 Arbeitsschutzvorschriften

Bei der Planung von Ultraschallanlagen sind die Gesichtspunkte des Arbeitsschutzes und der Verkehrssicherheit zu berücksichtigen.

Insbesondere sind die einschlägigen Bestimmungen zur Arbeit an elektrischen Anlagen mit Hochspannung und für Arbeiten an und in Gewässern zu beachten.

Arbeiten unter Wasser sollen nur durch Fachfirmen (Taucher) ausgeführt werden.

Im Übrigen gelten die Regelungen zum Arbeitsschutz an Pegelanlagen (siehe Pegelvorschrift; Anlage A: Richtlinie für den Bau von Pegeln).

9 Literatur

- VDI/VDE 2640 (1993): Netzmessungen in Strömungsquerschnitten, Allgemeine Richtlinien und mathematische Verfahren. Blatt Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI/VDE 2642 (1996): Ultraschall-Durchflußmessung von Fluiden in voll durchströmten Rohrleitungen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- ISO 6416 (1992): Measurement of liquid flow in open channels – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. International Organization for Standardization, Switzerland, 2. Auflage.
- COLE, J.A. (1979): The deflection of an acoustic beam by temperature and salinity gradients. WDU/WRC Ultrasonics River Gauging Seminar Reading.
- DEL GROSSO (1974): Journal of the Acoustical Society of America, No. 56, 1084
- FIEDLER, O. (1992): Strömungs- und Durchflußmeßtechnik. R. Oldenbourg Verlag München Wien.
- ERB, H. G. (1997): Durchflußmeßtechnik für die Wasser- und Abwasserwirtschaft. Vulkan-Verlag, Essen.
- BONFIG, K.W., Hrsg. (1993): Sensoren und Mikroelektronik. Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen.
- PRANDTL, L.; OSWATITSCH, K.; WIEGHARDT, K. (1984): Führer durch die Strömungslehre. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 8. Auflage
- LAENEN, A.; SMITH, W. (1983): Acoustic Systems for the Measurement of Streamflow. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2213.
- KOELLING, C. (1994): Finite - Element - Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen. Heft 60 Hydraulik und Gewässerkunde, TU München
- RACK, C. (1982): Unsicherheiten bei der Abflußmessung mit Ultraschall und mit Meßflügeln in offenen Gerinnen. In: Mitteilung, Nr. 100, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin
- PEGELVORSCHRIFT, ANLAGE D (1992) : (Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin
- ERB, H.G. (2000): Was fließt im Kanal? Durchflußmessung in der Praxis. KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Heft Nr.11.
- ROTHBARTH, M ; WINKLER, M (2001): Untersuchung zur Klärung des Einflusses von Strömungsmeßsonden (Ultraschall) auf das Bewegungs- und Wanderverhalten von Fischen am Beispiel der Meßstelle Rostock, Studie im Auftrag des StAUN Rostock, Universität Rostock, FB Biowissenschaften – allgemeine und spezielle Zoologie.
- LFU BADEN-WÜRTEMBERG (2001): Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg - Planung und Bau von Pegeln, Eigenverlag
- PEGELVORSCHRIFT, ANLAGE A (1988) : (Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) Richtlinie für den Bau von Pegeln. Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin

