

DIN EN ISO 25377



ICS 17.120.20

Entwurf

Einsprüche bis 2022-11-09
Vorgesehen als Ersatz für
DIN ISO/TS 25377:2008-01

**Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG)
(ISO 25377:2020);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 25377:2022**

Hydrometric uncertainty guidance (HUG) (ISO 25377:2020);
German and English version prEN ISO 25377:2022

Lignes directrices relatives à l'incertitude en hydrométrie (ISO 25377:2020);
Version allemande et anglaise prEN ISO 25377:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-09-09 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naw@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 162 Seiten

DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 25377:2022) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 113 „Hydrometry“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 318 „Hydrometrie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 119-01-05 AA „Hydrometrie (CEN/TC 318, ISO/TC 113)“ im DIN-Normenausschuss DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 772	siehe	DIN EN ISO 772
ISO 748:—	siehe	DIN EN ISO 748:—*
ISO 5168	siehe	DIN V 19218
ISO 6416	siehe	DIN EN ISO 6416

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN ISO/TS 25377:2008-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Veröffentlichungsform als Norm;
- b) Norm redaktionell überarbeitet.

* z. Z. Entwurf

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 772, *Hydrometrie — Begriffe und Symbole (ISO 772)*

DIN EN ISO 748:—, *Hydrometrie — Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten (ISO 748:2021); Deutsche Fassung EN ISO 748:2021*

DIN EN ISO 6416, *Hydrometrie — Messung des Durchflusses mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren (Transit-time-/Time-of-flight-Verfahren) (ISO 6416)*

DIN V 19218, *Durchflussmessung von Fluiden — Verfahren zur Unsicherheitsermittlung (ISO 5168)*

– *Entwurf* –

E DIN EN ISO 25377:2022-10

– Leerseite –

September 2022

prEN ISO 25377

Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG) (ISO 25377:2020)

Hydrometric uncertainty guidance (HUG) (ISO 25377:2020)

Lignes directrices relatives à l'incertitude en hydrométrie (ISO 25377:2020)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Symbole	9
5 ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) — Grundlegende Definitionen und Regeln	11
5.1 Allgemeines	11
5.2 Unsicherheit von Messreihen	11
5.3 Zufällige und systematische Effekte	12
5.4 Unsicherheitsmodelle — Wahrscheinlichkeitsverteilungen	13
5.5 Kombinierte Unsicherheiten — Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten	13
5.6 Angabe der Ergebnisse	14
6 Strömung im offenen Gerinne — Geschwindigkeitsflächen-Verfahren	15
6.1 Allgemeines	15
6.2 Mittlere Geschwindigkeit $\bar{V}_x$	15
6.3 Geschwindigkeitsflächen-Bestimmung zur Berechnung des Durchflusses	16
6.4 Messung der Geschwindigkeit	17
6.5 Unsicherheit im Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsflächenverfahren	17
6.5.1 Allgemeines	17
6.5.2 Zufällige und systematische Effekte	19
6.6 Integrationsunsicherheiten $[u^*(F_y), u^*(F_z)]$	19
6.6.1 Allgemeines	19
6.6.2 Unsicherheiten bei vertikal bewegter Messeinrichtung	19
6.6.3 Unsicherheiten bei horizontalen Messreihen	19
6.7 Unsicherheiten der Umfangsströmung $u(Q_p)$	20
7 Strömung im offenen Gerinne — Kritische Tiefenverfahren	20
7.1 Allgemeines	20
7.2 Bestimmung der Pegelhöhe und Geometrie	21
7.3 Iterative Berechnung	22
7.4 Bewertungsunsicherheit	22
8 Verdünnungsverfahren	23
8.1 Allgemeines	23
8.2 Kontinuierliche Zuführung	23
8.3 Massenänderung	24
9 Hydrometrische Ausrüstung	25
9.1 Leistungsspezifikationen	25
9.2 Gültigkeit von Unsicherheitsaussagen	26
9.3 Herstellerspezifikationen	27
9.4 Leistungsleitfaden für hydrometrische Geräte zur Anwendung in technischen Standardbeispielen	28
10 Anleitung zur Aufstellung von Abschnitten über Unsicherheit in Normen der Hydrometrie	29
10.1 Allgemeines	29
10.2 Geräte, Verfahren und Messsysteme	29
10.2.1 Allgemeines	29
10.2.2 Geräte	29
10.2.3 Verfahren	29
10.2.4 Systeme	30
11 Beispiele	30

11.1	Allgemeines	30
11.2	Unsicherheit bei der Wasserstandsmessung	30
11.2.1	Beispiel 1: Schwimmer/Encoder im Messschacht der Pegelstation	30
11.2.2	Beispiel 2: Im Rohr installierter Druckmessumformer	31
11.3	Unsicherheit bei der Abflussmessung mit Abflussmessbauwerken	32
11.4	Unsicherheit bei der Abflussmessung mit einem Fließgeschwindigkeitsmessgerät	34
Anhang A	(informativ) Einführung in die Unsicherheit bei hydrometrischen Bestimmungen	40
A.1	Grundlegende Definitionen und Regeln	40
A.2	Einführung in die Definitionen	41
A.2.1	Allgemeines	41
A.2.2	Datenhistogramme	43
A.3	Messhistogramme und Wahrscheinlichkeitsverteilungen	46
A.4	Wahrscheinlichkeitsmodelle	48
A.4.1	Allgemeines	48
A.4.2	Wahrscheinlichkeitsmodelle — Allgemeine Betrachtungen	50
A.5	Unsicherheit bei kleinen Datensätzen	50
A.6	Zufällige und systematische Effekte	51
A.7	Zusammenfassung — Typ-A- und Typ-B-Abschätzungsverfahren	52
A.8	Gaußsche Wahrscheinlichkeitsverteilung	53
A.9	Erweiterte Unsicherheit $U(x)$, Vertrauensgrenzen und Erweiterungsfaktoren	54
A.10	Beispiele für die Berechnung der kombinierten Unsicherheit, U_C	55
A.11	Nachweis und Behandlung fehlerhafter Messungen	57
Anhang B	(informativ) Einführung in die Monte-Carlo-Simulation (MCS)	58
B.1	Allgemeines	58
B.2	Ein Beispiel für eine Abflussmessung — Hydrometrisches Bauwerk mit Luftbereichs-Ultraschallmessung des Wasserstandes	59
B.3	Vorsichtsmaßnahmen bei der Verwendung des Monte-Carlo-Verfahrens	62
B.3.1	Allgemeines	62
B.3.2	Erzeugen von Kombinationen von zufälligen Variablen	62
B.3.3	Anzahl der erforderlichen Versuche beim Monte-Carlo-Verfahren	62
Anhang C	(informativ) Verfahren der interpolierten Varianzabschätzung	63
C.1	Verfahren der interpolierten Varianzabschätzung	63
C.2	Beispiel	65
Anhang D	(informativ) Leistungsleitfaden für hydrometrische Geräte zur Anwendung in technischen Standardbeispielen	67
Anhang E	(informativ) Unsicherheitsanalyse der Wasserstand-Abfluss-Beziehung	71
E.1	Wasserstand-Abfluss-Beziehung	71
E.2	Unsicherheit in der Wasserstand-Abfluss-Beziehung	71
E.3	Beispiel	72
Anhang F	(informativ) Messung der Geschwindigkeit	75
F.1	Messung der Geschwindigkeit mit Fließgeschwindigkeitsmessgeräten	75
F.1.1	Vertikale Segmente	75
F.1.2	Horizontale Segmente	75
F.2	Verfahren mit Ultraschall-Dopplergeräten (ADCP) auf schwimmenden Booten	75
F.3	Geschwindigkeitsflächen-Unsicherheiten beim Verfahren mit Ultraschall-Dopplergeräten (ADCP) auf schwimmenden Booten	77
F.3.1	Zufällige und systematische Effekte	78
F.3.2	Bestimmung der Unsicherheit für Ultraschall-Dopplergeräte (ADCP) auf schwimmenden Booten	78
Literaturhinweise		80

Bilder

Bild 1	— Koordinatenbeziehung in einem Gerinne-Querschnitt	15
Bild 2	— Typische Strömungsprofile und -konturen	16

Bild 3 — Wasseroberflächenprofil und Geschwindigkeitsprofile, die typisch für einen rechteckigen Messkanal sind	21
Bild 4 — Verfahren der Verdünnung durch kontinuierlichen Zulauf	24
Bild 5 — Verfahren der Verdünnung durch eine Massenänderung	25
Bild A.1 — Histogramme für zwei Messreihen und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung	47
Bild A.2 — Übliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen	49
Bild A.3 — Vertrauensgrenzen	54
Bild B.1 — Ergebnisse für drei Sätze simulierter Berechnungen von Q mithilfe von Gleichung (B.1), mit jeweils 1 000 Simulationen für jeden Satz	61
Bild B.2 — Ergebnisse aus Bild B.1	61
Bild F.1 — Zweidimensionaler Geschwindigkeitsvektor und Koordinaten	76
Bild F.2 — Dreidimensionaler Geschwindigkeitsvektor und Bootskoordinaten	77

Tabellen

Tabelle 1 — Wahrscheinlichkeitsverteilung	26
Tabelle 2 — Umweltfaktoren	26
Tabelle 3 — Maximale und minimale Nennleistungen	27
Tabelle 5 — Messdaten	35
Tabelle 6 — Berechnung des Abflusses an der Messlotrechten	38
Tabelle A.1 — Einzelmessungen der Gerinnebreite	41
Tabelle A.2 — Breitenmessungen, eingruppiert in 5-mm-Abstufungen ($n = 20$)	42
Tabelle A.3 — Breitenmessungen, eingruppiert als Histogramm in 5-mm-Abstufungen ($n = 20$)	43
Tabelle A.4 — Gerinne 1: Breitenmessungen, gruppiert als Histogramm in 5-mm-Abstufungen ($n = 78$)	43
Tabelle A.5 — Gerinne 2: Breitenmessungen, gruppiert als Histogramm in 5-mm-Abstufungen ($n = 78$)	44
Tabelle A.6 — Encoder — Schwimmpegelmessungen, gruppiert als Histogramm in 0,001-m-Abstufungen ($n = 64$)	45
Tabelle A.7 — Unter Anwendung von Gleichung (A.5) aus der Tabelle A.4, Tabelle A.5 und Tabelle A.6 abgeleitete Ergebnisse	46
Tabelle A.8 — Werte von t_e	50
Tabelle A.9 — t_e Faktoren im Vertrauensniveau von 68 %, 95 % und 99 %	55
Tabelle A.10 — Grubbs-Prüfparameter T_n	57
Tabelle B.1	59
Tabelle B.2	59
Tabelle B.3	59
Tabelle B.4	60
Tabelle C.1 — Geschätzte Tiefe und Geschwindigkeit	65
Tabelle D.1 — Leistungsleitfaden für hydrometrische Geräte zur Anwendung in technischen Standardbeispielen	68
Tabelle E.1 — Wasserstand-Abfluss-Daten an einer Station	72
Tabelle E.2 — Berechnung der Unsicherheit in der Wasserstand-Abfluss-Beziehung	73

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 25377:2022) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 113 „Hydrometry“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 318 „Hydrometrie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird CEN ISO/TS 25377:2007 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 25377:2020 wurde von CEN als prEN ISO 25377:2022 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 113, *Hydrometry*, erarbeitet.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Die Bewirtschaftung einer natürlichen Umgebung erfordert Kenntnisse durch Messungen über das, was vor sich geht. Nur dann können wirksame Maßnahmen ergriffen und die Wirksamkeit der Maßnahme bewertet werden. Vieles hängt von der Qualität der Kenntnisse selbst ab.

Die Qualität des messbaren Wissens wird in Form der Messunsicherheit angegeben. Das international vereinbarte Verfahren zum Bewerten der Qualität der Messung ist der Leitfaden zur Bestimmung von Messunsicherheiten (GUM). Ohne dies ist eine Einheitlichkeit von Messnormen, die sich in gleichem Maße auf die Umwelt beziehen, nicht möglich und internationale Verpflichtungen zum Schutz der Umwelt würden abgeschwächt.

Der wesentliche Zweck des GUM besteht darin, dass eine Aussage zur Qualität eines Messergebnisses mit allen in technischen Normen beschriebenen Messungen vorgelegt wird. Ohne dies können keine zwei Messungen verglichen oder Normen erstellt werden. Während der GUM ein Referenzdokument ist, das den allgemeinen Anforderungen der Metrologie dient, ist der Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG) speziell auf die Hydrometrie, d. h. auf die Messung von Bestandteilen des Wassermesszyklus zugeschnitten. Der HUG hat aus dem GUM die Verfahren entliehen, die am besten in der Hydrometrie angewendet werden können und nutzt diese für die in der Hydrometrie verwendeten Techniken und Ausrüstungen.

In der Vergangenheit hat die Fehleranalyse einen Hinweis auf die Qualität der Messung gegeben, derartige Aussagen können jedoch die Qualität des Ergebnisses nicht angemessen übermitteln, da die Kenntnis eines wahren, fehlerfreien Wertes vorausgesetzt wird, der mit dem gemessenen Ergebnis verglichen werden kann. Der wahre Wert kann niemals bekannt sein, weswegen die Unsicherheit bestehen bleibt. Aus diesem Grund verwendet der GUM das Konzept der Unsicherheit und nutzt es für alle Stufen und Bestandteile des Messprozesses. Somit wird Übereinstimmung sichergestellt.

Der GUM definiert die Standardunsicherheit eines Ergebnisses als äquivalent zu einer Standardabweichung. Dabei kann es sich um die Standardabweichung einer Reihe von Messwerten oder von Wahrscheinlichkeitswerten handeln. Dieses ist weitgehend dem in der Fehleranalyse verwendeten Ansatz ähnlich, die der Unsicherheitstechnik vorausging. Dennoch bietet der GUM zusätzliche Verfahren zum Abschätzen der Unsicherheit auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeitsmodellen. Die beiden Ansätze sind gleichwertig, die Unsicherheit erfordert jedoch nur die Kenntnis oder eine Abschätzung der Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert und nicht das Vorhandensein eines wahren Wertes. Es wird davon ausgegangen, dass eine sorgfältige Bewertung der Bestandteile der Messunsicherheit zu einem Mittelwert führt, der dicht an einem wahrscheinlich wahren Wert liegt, zumindest gut innerhalb der Unsicherheitsspanne.

Allgemeiner gesprochen handelt es sich bei der Unsicherheit um eine Kenngröße, die die Streuung der messbaren Werte charakterisiert, die ihrem Mittelwert zugeordnet werden können.

Bei der Behandlung von Standardabweichungen und Wahrscheinlichkeitsmodellen als Annäherung an Gaußsche- oder Normalverteilungen bietet der GUM ein formales Herangehen an das Kombinieren von Bestandteilen der Unsicherheit in Messsystemen, wo verschiedene Eingangsvariablen kombiniert werden, um das Ergebnis zu bestimmen.

Innerhalb dieses formalen Rahmenwerkes kann der GUM durchgängig für einen Anwendungsbereich gelten und folglich angewendet werden, um sinnvolle Vergleiche von Ergebnissen anzustellen.

Der HUG strebt danach, das Verständnis der Art der Messunsicherheit und deren Bedeutung beim Abschätzen der „Qualität“ einer Messung oder Bestimmung in der Hydrometrie zu fördern.

Die Hydrometrie beschäftigt sich hauptsächlich mit der Bestimmung der Strömung in Flüssen und in künstlichen Gerinnen. Dazu zählen:

- Umwelthydrometrie, d. h. die Bestimmung der Strömung natürlicher Gewässer (weitgehend in Bezug auf Wassermessnetze, Wasserversorgung und Hochwasserschutz);

- Industriehydrometrie, d. h. die Bestimmung von Strömungen innerhalb von Industrieanlagen und von Einleitungen in die natürliche Umwelt (weitgehend in Bezug auf den Umweltschutz und die künstliche Bewässerung).

Beide Bereiche sind Gegenstand internationaler Verträge und Verpflichtungen. Aus diesem Grund müssen gemessene Daten mit dem GUM übereinstimmen, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse verglichen werden können.

Die Hydrometrie beschäftigt sich des Weiteren mit der Bestimmung der Niederschlagsmenge, des Grundwasserstroms und dem Transport von Sedimenten und Feststoffen durch den Wasserstrom. Die vorliegende Fassung des HUG beschäftigt sich ausschließlich mit der Abflussbestimmung.

Die Ergebnisse aus der Hydrometrie werden durch andere Fachgebiete verwendet, um die Umwelt zu regulieren und zu bewirtschaften. Wenn Kenntnisse zu Biomasse, Sedimenten, Toxinen usw. erforderlich sind, wird die Konzentration dieser Bestandteile bestimmt und deren Messunsicherheit abgeschätzt. Die Unsicherheit des Massenstroms kann dann aus der Unsicherheit der Abflussbestimmung ermittelt werden. Die Bestandteile dieser Berechnung sind über die Einhaltung des GUM vergleichbar.

Für Anwender der Hydrometrie und für Ingenieure ist der GUM nicht einfach ein Referenzdokument. Das Dokument wurde entworfen, um für berufsmäßige Messtechniker mit Fachkenntnissen statistischer Verfahren und deren mathematischer Darstellung einen rechtlichen Rahmen zu bieten. Ein hilfreiches Dokument, siehe Literaturhinweis [2], ist eine gekürzte Fassung des GUM, der damit Ingenieuren und Fachleuten anderer Bereiche als der Metrologie die Anwendung erleichtert.

Der HUG steht jedoch, auch wenn er die Konzepte vereinfacht, in keinem Widerspruch zu den Grundsätzen und Verfahren des GUM. Demzufolge interpretiert der HUG den GUM für die Anwendung seiner Anforderungen auf die Hydrometrie auf praktische Weise, die hoffentlich den Ingenieuren und Verantwortlichen bei der Bewirtschaftung der Umwelt zugänglich ist.

Darüber hinaus wird durch den HUG die Monte-Carlo-Simulation, eine ergänzende Technik, eingeführt und entwickelt, die für die Hydrometrie insoweit von Nutzen ist, dass komplexe Messsysteme realistisch dargestellt werden können.

Der HUG fasst die in verschiedenen technischen Normen definierten, grundlegenden hydrometrischen Verfahren zusammen. Der HUG entwickelt Gleichungen zum Abschätzen der Unsicherheit aus dem GUM für diese grundlegenden Verfahren. Die in dem HUG beschriebenen, grundlegenden hydrometrischen Verfahren sind möglicherweise nicht identisch mit den in den veröffentlichten technischen Normen zitierten Verfahren. In derartigen Fällen sind die in diesen Normen beschriebenen Verfahren als maßgebend zu betrachten. Jedoch sollten die in technischen Normen auf die Unsicherheit bezogenen Abschnitte in Übereinstimmung mit dem HUG angepasst werden.

ANMERKUNG 1 Es gibt innerhalb der hydrometrischen Normen keine vereinheitlichte Definition der Raumkoordinaten. Die konventionellen Lehrbuchachsen werden in diesem Dokument bei der Beschreibung der Strömung im offenen Gerinne übernommen: die x -Achse ist in der mittleren Strömungsrichtung horizontal und positiv, die y -Achse ist in der Waagerechten orthogonal zur x -Achse, und die z -Achse ist vertikal positiv.

ANMERKUNG 2 Für eine vollständige Betrachtung des in der Messunsicherheit verwendeten Anwendungsbereichs der Definitionen wird der Leser auf den GUM [1] oder die NIST Technical Note 1297 [2] verwiesen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument bietet einen Beitrag zum Verständnis der Natur der Messunsicherheit und deren Bedeutung bei der Abschätzung der „Qualität“ einer Messung oder einer Bestimmung in der Hydrometrie.

Es gilt für Abflussmessungen in natürlichen und künstlichen Gerinnen. Messungen der Niederschlagsmenge werden nicht berücksichtigt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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, *Hydrometry — Vocabulary and symbols*

3 Begriffe

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

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

4 Symbole

Symbole	Erläuterungen	Einheiten
α	Koeffizient, der die Auswirkungen einer ungleichförmigen Energie (Geschwindigkeit) in einem Gerinne darstellt	b
$\gamma_{xx}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}$	Winkel zwischen Bootsachsen und der x -Achse	rad
σ	Standardabweichung	a
$\Delta'x, \Delta'y$	Streuung der Messung um den Mittelwert einer Reihe von x - y -Messungen für eine symmetrische Verteilung: $\Delta'x = 0,5 (x_{\max} - x_{\min})$, etc.	a
$\Delta'x^+, \Delta'x^-$	$\pm$ Streuung um den Mittelwert $\bar{x}$ für eine asymmetrische Verteilung von Messungen, wobei $\Delta'x^+ = (x_{\max} - \bar{x})$ und $\Delta'x^- = (\bar{x} - x_{\min})$ ist	a
Δ	kleine Differenz in einer gemessenen Menge $\Delta Q, \Delta h, \Delta T$, usw.	a
$\Delta y, \Delta z$	theoretisch kleine Abstände in der y - und z -Richtung eines Gerinnequerschnittes	m
Dc_2	beim Verdünnungsverfahren die durch Vermischung entstehende Änderung ($c_m - c_b$) der Tracerkonzentration in Strömungsrichtung	mg/l
$A, A(z), A(h)$	Querschnittsfläche (in der y - z -Ebene) der Strömung	m ²
B	Gerinnebreite	m
b	Breite des eingengten Gerinnes oder engste Durchlassbreite des Messkanals	m
c_b	beim Verdünnungsverfahren, die Hintergrundkonzentration des Tracers	mg/l

Symbole	Erläuterungen	Einheiten
c_T	beim Verdünnungsverfahren, die Zuführkonzentration des Tracers	mg/l
c_m	beim Verdünnungsverfahren, die Mischkonzentration des Tracers in Strömungsrichtung	mg/l
C	Durchflusskoeffizient	b
C_v	Geschwindigkeitskoeffizient	b
d_i	Abweichung einer Messung (die i -te Messung einer Reihe) vom Mittelwert dieser Reihe	a
E	Bezugshöhe eines Bereichsmessgeräts	m
$f(h)$	allgemeine Funktion von Parameter h	a
F_x, F_y	auf die Summenbildung der Geschwindigkeits-Flächen-Elemente anzuwendende Fortpflanzungsfaktoren zur Berücksichtigung bei der Näherung des Summenbildungsprozesses an eine wahre Integration kontinuierlich variierender Kenngrößen	b
g	Gravitationskonstante	m/s ²
h	Wassersäule über einer festgelegten Bezugshöhe im Gerinne	m
H	Gesamtwassersäule über einer festgelegten Bezugshöhe im Gerinne	m
i, j	Indizes einer Berechnung $i = 1$ bis n oder $j = 1$ bis m einer Reihe	a
J	Nachweisfaktor einer Fehlmessung	b
K	Konstante einer Gleichung zur Abflussbestimmung für ein Wehr oder einen Messkanal	b
k_1, k_2	Konstante zur Abflussbestimmung mit dem Verdünnungsverfahren	b
M	beim Verdünnungsverfahren, die in die Strömung eingeleitete Tracermasse	g
n	Exponent einer Gleichung zur Abflussbestimmung für ein Wehr oder einen Messkanal	b
n, m	Anzahl von Messungen in einer Reihe	a
$p(x)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion	b
Q	Abfluss	m ³ /s
Q_p	geschätzter Durchfluss dicht an Begrenzungen oder an einem Bereich, in dem die Messung mit den Primärmitteln nicht erfolgen kann	m ³ /s
Q_T	beim Verdünnungsverfahren, Tracerabfluss im Strom	m ³ /s
S	Standardabweichung bei der Probenahme für eine Messreihe	a
t_e	auf eine kleine Anzahl von Proben anzuwendender Faktor, damit die Standardabweichung eine große Anzahl von Proben repräsentieren kann (siehe Anhang A)	b
t_1, t_2	beim Verdünnungsverfahren das Intervall, in dem eine Änderung der Konzentration nachweisbar ist	s
T	absolute Temperatur, in Kelvin	°C
T_n	Grubbs Prüfgröße	°C
$U(x), u(y)$	Unsicherheit gemessener Variablen x, y usw.	a
$u_c(p), u_c(q)$	die kombinierte Unsicherheit ermittelter Ergebnisse p, q usw.	a

Symbole	Erläuterungen	Einheiten
$u^*(x)$	die prozentuale Unsicherheit der Messung einer Menge x	a
U_{95}	auf ein Vertrauensniveau von 95 % erweiterte Messunsicherheit	a
$V_{\bar{x}}$	mittlere Geschwindigkeit durch eine y - x -Ebene, die einen Gerinnequerschnitt des Gerinnes schneidet	m/s
$V_x(y,z)$	Geschwindigkeit in x -Richtung am Punkt y, z im Gerinne	m/s
$\vec{V}$	auf das Gerinne bezogener Vektor der Wassergeschwindigkeit	m/s
$\vec{V}_b$	auf das Gerinne bezogener Vektor der Bootsgeschwindigkeit	m/s
$\vec{V}'$	auf das Boot bezogener Vektor der Wassergeschwindigkeit	m/s
V'_x, V'_y, V'_z	auf das Boot bezogene Komponenten der Wassergeschwindigkeit entlang der Achsen der Bootskoordinaten	m/s
$V'_{bx}, V'_{by}, V'_{bz}$	Komponenten der Bootsgeschwindigkeit in Bezug auf die Bootsachsen	m/s
$\gamma_{xx}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}$	Winkel zwischen Bootsachsen und der x -Achse des Gerinnes	rad
x, y, z	Gerinnekoordinaten	m
x', y', z'	Bootskoordinaten	m
x, y	messbare Variablen	a
^a Die Reihenfolge der Dimensionen hängt von ihrer Bedeutung im Kontext ab. ^b Größe der Dimension Zahl.		

In diesem Dokument bezieht sich der Begriff „Unsicherheit“ auf die Messunsicherheit, und mit den nachstehend aufgeführten Gleichungen wird Folgendes angegeben:

- eine Summe aus n Werten von x , $x_1 + x_2 + x_3 + \dots x_i + \dots x_n = \sum_{i=1}^n x_i$;
- eine Differenz $df(x)$ in der Funktion $f(x)$, aufgrund einer kleinen Änderung Δx am Wert x , $df(x) = \frac{df}{dx} \Delta x$;
- ein Wert eines Integrals F einer Funktion $f(x)$, zwischen $x = x_1$ und $x = x_n$, $F = \int_{x_1}^{x_n} f(x) dx$.

5 ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) — Grundlegende Definitionen und Regeln

5.1 Allgemeines

Der vorliegende Abschnitt fasst die im GUM beschriebenen Verfahren zur Angabe der Messunsicherheit zusammen. Für eine allgemeine Einführung in die Messunsicherheit wird auf Anhang A verwiesen.

5.2 Unsicherheit von Messreihen

Der GUM beschreibt die Messunsicherheit als einen Wert, der die Streuung von Messungen charakterisiert, die einem Ergebnis begründet zugewiesen werden könnte. Der GUM definiert im Weiteren die Standardunsicherheit als Unsicherheit, die als eine Standardabweichung s angegeben wird.

Aus dieser Definition ergibt sich, dass die Unsicherheit nur die natürliche Streuung in einer Reihe von Messergebnissen abbildet. Es sollte daher betont werden, dass die Unsicherheit keine konstanten (systematischen) Abweichungen dieser Messungen vom wahren Wert beschreibt. Die Unterschiede zwischen zufälligen und systematischen Effekten werden in 5.3 näher beschrieben.

So ist für eine Reihe von n Messungen die Unsicherheit auf die Differenz zwischen jedem gemessenen Wert x_i vom Mittelwert $\bar{x}$ der Reihe bezogen. Die Standardabweichung und folglich die Unsicherheit $u(x)$ ist:

$$u(x) = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} [(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{x} - x_3)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2]}$$

dabei ist die Komponente $d_i = \bar{x} - x_i$ die Abweichung der i -ten Messung x_i vom Mittelwert $\bar{x}$.

Oder kürzer:

$$u(x) = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (1)$$

Dabei ist $d_i = \bar{x} - x_i$ die Abweichung der i -ten Messung vom Mittelwert $\bar{x}$, angegeben als Gleichung (2):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Gleichung (1) für die Unsicherheit von x gilt nur für stetige, stationäre stochastische Prozesse, bei denen der Mittelwert und die Standardabweichung des untersuchten Prozesses während des gesamten Messvorgangs unverändert bleiben.

Die Unsicherheit des Mittelwerts $u(\bar{x})$ nimmt mit zunehmender Anzahl der Messungen n ab. Die entsprechende Beziehung im GUM ist als Gleichung (3) angegeben:

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} u(x) \quad (3)$$

Es ist zu beachten, dass Gleichung (3) nur für unkorrelierte Messungen gilt, was bedeutet, dass es keine gegenseitige Beziehung oder Verbindung zwischen diesen Messungen gibt.

5.3 Zufällige und systematische Effekte

Gleichung (3) gilt nur für zufällige Variationen der gemessenen Größe. Dieser zufällige Effekt wird aus den gemessenen Daten bestimmt und wird auf diese Weise nach dem Durchführen einer Reihe von Messungen bewertet. Zufällige Effekte können aus der Analyse historischer Daten oder instrumentell bestimmt werden, wenn es vorgesehen ist, die Daten in Echtzeit zu analysieren. Zufällige Effekte verringern die Unsicherheit im Mittelwert einer Reihe von n unkorrelierten Messungen um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{n}}$. Zufallsbedingungen bestehen oftmals als natürliche Turbulenz. Jedoch kann eine zufällige Variation manchmal durch das Ablesen einer Anzeige auftreten, z. B. bei einem durch eine Person abgelesenen Wasserstand.

Konstante Abweichungen bei den Messungen, die der Messausrüstung oder dem Verfahren innewohnen, werden als „systematische Effekte“ bezeichnet. Sie sollten klar von den hier beschriebenen stochastischen oder zufälligen Abweichungen unterschieden werden, die mit dem Begriff „Unsicherheit“ beschrieben werden. Systematische Effekte können durch die Anwendung von Gleichung (3) nicht verringert werden. Während jeder Messreihe können systematische Effekte üblicherweise als Konstante für die Messvorrichtung angenommen werden. Systematische Komponenten:

- a) sollten als Teil eines Installations- oder Inbetriebnahmeverfahrens bewertet werden, und/oder
- b) können durch den Hersteller für die Vorrichtung im Voraus festgelegt werden. Siehe Abschnitt 9,
- c) können in einigen Fällen durch einen sorgfältigen Vergleich mehrerer unabhängiger Messverfahren festgestellt und quantifiziert werden.

Weitere Informationen zu zufälligen und systematischen Effekten sind in A.6 angegeben.

Bei der Bewertung der Unsicherheit eines kontinuierlichen stochastischen Prozesses wird das Vorhandensein jeglicher unregelmäßiger Effekte ebenfalls als eine zufällige Komponente einbezogen. Dies ist jedoch nur dann zulässig, wenn sich die zu messende physikalische Größe während des Messvorgangs langsam und relativ geringfügig ändert. Ein derartiges Verfahren wird natürlich die Streuung der gemessenen Werte erweitern und ist deshalb der Bewertung der zufälligen Komponente hinzuzurechnen. Diese Variation wird dann ein Teil der Zufälligkeit der Messung. Wenn während des Messvorganges die Änderungsrate und das Ausmaß der Änderung die natürliche Streuung der Messungen wesentlich überschreiten, dann muss das Ergebnis verworfen werden.

5.4 Unsicherheitsmodelle — Wahrscheinlichkeitsverteilungen

In der Hydrometrie erfolgen die Messungen oftmals manuell oder mithilfe automatischer Instrumente. Sie weisen einen Bereich auf, innerhalb dessen die Werte unter gleich bleibenden Bedingungen zufällig variieren können. Wenn sie außerdem eine dem Messprozess innewohnende, stetige Abweichung aufweisen, wird dies als „systematische Komponente“ bezeichnet. Sie wird üblicherweise als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angegeben. Wahrscheinlichkeitsverteilungen haben Standardabweichungen von einem Mittelwert, die, wie oben angegeben, der Standardabweichung diskreter Messungen äquivalent sind. Die Gleichung (1) und Gleichung (2) entsprechende Standardunsicherheit wird in Gleichung (4) und Gleichung (5) angegeben:

$$\bar{x} = \int_{-\Delta x}^{\Delta x} x \cdot p(x) dx \quad (4)$$

und

$$u(x) = \sqrt{\int_{-\Delta x}^{\Delta x} d(x)^2 \cdot p(x) dx} \quad (5)$$

Dabei ist

- $p(x)$ eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion;
- d die Abweichung vom Mittelwert;
- Δx ist die Abstufung von diskreten Messungen.

Weitere Informationen sind in Anhang A angegeben.

5.5 Kombinierte Unsicherheiten — Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten

Der GUM definiert auch eine Regel zum Kombinieren von Unsicherheiten aus mehreren Quellen. Sie wird als das „Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten“ bezeichnet. Für eine Beziehung f zwischen einem Ergebnis y und Variablen $x_1, x_2, \dots, x_n$, definiert als $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ist die kombinierte Unsicherheit $u_c(y)$, von y

$$u_c(y)^2 = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2$$

oder

$$u_c(y)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} u(x_n) \right)^2 \quad (6)$$

dabei sind $x_1, x_2, \dots, x_n$ unabhängige Variablen. Diese lineare Approximation anhand der ersten Ableitungen ist jedoch nur zulässig, wenn die Abweichungen der Variablen x_i im Vergleich zu ihren Mittelwerten relativ klein sind.

Gleichung (6) gilt nur, wenn die Variablen $x_1, x_2, \dots, x_n$ nicht in Wechselbeziehung stehen, d. h., wenn die Variable x_i den Wert ändert, betrifft diese Änderung keine weitere x -Variable. Wenn sich zwei oder mehr x -Variablen beeinflussen (d. h. sie korrelieren), dann besteht eine zusätzliche Komponente der Unsicherheit. Gleichung (6) wird dann zu:

$$u_c(y)^2 = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i x_j) \quad (7)$$

Fast alle Abschätzungen der hydrometrischen Unsicherheit erfordern die Anwendung der vereinfachten Form, d. h. Gleichung (6).

Die Komponenten können zufällig oder systematisch sein. Die Teilableitungen $\frac{\partial f}{\partial x_n}$ werden als „Empfindlichkeitskoeffizienten“ bezeichnet, und $u(x_i x_j) = \text{cov}(x_i x_j)$.

5.6 Angabe der Ergebnisse

Gleichung (6) gibt das Endergebnis als Standardunsicherheit an. Bei der Gaußschen Wahrscheinlichkeit, die als eine Modellverteilung zur allgemeinen Analyse verwendet wird, deckt eine Standardabweichung lediglich 68 % des Bereichs der möglichen Ergebnisse ab. Das bedeutet, dass für ein Ergebnis, angegeben als

$$\text{Abflussrate} = 10,8 \text{ m}^3/\text{s} \pm 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$$

oder

$$Q = \bar{Q} \pm u(Q)$$

lediglich 68 % der Messungen zwischen $10,2 \text{ m}^3/\text{s}$ und $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen. Es kann erwartet werden, dass fast ein Drittel der Messungen außerhalb dieses Bandes liegt. Eine derartige Aussage ist für die Hydrometrie von geringem Wert. Eine bedeutsamere Aussage ist erforderlich, die einen größeren Anteil möglicher Ergebnisse erfasst.

In A.9 wird die erweiterte Unsicherheit definiert. Durch Erweitern des Rahmens der Unsicherheit wird ein größerer Anteil des erwarteten Bereichs von Messungen abgedeckt. Bei der Gaußschen Wahrscheinlichkeitsverteilung kann aufgezeigt werden, dass durch Verdopplung des Unsicherheitsbereichs 95 % der erwarteten Messungen erfasst werden. In Abschnitt A.9 wird die erweiterte Unsicherheit definiert.

Das gleiche Ergebnis, angegeben in der Form:

$$\text{Abflussrate} = 10,8 \text{ m}^3/\text{s} \pm 1,2 \text{ m}^3/\text{s} \text{ im Vertrauensniveau von } 95 \%$$

oder

$$Q = \bar{Q} \pm U_{95}(Q)$$

bedeutet, dass 95 % der Messungen erwartungsgemäß zwischen $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ und $12,0 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen. Hierbei handelt es sich um eine praktikable Angabe des Ergebnisses.

In der Hydrometrie sind alle Messungen im Vertrauensniveau von 95 % mit einer Aussage in der folgenden Form anzugeben:

$$\text{Größe} = \text{Wert} \pm \text{Unsicherheit im Vertrauensniveau von } 95 \%$$

oder

$$\text{Größe} = \text{Wert} \pm \text{prozentuale Unsicherheit im Vertrauensniveau von } 95 \%$$

Weitere Informationen sind in A.9 angegeben.

6 Strömung im offenen Gerinne — Geschwindigkeitsflächen-Verfahren

6.1 Allgemeines

Bild 1 zeigt das in diesem Dokument verwendete Koordinatensystem mit den orthogonalen Achsen x, y, z . Die mittlere Geschwindigkeit wird in x -Richtung berechnet. Die xy -Ebene ist horizontal. Die z -Achse ist senkrecht. Es ist zu beachten, dass ein die mittlere Strömung darstellender Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}$ nicht mit der x -Achse übereinstimmen muss. Die Strömung in dem Gerinne kann aus den Geschwindigkeiten bestimmt werden, die schräg durch eine schneidende yz -Ebene verlaufen.

Der Nullpunkt des Koordinatensystems darf sich an jedem beliebigen, auf das Gerinne bezogenen Punkt befinden, liegt aber typischerweise am Messpunkt der Wehre und Messkanäle oder beim Geschwindigkeitsflächen-Verfahren am Messpegel entlang des Stromes.

Eine Höhenmessung kann z. B. $h(z)$ sein, bestimmt an einem Messpunkt bezogen auf den Koordinatenursprung z_0 des Systems.

Die Bestimmung des Abflusses in offenen Gerinnen erfordert Folgendes:

- a) die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit $\bar{V}_x$ im Gerinneabschnitt; und
- b) die Messung der Querschnittsfläche $A(h)$ in der yz -Ebene, durch die die Strömung fließt; h ist die Wassertiefe.

Das Produkt dieser beiden Größen ist der Abfluss Q .

$$Q = \bar{V}_x A(h)$$

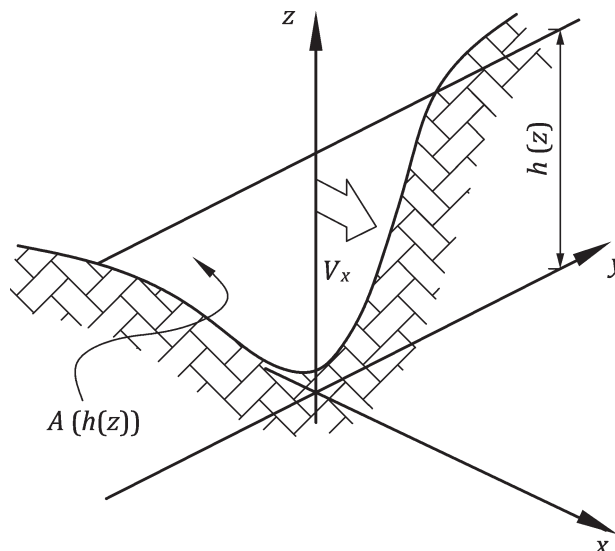


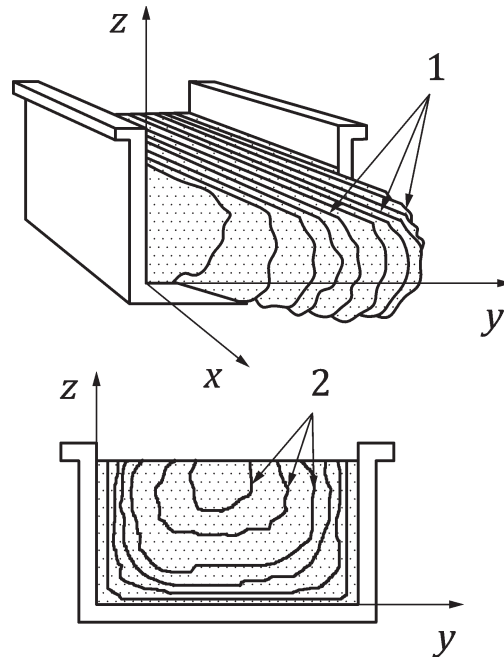
Bild 1 — Koordinatenbeziehung in einem Gerinne-Querschnitt

6.2 Mittlere Geschwindigkeit $\bar{V}_x$

Die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit muss die V_x, y, z -Ungleichförmigkeit in Bezug auf die Lage yz im Gerinne und bezogen auf die Zeit t berücksichtigen. An den Wänden verringert Reibung die Fließgeschwindigkeit auf null, wodurch, wie in Bild 2 gezeigt, Stufengradienten der Geschwindigkeit auftreten. Geschwindig-

keitsgradienten und Scherspannungen innerhalb des Fließkörpers rufen Wirbel hervor, die Turbulenzbedingungen schaffen. Turbulenzen bestehen in einem sich bewegenden Wasserkörper auch dann, wenn die Wasseroberfläche ruhig erscheint.

Die Bestimmung muss folglich über den Querschnitt erfolgen, während die Geschwindigkeitskomponente in der x -Richtung integriert und gemittelt wird. Die Strömung kann gleichförmig sein, und folglich kann $\bar{V}_x$ konstant sein, die Turbulenz verursacht jedoch, dass der lokale Wert von $V_x(y,z,t)$ ungleichförmig ist.



Legende

- 1 Geschwindigkeit in x -Richtung
- 2 Linien gleicher Geschwindigkeit

Bild 2 — Typische Strömungsprofile und -konturen

6.3 Geschwindigkeitsflächen-Bestimmung zur Berechnung des Durchflusses

Die Größe $\bar{V}_x$ wird über das Gerinne aus Geschwindigkeiten V_x, y, z, t an einzelnen Messpunkten bestimmt. In diesem Unterabschnitt wird vorausgesetzt, dass gleichförmige Strömungsbedingungen vorherrschen. Wenn der Abfluss nicht mit der Zeit t während des Integrationsvorganges variiert, dann ist:

$$Q = \int_A \bar{V}_x(y,z) dA \quad (8)$$

Das „arithmetische“ Verfahren der Integration ist die Summierung der Geschwindigkeiten in theoretischen Strömungssegmenten mit definierter Querschnittsfläche.

Dieses erfolgt typischerweise durch Teilung des Querschnitts in eine Anzahl von senkrechten Segmenten mit nachfolgender Messung der Geschwindigkeit in regelmäßigen Abständen entlang der Mittellinie jedes Segments zur Bestimmung der mittleren Segmentgeschwindigkeit. Die Strömung durch das Segment ist die mittlere Geschwindigkeit durch das Segment, multipliziert mit der Segmentfläche. Die Strömungen durch jedes Segment werden summiert und ergeben die Gesamtströmung im Gerinne. Folglich wird Gleichung (8) zu:

$$Q = F_y F_z \sum_1^m \left[\sum_1^n V_x(y_i z_j) \Delta z_j \Delta y_i \right] + Q_p \quad (9)$$

Dabei ist

F_y der Faktor, oftmals als 1 angesetzt, der die diskreten Summierungen in y -Richtung mit der idealen Integration der wahren kontinuierlichen Geschwindigkeitsprofile in Bezug setzt;

F_z der Faktor, oftmals als 1 angesetzt, der die diskreten Summierungen in z -Richtung mit der idealen Integration der wahren kontinuierlichen Geschwindigkeitsprofile in Bezug setzt; und

Q_p der Umfangsabfluss, der den Bereich zwischen den Segmenten und der Gerinnebegrenzung passiert.

Das Summierungsverfahren dividiert die Fläche in $m \times n$ in rechteckige Strömungskuben mit Höhe Δz_j und der Breite Δy_i . Eine Reihe von Δy_i -Strömungskuben ist jedem horizontalen Segment, und eine Reihe von Δz_j -Strömungskuben ist jedem vertikalen Segment zugeordnet. Bei kleinen Werten von m oder n muss den Funktionen F_y und F_z besondere Beachtung geschenkt werden. Die Unsicherheit dieser Faktoren ist systematisch für den Summierungsprozess.

Das Symbol Q_p bezeichnet den Abfluss, der einen Bereich durchströmt, der dicht an der Gerinnesohle, den Gerinnewänden und der Wasseroberfläche besteht, wo die Geschwindigkeit $V_x(y_i, z_j)$ nicht zuverlässig bestimmt werden kann. Dies kann durch die grobe y - z -Auflösung des Messgeräts, das Vorhandensein von steilen Geschwindigkeitsgradienten in einem Grenzbereich oder durch Interferenz von den Gerinnewänden auf die Messeinrichtung (z. B. Sonarreflexionen) bedingt sein. In diesem Grenzbereich wird die Strömung durch Extrapolieren der in dem Strömungskörper ermittelten Geschwindigkeitsprofile abgeschätzt.

6.4 Messung der Geschwindigkeit

Es bestehen zwei Verfahren zum Erfassen von Geschwindigkeitsprofilen:

- Fließgeschwindigkeitsmessgerät, bei dem die Messeinrichtung während der Messung ortsfest zu den Koordinaten x, y, z angeordnet ist; und
- akustisches Doppler-Gerät zum Messen von Strömungsprofilen (en: acoustic Doppler current profiler, ADCP), bei dem sich die Messeinrichtung über dem Gerinne mit bekannter Geschwindigkeit hinweg bewegt.

Einzelheiten zur Bestimmung der Geschwindigkeit anhand von Fließgeschwindigkeitsmessgeräten und von schwimmenden Booten mit ADCP sind in Anhang F angegeben.

6.5 Unsicherheit im Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsflächenverfahren

6.5.1 Allgemeines

Gleichung (9) kann auf Punktmessverfahren für die Geschwindigkeit angewendet werden, z. B. rotierende Elemente (Flügelrad), elektromagnetische Verfahren (EM), Ultraschall-Doppler-Verfahren oder Verfahren mit schwimmenden Booten, hauptsächlich akustische Doppler-Geräte zum Messen von Strömungsprofilen (ADCP). Jedes Segment $\Delta y_i, \Delta z_j$ verfügt über einen Anteil Flächenunsicherheit, addiert zu der Unsicherheit jeder Geschwindigkeitsbestimmung $V_x(y, z)$.

Es besteht auch eine Unsicherheit in Zusammenhang mit den Faktoren F_y und F_z , die die diskreten Summierungen in der y - und z -Richtung im Vergleich mit der theoretischen Integration kontinuierlich wahrer Geschwindigkeitsprofile in Verbindung bringen. Die Symbole F_y und F_z können auch Effekte auf den Integrationsprozess der Unstetigkeit von $V_x(y, z, t)$ ausüben.

Die allgemeine Beziehung der Unsicherheit wird aus Gleichung (6) und Gleichung (7) abgeleitet. Zu Beispielen kombinierter Unsicherheiten, siehe Anhang A.

Als Ausdruck von Unsicherheiten wird Gleichung (9) zu:

$$\begin{aligned} u(Q)^2 = & \left[\sum_i^m \sum_j^n V_x(y_{iz_j}) \Delta y_i \Delta z_j \right]^2 \left[u^*(F_y)^2 + u^*(F_z)^2 \right] + \\ & \sum_i^m \sum_j^n \left[V_x(y_{iz_j}) \Delta y_i \Delta z_j \right]^2 u^*[V_x(y_{iz_j})]^2 + \sum_i^m \left[\Delta y_i^2 \cdot \left\{ \sum_j^n V_x(y_{iz_j}) \Delta z_j \right\}^2 \cdot u^*(\Delta y_i)^2 \right] + \\ & \sum_j^n \left[\Delta z_j^2 \cdot \left\{ \sum_i^m V_x(y_{iz_j}) \Delta y_i \right\}^2 \cdot u^*(\Delta z_j)^2 \right] + u(Q_p)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Dabei ist

- $u^*(F_y)$ die prozentuale Unsicherheit, zugehörig der Integration eines kontinuierlichen Geschwindigkeitsprofils durch Summierung diskreter Bestimmungen auf einer Linie in y-Richtung;
- $u^*(F_z)$ die prozentuale Unsicherheit, zugehörig der Integration eines kontinuierlichen Geschwindigkeitsprofils durch Summierung diskreter Bestimmungen auf einer Linie in z-Richtung;
- $u^*[V_x(y_{iz_j})]$ die Gesamt-Unsicherheit der Geschwindigkeitsbestimmung.

Dazu gehört:

$$u^*[V_x(y_{iz_j})]^2 = u_k^*[V_x(y_{iz_j})]^2 + u_r^*[V_x(y_{iz_j})]^2 \quad (11)$$

Dabei ist

- u_k^* die in einem Kalibrierzertifikat festgelegte Unsicherheit des Geschwindigkeitsmessgeräts. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Wert von u_k^* um einen systematischen Effekt handelt, der sich mit V_x ändern kann. u_r^* ist eine Komponente der Unsicherheit, die mit dem unstetigen Abflussverhalten im Gerinne zusammenhängt, siehe unten;
- $u^*(\Delta y_i)$ die prozentuale Messunsicherheit der Gesamtbreite der zum Festlegen der Gerinnebreite verwendeten Mittel und Verfahren.

Der gleiche Prozentsatz kann auch auf einzelne Segmente angewendet werden. Folglich ist

$$u^*(\Delta y_i) = u^*(B) \quad (12)$$

oder kann für jedes Segment einzeln abgeschätzt werden.

- $u^*(\Delta Q_p)$ die geschätzte Unsicherheit des Abflusses, der den Bereich außerhalb der Segmente passiert;
- $u^*(\Delta z_j)$ die Messunsicherheit der Tiefenmessung aus dem Gerät und dem Verfahren, die zur Bestimmung der Segmenttiefe verwendet werden.

Dazu gehört:

$$u^*(\Delta z_j)^2 = u_k^*(\Delta z_j)^2 + u_d^*(\Delta z_j)^2 + u_r^*(\Delta z_j)^2 \quad (13)$$

Dabei ist

- $u_k^*(\Delta z_j)$ der durch ein Kalibrierzertifikat festgelegte systematische Effekt des Tiefenmessgeräts. Es ist zu berücksichtigen, dass sich der Wert von $u_d^*(\Delta z_j)$ mit $h(z)$ ändern kann;
- $u_d^*(\Delta z_j)$ die Unsicherheit der Bezugspunkteinstellung des Tiefenmessgeräts;
- $u_r^*(\Delta z_j)$ eine Zufallskomponente der Unsicherheit (siehe 6.5.1.2).

6.5.2 Zufällige und systematische Effekte

Zufällige Effekte werden durch das Sammeln von Datensätzen ermittelt, aus denen eine Standardabweichung mithilfe von Gleichung (1) oder Gleichung (3) bestimmt werden kann. Dies gilt für die Geschwindigkeitskomponente $u^* [V_x (y_i z_j)]$ und die Wassertiefe $u^* (z_j)$ im Gerinne.

Systematische Effekte sind $u^* (F_y)$, $u^* (F_z)$, $u_k^* (\Delta z_j)$ und $u_d^* (\Delta z_j)$, für die eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die Streuung der realen Messwerte erforderlich sind. Siehe Abschnitt 9.

Zu weiteren Angaben über zufällige und systematische Effekte, siehe Anhang A.

Ein mögliches Verfahren zur Berücksichtigung und Bestimmung von ADCP-Unsicherheiten ist in Anhang F angegeben.

6.6 Integrationsunsicherheiten $[u^* (F_y), u^* (F_z)]$

6.6.1 Allgemeines

ISO 748:— [3], Anhang E, enthält Tabellen mit Werten für $u^* (F_y)$ und $u^* (F_z)$, wobei in ISO 748:—, Tabelle E.4, die Werte der Integrationsunsicherheiten für einen Zahlenbereich der Punktmessung innerhalb eines Segments und in ISO 748:—, Tabelle E.6 die Werte der Integrationsunsicherheiten für einen Zahlenbereich von Segmenten in dem Gerinne angegeben werden.

Diese Tabellen sind in Gleichung (9) und in den von dieser Gleichung abgeleiteten anzuwenden.

6.6.2 Unsicherheiten bei vertikal bewegter Messeinrichtung

Hersteller von Anlagen zum Ermitteln und Integrieren von Geschwindigkeitsprofilen in vertikalen Abschnitten des Abflusses müssen bereitstellen:

- a) $u^* (F_z)$: Eine Kalibrieraussage, Abschätzungen der Messunsicherheit, abgeleitet mittels Formeln auf der Grundlage verifizierbarer Streuungen der Messung und Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Übereinstimmung mit 9.3 in Form zweidimensionaler, vollständig entwickelter Geschwindigkeitsprofile mithilfe der Durchschnittsgeschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit;
- b) Ultraschall-Doppler- und Echokorrelationsverfahren müssen eine Aussage zu den Partikeleigenschaften enthalten, für die die Unsicherheitsaussage gilt;
- c) $u^* (F_y)$: Eine oder mehrere vertikale Messreihen sind horizontal zu extrapolieren, um ein Geschwindigkeitsprofil für das Gerinne festzulegen. Dies kann durch Modellieren des Gerinneprofiles, üblicherweise eine parabelförmige Beziehung, mithilfe eines Exponenten n erfolgen. Die den Exponenten n festlegenden Faktoren schließen ein:
 - 1) Gerinnelänge, Geometrie und Flächenverhältnis;
 - 2) Rauheit der Gerinnewand;
 - 3) Reynolds-Zahl der Strömung im Gerinne.

Lieferanten einer derartigen Ausrüstung müssen Daten entsprechend ISO 748, Tabelle E.4, für das von ihnen empfohlene Verfahren der Interpolation/Extrapolation bereitstellen und einen entsprechenden Bereich von oben aufgelisteten Faktoren berücksichtigen.

6.6.3 Unsicherheiten bei horizontalen Messreihen

Hersteller von Anlagen zum Erfassen und Integrieren von Geschwindigkeitsprofilen in horizontalen Abschnitten durch die Strömung müssen bereitstellen:

- a) $u^*(F_z)$: Eine Kalibrieraussage, Abschätzungen der Messunsicherheit, abgeleitet mittels Formeln auf der Grundlage verifizierbarer Streuungen der Messung und Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Übereinstimmung mit 9.3 in Form zweidimensionaler, vollständig entwickelter Geschwindigkeitsprofile mithilfe der Durchschnittsgeschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit;
- b) $u^*(F_y)$: Eine oder mehrere horizontale Messreihen sind vertikal zu extrapolieren, um ein Geschwindigkeitsprofil für das Gerinne festzulegen. Dies kann durch Modellieren des Gerinneprofiles, üblicherweise eine parabelförmige Beziehung, mithilfe eines Exponenten n erfolgen. Die den Exponenten n festlegenden Faktoren schließen ein:
- 1) Gerinnelänge, Geometrie und Flächenverhältnis;
 - 2) Rauheit der Gerinnewand;
 - 3) Reynolds-Zahl der Strömung im Gerinne.

Lieferanten einer derartigen Ausrüstung müssen Daten entsprechend ISO 748:—, Tabelle E.4, für das von ihnen empfohlene Verfahren der Interpolation/Extrapolation bereitstellen und einen entsprechenden Bereich von oben aufgelisteten Faktoren berücksichtigen.

6.7 Unsicherheiten der Umfangsströmung $u(Q_p)$

Das Geschwindigkeitsflächenverfahren gilt für den Hauptteil des Querschnitts, den Teil, in dem die Geschwindigkeit innerhalb der Grenzen der Unsicherheit für das verwendete Gerät messbar ist. Die Messungen eines derartigen Gerätes sind im Grenzbereich oder bei hoher Scherspannung zu verwerfen.

In diesen Fällen ist die Geschwindigkeit mit anderen Mitteln abzuschätzen. Diese sind in den entsprechenden Normen für das zutreffende Verfahren beschrieben.

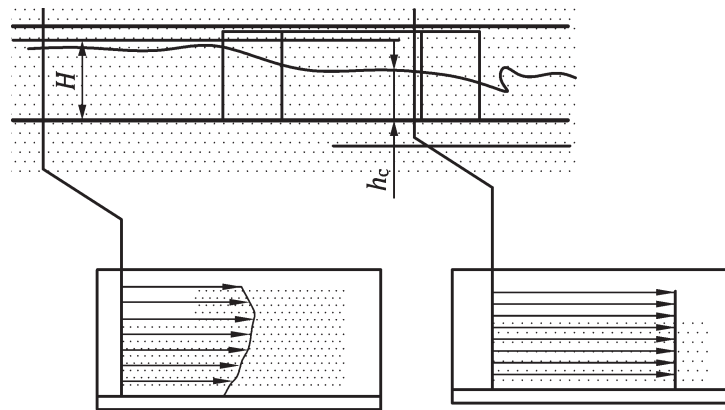
Die Abschätzung der Unsicherheit ist in diesen Bereichen problematisch. Jede Aussage muss die kritischen Gedanken enthalten, auf denen die Abschätzung basiert. Es ist unwahrscheinlich, dass Unsicherheiten unter 20 % für die gesamte Umfangsströmung begründet werden können. Ein normativer Wert von 40 % kann als sichere Abschätzung angenommen werden, außer wenn es einen Beweis für das Gegenteil gibt.

Derartige Abschätzungen können die abgeschätzte Unsicherheit des Hauptanteils der Strömung überlagern. Um den Effekt von $u(Q_p)$ auf $u(Q)$ zu minimieren, sollte ein Gerät verwendet werden, das den Umfangsbereich minimieren kann. Dieses hat auch den Effekt, die Durchschnittsgeschwindigkeit mit der Umfangsfläche zu minimieren und somit auch Q_p .

7 Strömung im offenen Gerinne — Kritische Tiefenverfahren

7.1 Allgemeines

Wenn die Strömung eine hydrometrische Einrichtung, ein Messkanal-Wehr oder eine Rinne passiert, besteht eine eindeutige Beziehung zwischen dem Wasserpegel stromaufwärts und der Strömung, und diese Beziehung ist in großem Maße unabhängig von dem sich der Messeinrichtung nähernden Geschwindigkeitsprofil und den Bedingungen stromabwärts. Die Analyse zeigt, dass durch Beschleunigen der Strömung an einer hydrometrischen Einrichtung die Geschwindigkeitsverzerrungen außerordentlich verringert werden und dass für die Praxis die Geschwindigkeiten ein geometrisch gleichmäßiges Muster für jede Klasse von Wehren oder Messkanälen annimmt. Dieses wird in Bild 3 für einen rechteckigen Messkanal dargestellt.



Legende

H Pegelhöhe im Zulauf

h_c kritische Tiefe

Bild 3 — Wasseroberflächenprofil und Geschwindigkeitsprofile, die typisch für einen rechteckigen Messkanal sind

Eine einheitliche Beziehung besteht zwischen dem Wasserpegel stromaufwärts, dem Querschnitt der beschleunigten Strömung und der Durchschnittsgeschwindigkeit in dem beschleunigten Bereich. Diese Beziehung ist die Grundlage für das Verfahren der kritischen Tiefe.

7.2 Bestimmung der Pegelhöhe und Geometrie

Mittels der Theorie der kritischen Tiefe kann die Strömung durch einen Messkanal oder über ein Wehr anhand von Gleichung (14) angegeben werden:

$$Q = KC_v C b h^m \quad (14)$$

Dabei ist

K die Konstante;

C der vorherbestimmte Koeffizient für die Kalibrierung oder den Abfluss;

C_v der Geschwindigkeitskoeffizient;

b ein geometrischer Maßstabsfaktor, also die effektive Breite in der Gleichung für das Wehr;

h der Wasserstand;

m eine Kenngröße mit einem Normalwert von $m = 1,5$ für rechteckige Querschnitte und $m = 2,5$ für v-förmige Querschnitte.

Die Angabe der Unsicherheit für Gleichung (14) folgt dem in Anhang A für eine Gleichung vom Typ $r = Bxy^m$ angegebenen Beispiel:

$$u^*(Q)^2 = u^*(C)^2 + u^*(C_v)^2 + u^*(b)^2 + [n \cdot u^*(h)]^2 \quad (15)$$

Die Komponente C_v wird definiert als:

$$C_v = \left(\frac{H}{h} \right)^{1,5} \quad (16)$$

Dabei ist H die Pegelhöhe im Zulauf.

In bestehenden Normen wird der Wert $u^*(C_v)$ mit null angenommen. Dieses ist auch der Fall in der vorliegenden Fassung des HUG, die Größe $u^*(C_v)$ sollte jedoch nicht als vernachlässigbar klein bewertet werden. Verwiesen wird auf 7.3 mit Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit der Energieverteilung in dem Gerinne α .

Gleichung (16) kann nicht direkt angewendet werden, da es sich bei H um keine direkt messbare Größe handelt (außer wenn die hydrometrische Einrichtung unmittelbar stromabwärts eines Staubeckens liegt). Die Pegelhöhe und folglich h_1 ist im Wesentlichen konstant, nachdem die Strömung auf geradem Weg eine kurze Entfernung überwunden hat. Aus diesem Grund ist es übliche Praxis, h_1 zu messen und anschließend H zu berechnen aus:

$$H = h_1 + \alpha \frac{\bar{V}_{x1}^2}{2g} \quad (17)$$

Dabei ist

$\bar{V}_1$ die mittlere Zuflussgeschwindigkeit;

h_1 der Wasserstand im Gerinne stromaufwärts;

α ein auf die Geschwindigkeitsverteilung bezogener Koeffizient im Gerinnezulauf, definiert als massengewichtete Beziehung:

$$\alpha = \frac{1}{\bar{V}_{x1}^3} \frac{1}{A_1} \int_{A_1} [V_{x1}(y,z)]^3 dA_1 \quad (18)$$

Dabei ist

α auf eine ungleichförmige Verteilung der Geschwindigkeit im Gerinnezulauf bezogen.

7.3 Iterative Berechnung

In Gleichung (17) wird $\bar{V}_{x1}$ abgeleitet aus der Beziehung:

$$\bar{V}_1 = \frac{Q}{A_1(h_1)} \quad (19)$$

Da $\bar{V}_{x1}$ eine Funktion des Abflusses Q ist, können diese Gleichungen nur durch Iteration gelöst werden. Der Prozess beginnt mit dem Festlegen von $H = h_1$ (dabei ist h_1 die gemessene Größe), dann folgt die Berechnung von Q aus Gleichung (14) und anschließend von $\bar{V}_1$ aus Gleichung (19) und danach die erneute Abschätzung von H aus Gleichung (17) mit α vor dem Wiederholen des Zyklus. Der Prozess wird fortgesetzt, bis konvergierende Werte für H und für $\bar{V}_1$ für die gegebene Messgröße h_1 erreicht sind.

7.4 Bewertungsunsicherheit

Gleichung (15) definiert die Beziehung zur Ermittlung von $u^*(Q)$ für ein Wehr, einen Messkanal oder eine Rinne.

$u^*(C)$ Der Wert $u^*(C)$ wird durch die Eigenschaften der einzelnen hydrometrischen Einrichtung definiert und wird in Internationalen Normen für jede einzelne hydrometrische Einrichtung angegeben. Er quantifiziert einen systematischen Effekt durch das Typ-B-Verfahren, das üblicherweise in hydrometrischen Normen im Vertrauensniveau von 95 % als eine Gaußsche Verteilung angegeben wird. Der Wert ist auf ein Vertrauensniveau von 68 % umzuwandeln (d. h. der halbe Wert), bevor dieser zur Berechnung der Unsicherheit verwendet werden kann. Der Wert von $u^*(C)$ variiert mit dem Wasserstand h und steigt schrittweise an mit Verringerung von h .

- $u^*(C_v)$ In der vorliegenden Fassung des HUG ist $u^*(C_v) = 0$ (dies kann für Strömungen mit einer hohen Zulaufgeschwindigkeit unter Umständen nicht gerechtfertigt sein).
- $u^*(b)$ Diese Größe stellt die Unsicherheit der Geometrie der hydrometrischen Einrichtung wie der Durchlassbreite, der Kronenlänge und der horizontalen Ausrichtung, des V-Winkels usw. dar. Der Wert wird durch Messung bestimmt und sollte als eine Streuung und Wahrscheinlichkeitsverteilung angegeben werden.
- $u^*(h)$ Der Wert der Messunsicherheit des Wasserstandes steht im Zusammenhang mit dem Typ des verwendeten Messsystems (schwimmend, Ultraschall usw.). Verwiesen wird auf Abschnitt 9. Der Wert wird der Herstellerspezifikation entnommen und ist als Wahrscheinlichkeitsverteilung und Streuung von h festgelegt.

Der Wert von $u^*(h)$ muss eine Komponente der Bezugspunkt-Unsicherheit einschließen.

Die prozentuale Messunsicherheit des Wasserstandes nimmt stufenweise zu, so wie sich der Wasserstand zu null annähert.

m Eine Konstante, d. h. der Exponent von h aus Gleichung (14).

8 Verdünnungsverfahren

8.1 Allgemeines

Es gibt zwei Verdünnungsverfahren:

- 1) ein Verfahren, das eine kontinuierliche Zuführung einer Tracersubstanz mit bekannter Konzentration beibehält, wobei der Abfluss durch das Verhältnis der bekannten Konzentration mit einer gemessenen vollständig vermischten Konzentration im Strom bestimmt wird;
- 2) ein Verfahren, das den Abfluss aus der Verdünnung einer dem Strom unverzüglich zugesetzten bekannten Tracermasse bestimmt, wobei der Abfluss durch Integration der Mischkonzentration des Tracers bestimmt wird, um dessen mittlere Verdünnung zu ermitteln.

Beide Verfahren sind auf die Strömung angewiesen, die den Tracer zwischen dem Punkt der Tracerzugabe und dem Punkt, an dem dessen Konzentration gemessen wird, gründlich mischt.

8.2 Kontinuierliche Zuführung

Der Abfluss Q in der Strömung wird bestimmt durch:

$$Q = Q_T k_1 k_2 \frac{c_T - c_m}{c_m - c_b} \quad (20)$$

Dabei ist

Q_T der Abfluss des Tracers in der Strömung;

c_b die Hintergrundkonzentration der Tracersubstanz im Gewässer;

c_T die Einleitungskonzentration des Tracers;

c_m die Mischkonzentration des Tracers stromabwärts;

k_1 ein Mischfaktor (annähernd 100 %);

k_2 ein Faktor (annähernd 100 %), der für jeden Abbau des Tracers in Kontakt mit dem Fließgewässer verantwortlich ist.

Siehe Bild 4.

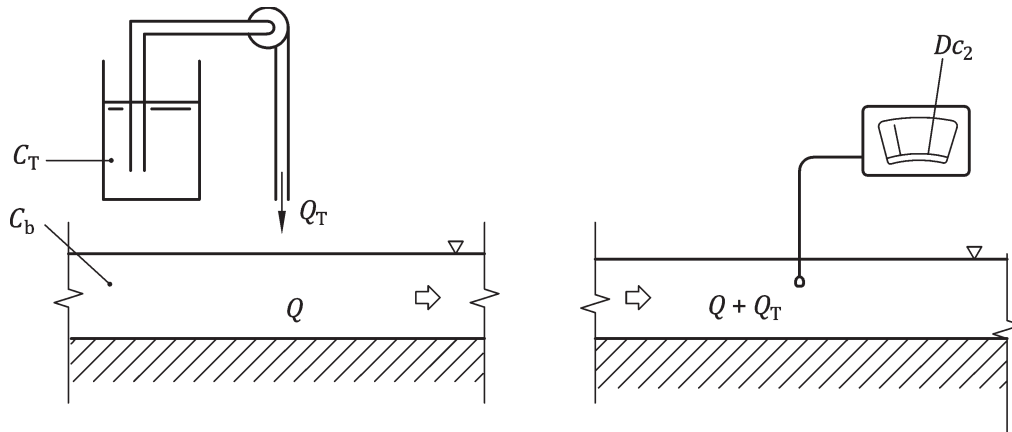


Bild 4 — Verfahren der Verdünnung durch kontinuierlichen Zulauf

Die Bezugspunktunsicherheit der Messkonzentration Dc_2 kann ausgeschaltet werden, wenn die Differenz zwischen der Mischkonzentration im Gewässer c_m und dessen Hintergrundwert c_b gemessen wird: $Dc_2 = c_m - c_b$. Wenn die Hintergrundkonzentration im Vergleich zur Einleitungskonzentration sehr niedrig ist, d. h. $c_b \ll c_T$, dann wird Gleichung (20) zu:

$$Q = Q_T k_1 k_2 \frac{c_T - Dc_2}{Dc_2} \quad (21)$$

Zum Zweck der Abschätzung der Unsicherheit kann Gleichung (21) durch folgende Annahme weiter vereinfacht werden, dass $c_T \gg c_m$, woraus folgt, dass:

$$u^*(Q)^2 = u^*(Q_T)^2 + u^*(k_1)^2 + u^*(k_2)^2 + u^*(c_T)^2 + u^*(Dc_2)^2 \quad (22)$$

Der Wert aller gemessenen Konzentrationen ist aus einer früheren Kalibrierung mithilfe der in Abschnitt 10 beschriebenen Verfahren tabellarisch darzustellen. Der Wert von $u^*(c_T)$ kann mit der gemessenen Konzentration c variieren.

8.3 Massenänderung

Der Abfluss Q in der Strömung wird bestimmt durch Gleichung (23):

$$Q = \frac{M}{k_1 k_2 \int_{t_1}^{t_2} (Dc_2) dt} \quad (23)$$

Dabei ist

M die Masse des in das Gewässer eingeleiteten Tracers;

Dc_2 die stromabwärts veränderte Mischkonzentration ($c_m - c_b$) des Tracers;

k_1 ein Mischfaktor (annähernd 100 %);

k_2 ein Faktor (annähernd 100 %), der für jeden Abbau des Tracers in Kontakt mit dem Gewässer verantwortlich ist.

t_1, t_2 das Intervall, in dem eine Konzentrationsänderung nachweisbar ist.

Siehe Bild 5.

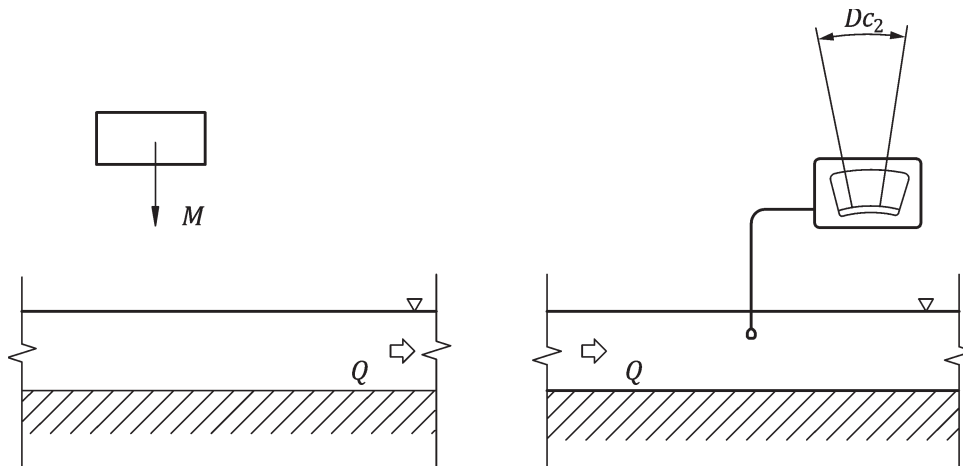


Bild 5 — Verfahren der Verdünnung durch eine Massenänderung

Aus Gleichung (23):

$$Q = \frac{M}{k_1 k_2 S} \quad (24)$$

Dabei ist

S die Summe des Produkts aus Konzentration und Zeitabschnitt, wie in Gleichung (25) angegeben:

$$S = \sum_{i=1}^N Dc_{2i} \Delta t_i \quad (25)$$

und

N die Anzahl der Summenintervalle;

Δt_i der Zeitabschnitt. Für gleiche Zeitabschnitte gilt: $\Delta t_i = \frac{(t_2 - t_1)}{N}$.

Daraus folgt, dass:

$$u^*(Q)^2 = u^*(M)^2 + u^*(k_1)^2 + u^*(k_2)^2 + u^*(S)^2 \quad (26)$$

und

$$u^*(S)^2 = u^*(\Delta t)^2 + \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^N Dc_{2i}} \sum_{i=1}^N Dc_{2i} \right)^2 \quad (27)$$

9 Hydrometrische Ausrüstung

9.1 Leistungsspezifikationen

Zur Einschätzung des Vertrauensniveaus einer Messausrüstung ist es erforderlich, die durch den Hersteller festgelegte Leistung zu verifizieren. Eine einfache Aussage zur Unsicherheit ist weniger leicht nachzuprüfen

als die gleichwertige Aussage, mit der die Messwertstreuung $\Delta'x$ zusammen mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert wird. Übliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 — Wahrscheinlichkeitsverteilung

Wahrscheinlichkeitsverteilung	Unsicherheit	Abgeleitet von Anhang A
Dreieckig	$u(x) = \frac{1}{\sqrt{6}}\Delta'x$	Gleichung (A.8)
Rechteckig	$u(x) = \frac{1}{\sqrt{3}}\Delta'x$	Gleichung (A.8)
Bimodal	$u(x) = \Delta'x$	Gleichung (A.8)
Tabellarische Verteilung	$u(x) = u^*(\text{Tabelle})\Delta'x$	Gleichung (A.5)

Bezüglich der Ableitung der in Tabelle 1 angegebenen Beziehungen wird auf Anhang A, insbesondere A.2 und A.3, verwiesen. Die Formen der dreieckigen und rechteckigen Verteilungen sind in Bild A.2 dargestellt.

9.2 Gültigkeit von Unsicherheitsaussagen

Die hydrometrische Ausrüstung wird sowohl im Laboratorium als auch im Außeneinsatz verwendet. Nicht alle Geräte sind für den Außeneinsatz geeignet, da extreme Umweltbedingungen einen Einfluss auf die Messleistung haben können. Nur für den Einsatz im Laboratorium vorgesehene Geräte sollten nicht im Außeneinsatz verwendet werden. Aus diesem Grund muss eine Produktspezifikation zusätzlich zur Angabe der Messunsicherheit eine Aussage enthalten, die die Betriebsumgebung festlegt, in der die Unsicherheiten gelten. Damit wird sichergestellt, dass die geforderte Unsicherheit für Zwecke der Hydrometrie wirklichkeitsnah ist.

Eine Aussage zur Validität muss alle bekannten Einflüsse auf die Messleistung aufführen, die die Messunsicherheit bei einer Vertrauensgrenze von 68 % um mehr als 0,2 % erhöhen kann (oder 0,4 % bei einer Vertrauensgrenze von 95 %). Faktoren, die allen Umweltmessungen eigen sind, müssen wie in dem Beispiel in Tabelle 2 angegeben werden:

Tabelle 2 — Umweltfaktoren

Umweltfaktor	Auswirkung	Aussage zur Unsicherheit	Streuung oder (Unsicherheit)
Eis	Ja	Messung ungültig	
Regenfall	Ja	Rechteckige Wahrscheinlichkeitsverteilung	0,4 %
Schneefall	Ja	Messung ungültig	
Luftfeuchte	Ja	Dreieckige Wahrscheinlichkeitsverteilung	0,2 %
Temperatur	Nein		
Windgeschwindigkeit	Ja	Rechteckige Wahrscheinlichkeitsverteilung	0,3 %
Sonnenstrahlung	Ja	Nicht klassifizierte Wahrscheinlichkeitsverteilung	(0,1 % Unsicherheit)
Wasseroberflächenwellen	Ja	Rechteckige Wahrscheinlichkeitsverteilung	15 % Wellenhöhe
Wassertrübung	Nein		
Wasseroberflächenaktive Stoffe	Nein		

Für den Fall, dass eine Kombination von Faktoren die Messleistung beeinträchtigt, während die gleichen Faktoren einzeln dies nicht tun; es sind die Faktoren anzugeben, die in Kombination gelten.

Sofern der Einfluss eine nicht klassifizierte Wahrscheinlichkeitsverteilung bedingt, muss der Hersteller ein Verfahren angeben, um die angegebene Unsicherheit mit anderen Komponenten der Messunsicherheit zu kombinieren.

Sofern der Messprozess eines Produktes auf Umwelt- und sonstige Faktoren, wie in dem oben gezeigten Beispiel angegeben, empfindlich reagiert, sind derartige Informationen an einem repräsentativen Beispiel der Messleistung bei Vorhandensein dieser Einflüsse auszuführen.

Die hydrometrische Ausrüstung muss die Mittel für und/oder zur Beschreibung eines Nachweisverfahrens der Leistung haben, um sicherzustellen, dass die Leistung eines Messsystems in der Umgebung verifiziert werden kann, in der diese aufgestellt wird.

9.3 Herstellerspezifikationen

Die Darstellung der Messleistung des Gerätes erfordert ein einheitliches Bewertungssystem, damit ein Produkt mit einem anderen oder ein Messsystem mit einem anderen verglichen werden kann.

Die Festlegung der Messleistung muss die Vertrauensgrenze, auf die sie sich bezieht, klar angeben. Dies kann in Form der Standardunsicherheit erfolgen. In diesem Fall ist die Vertrauensgrenze von 68 % anzugeben oder üblicherweise darf die Angabe bei einer Vertrauensgrenze von 95 % erfolgen.

Die Vertrauensgrenze von 95 % ist normativ für hydrometrische Leistungsfestlegungen.

Es ist zu beachten, dass, bevor man die Typ-A- oder Typ-B-Abschätzungen mit Unsicherheitswerten bei einer Vertrauensgrenze von 95 % kombiniert, diese Werte zuerst durch einen Erweiterungsfaktor k (üblicherweise ist $k = 2$) auf Werte für eine Vertrauensgrenze von 68 % konvertiert werden müssen. Das daraus resultierende Ergebnis kann dann auf eine Vertrauensgrenze von 95 % durch den Erweiterungsfaktor $k = 2$ erweitert werden.

Systematische Effekte (Fehler) werden in der Regel durch Messgeräte verursacht, die falsch kalibriert sind oder falsch verwendet werden.

Die Ermittlung systematischer Effekte erfolgt durch wiederholte Messungen unter gleich bleibenden Bedingungen. Die Standardabweichung eines Satzes „statischer“ Messungen definiert die systematische Komponente der Messunsicherheit des Gerätes.

Diese Spezifikation fordert eine Angabe der maximalen und minimalen Nennleistung des Geräts. Die maximale Nennleistung wird dann verwendet, um 25 %, 50 % und 75 % der maximalen Nennleistungen zu definieren. Für jede dieser fünf Nennleistungen wird eine Messunsicherheit für das Produkt festgelegt.

Diese müssen das in Tabelle 3 dargestellte Muster einhalten.

Tabelle 3 — Maximale und minimale Nennleistungen

		Wahr- scheinlich- keitsver- teilung	Entsprechende Streuung der Messung				
			min.	25 % max.	50 % max.	75 % max.	max.
Messwerte des Instruments							
Messunsicherheit (%)							
Umweltfaktor	1						

Tabelle 3 (*fortgesetzt*)

		Wahr- scheinlich- keitsver- teilung	Entsprechende Streuung der Messung				
			min.	25 % max.	50 % max.	75 % max.	max.
Umweltfaktor	2						
Umweltfaktor	3						
usw.							
Gesamtunsicherheit der Messung (%)							

Der Hersteller muss eine Tabelle mit weiteren Spalten zur Verfügung stellen, wenn die Kennziffer der Unsicherheit durch fünf Punkte (durch lineare Interpolation) nicht angemessen interpoliert werden kann.

9.4 Leistungsleitfaden für hydrometrische Geräte zur Anwendung in technischen Standardbeispielen

Beispiele werden in Tabelle D.1 gegeben.

Viele der in Tabelle D.1 angegebenen Werte sind vorläufig. Sie sind als Leistungsrichtschnur für die Technologie vorgesehen. Die Werte sind durch allgemeine Übereinstimmung zwischen den Anwendern festzulegen und sollten für den großen Bereich der zur Verfügung stehenden Geräte repräsentativ sein. Ein formales Prüfprogramm kann erforderlich sein, um die Tabelleneinträge zu ermitteln.

Bei Anwendung von Tabelle D.1 ist Folgendes zu beachten:

- a) Die prozentuale Unsicherheit für die Messung der Wasserstände kann durch den Gerätehersteller nicht festgelegt werden. Sie ist aus einer Beziehung in folgender Form abzuleiten:

$$u^*(h) = \sqrt{\frac{u(E)^2 + u(h_1)^2}{h}}$$

Dabei ist $u(E)$ die Unsicherheit der relativen Bezugsgröße.

$$u^*(h) = \sqrt{\frac{u(E)^2 + u(R)^2}{h}}$$

Dabei ist $u(R)$ die Unsicherheit des Bereichs/der Erweiterung.

- b) Die Leistungszahlen gehen von einer präzisen Kompensation der Temperatureffekte auf die Schallgeschwindigkeit aus. Die folgende Formel ist eine praktische Annäherung:

$$u = 20,08\sqrt{T}$$

Dabei ist

u die Schallgeschwindigkeit;

T die absolute Lufttemperatur.

- c) Sofern unstetige Bedingungen bestehen, ist eine zeitabhängige Komponente der Unsicherheit zu definieren. Eine Ausrüstung ohne diese Fähigkeit muss eine Angabe des Herstellers zur Unsicherheit in Bezug auf unstetige Bedingungen erforderlich machen.

10 Anleitung zur Aufstellung von Abschnitten über Unsicherheit in Normen der Hydrometrie

10.1 Allgemeines

Der Hauptzweck des vorliegenden Dokuments besteht darin, die Aufstellung hydrometrischer Normen zu vereinfachen, sodass diese die Anforderungen des GUM erfüllen. Dieses ist eine wesentliche Aufgabe: Die Veröffentlichung des HUG ist nur ein Teil.

In Übereinstimmung mit früheren Erfahrungen in der Hydrometrie, muss die Angabe des Ergebnisses einer Abschätzung der Unsicherheit bei einer Vertrauensgrenze von 95 % erfolgen. Man muss jedoch beachten, dass bei kombinierten Unsicherheiten die Verfahren der Typ-A- und Typ-B-Abschätzungen Unsicherheiten aus einer Vertrauensgrenze von 68 % ableiten, und dass die Leistung einer Messeinrichtung normalerweise bei einer Vertrauensgrenze von 95 % beginnt.

Diese Gegebenheit muss hervorgehoben werden und wird durch Beispiele in den angegebenen Abschnitten über Unsicherheiten aufgezeigt.

Die Messleistung ist ausschließlich in der in Tabelle 3 ausgeführten Weise anzugeben.

Normen, die eine Einteilung der Messleistung in Kategorien wie Klasse 1, Klasse 2 usw. vorgenommen haben, sind nicht geeignet. Einteilungen in Klassen können zu Verwirrungen und somit zu einer geringen Auswahl an Geräten führen. Ein fachliches Verständnis ist erforderlich, um das geeignete Gerät und Verfahren auszuwählen.

10.2 Geräte, Verfahren und Messsysteme

10.2.1 Allgemeines

Der Abfluss ist keine messbare Größe, er wird aus der Messung anderer Kenngrößen, wie Geschwindigkeit, Tiefe, Breite und aus der Masse/Konzentration des Tracers bestimmt.

10.2.2 Geräte

Eine Ausrüstung, die zur Messung von Kenngrößen zur Bestimmung des Abflusses verwendet wird, muss Messunsicherheiten in Übereinstimmung mit Tabelle 3 angeben. Darüber hinaus muss die hydrometrische Ausrüstung über Mittel für und/oder zur Beschreibung eines Nachweisverfahrens der Leistung verfügen, um sicherzustellen, dass die Leistung eines Messsystems in der Umgebung verifiziert werden kann, in der dieses aufgestellt wird.

Gerätenormen dürfen die erwartete Leistung für den Gerätetyp angeben, der in dieser Norm beschrieben wird.

Sofern eine derartige Verifizierung nicht zur Verfügung steht, darf eine Analyse der Komponentenunsicherheiten als eine Grundlage für eine vorläufige Angabe der Leistung verwendet werden. Vorläufige Angaben sollten eindeutig feststellen, dass es sich um eine abgeschätzte Leistung, ohne Grundlage einer formalen ISO-Bewertung handelt. Es ist zu beachten, dass ein „Mittel zur Leistungsverifizierung“ erforderlich ist.

10.2.3 Verfahren

Verfahren enthalten Unsicherheitskomponenten. Einige dieser Komponenten erfordern eine besondere Beachtung, z. B. die Bewertung der Unsicherheit des Abflusses im Bereich der Gewässerbegrenzung $u^*(Q_p)$.

Zusätzliche Daten sind für jedes Messsystem erforderlich, das nicht den Abfluss über den gesamten Gerinnequerschnitt bestimmt. Sofern das Verfahren Bestandteil der Messeinrichtung ist, wie z. B. beim ADCP-Gerät, sind ausreichend Angaben zu machen, um eine unabhängige Bewertung von Q_p und $u^*(Q_p)$ zu ermöglichen.

10.2.4 Systeme

Hydrometrische Bauwerke und Verdünnungsgeräte sind Beispiele für Messeinrichtungen, die gemeinsam mit dem Anwendungsverfahren ein Abflussmesssystem charakterisieren.

Hydrometrische Bauwerke stellen die Hauptkomponente eines Messsystems dar, das die Messung des Wasserstandes erfordert, um den Abfluss zu bestimmen.

Normen für hydrometrische Bauwerke müssen das Messverfahren mithilfe von Beispielen veranschaulichen, die eines oder mehrere der in Tabelle D.1 aufgeführten Geräte zum Messen des Wasserstandes verwenden. Die Abschätzung der Messunsicherheit muss systematische Effekte einschließen, die die Bezugsbewertung des Geräts zum Messen des Wasserstandes beschreiben.

Normen für hydrometrische Systeme müssen einen Unsicherheitsanteil vormerken, der repräsentativ für typische Messbedingungen über einen tabellarischen Bereich von Abflüssen ist, einschließlich minimalem Abfluss, 25 %, 50 %, 75 % und maximalem Abfluss.

11 Beispiele

11.1 Allgemeines

Für die Unsicherheitsanalyse können zahlreiche Verfahren angewendet werden, darunter das Monte-Carlo-Verfahren [4] und Ringversuche im Feld [5]. Mueller (2016) [6], Moore et al. (2016) [4] sowie González-Castro, et al. (2016) [7] beschreiben andere Verfahren zur Unsicherheitsanalyse für Messungen mit Ultraschall-Dopplergeräten (ADCP) auf schwimmenden Booten. Zudem sind für nicht standardmäßige Situationen alternative Verfahren erforderlich, die in ISO 748 oder im HUG nicht enthalten sind [8]. In diesem Abschnitt werden mehrere Beispiele für die Abschätzung der Unsicherheit von Wasserstand und Abfluss angegeben.

11.2 Unsicherheit bei der Wasserstandsmessung

11.2.1 Beispiel 1: Schwimmer/Encoder im Messschacht der Pegelstation

Ablesewert Wasserstand = 0,253 m (253 mm)

Schwimmerdurchmesser = 110 mm

Die Messunsicherheiten eines Schwimmersensors werden in der Regel durch eine bimodale Verteilung dargestellt.

Es gibt zwei Hauptquellen der Unsicherheit:

- 1) Unsicherheit bei der Messung; und
- 2) Unsicherheit des Pegelnullpunkts.

Die Unsicherheit ist umgekehrt proportional zum Schwimmerdurchmesser. Ausgehend von der Dokumentation und den Erfahrungen des Herstellers beträgt der mögliche Grad der Unsicherheit/Streuung (Δx) 0,002 m (2 mm) im Vertrauensniveau von 68 %.

In Übereinstimmung mit Anhang D kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheiten bei den Messwerten vom Schwimmersensor bimodal verteilt sind.

Daher ist die Unsicherheit der Wasserstandsstandsmessung/des Wasserstandsschreibers $u(h_1) = \Delta'x = 2 \text{ mm}$ im Vertrauensniveau von 68 %.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Streuung ($\Delta'x$) des Pegelnullpunkts in der Größenordnung von $\pm 3 \text{ mm}$ liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheit des Pegelnullpunkts durch eine Dreiecksverteilung dargestellt wird:

$$u(E) = \frac{1}{\sqrt{6}} \Delta'x = \frac{1}{\sqrt{6}} \times 3 = 1,22 \text{ mm}$$

$$u^*(h) = \frac{\sqrt{u(E)^2 + u(h_1)^2}}{h} = u^*(h) = \frac{100 \times \sqrt{u(E)^2 + u(h_1)^2}}{h} = \frac{100 \times \sqrt{1,22^2 + 2^2}}{253} = 0,93 \%$$

im Vertrauensniveau von 68 %

Unsicherheit im Vertrauensniveau von 95 % = $2 \times \text{Standardunsicherheit} = 2 \times 0,93 = 1,86 \%$

$\therefore$ Wasserstand = $0,253 \text{ m} \pm 1,86 \%$ bei einem Erweiterungsfaktor von 2

11.2.2 Beispiel 2: Im Rohr installierter Druckmessumformer

Messbereich des Druckmessumformers = $0 \text{ m} - 10 \text{ m}$

Ablesewert Wasserstand = $0,253 \text{ m}$

Es gibt zwei Hauptquellen der Unsicherheit:

- a) Unsicherheit bei der Messung; und
- b) Unsicherheit des Pegelnullpunkts.

ANMERKUNG Die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten für Drucksensoren werden in der Regel in Form der Vollausschläge [en: full scale deflection, FSD (Messbereich des Sensors)] angegeben. In der Regel werden Genauigkeiten von $0,1 \%$ des Vollausschlags angegeben (Vertrauensniveau von 95 %).

Für einen Drucksensor mit einem Messbereich von 10 m entspricht die potenzielle Unsicherheit daher $0,1 \% \times 10 \text{ m} = 0,01 \text{ m}$ (10 mm) im Vertrauensniveau von 95 %.

$\therefore$ Die absolute Unsicherheit im Vertrauensniveau von 68 % beträgt $0,005 \text{ m}$ (5 mm).

In Übereinstimmung mit Anhang D kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheiten bei den Messwerten vom Drucksensor eine Rechteckverteilung aufweisen. Wenn also die Streuung, wie oben geschätzt, mit 5 mm angenommen wird, dann gilt:

$$u(x) = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta'x = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 5 = 2,9 \text{ mm also } 3 \text{ mm}$$

Wie in Beispiel 1 (siehe 11.2.1) kann davon ausgegangen werden, dass die Streuung ($\Delta'x$) des Pegelnullpunkts in der Größenordnung von $\pm 3 \text{ mm}$ liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheit des Pegelnullpunkts durch eine Dreiecksverteilung dargestellt wird:

$$u(E) = \frac{1}{\sqrt{6}} \Delta'x = \frac{1}{\sqrt{6}} \times 3 = 1,22 \text{ mm}$$

$$u^*(h) = \frac{100 \times \sqrt{u(E)^2 + u(h_1)^2}}{h} = \frac{100 \times \sqrt{1,22^2 + 3^2}}{253} = 1,3 \% \text{ im Vertrauensniveau von } 68 \%$$

Unsicherheit im Vertrauensniveau von 95 % = 2 × Standardunsicherheit = 2 × 1,3 = 2,6 %.

Daher ist die Unsicherheit des Wasserstands = 0,253 m ± 2,6 % bei einem Erweiterungsfaktor von 2.

11.3 Unsicherheit bei der Abflussmessung mit Abflussmessbauwerken

Die allgemeine Form der Gleichung für ein horizontales, bekrontes Bauwerk wie ein scharfkantiges Rechteckwehr oder ein Wehr mit dreieckigem (keilförmigem) Profil, das innerhalb seines modularen Bereichs arbeitet, ist in Gleichung (28) dargestellt:

$$Q = C_d \sqrt{g} b H_1^{1,5} \quad (28)$$

Dabei ist

Q der Abfluss;

C_d der Abflussbeiwert;

g die Fallbeschleunigung;

b die Breite des Bauwerks;

H_1 die Energiehöhe stromaufwärts.

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (29)$$

Dabei ist

h_1 der Wasserstand stromaufwärts;

α der Coriolis-Koeffizient;

v ist die mittlere Geschwindigkeit im Abschnitt der Wasserstandsüberwachung;

g die Fallbeschleunigung.

Bei der Verwendung von Computersoftware wird die Gesamthöhe in der Regel durch Iteration geschätzt. Wenn in Gleichung (28) jedoch der Wasserstand verwendet wird, muss auch der Geschwindigkeitskoeffizient (C_v) angewendet werden:

$$Q = C_v C_d \sqrt{g} b h_1^{1,5} \quad (30)$$

Bei einem horizontalen, bekronten Abflussmessbauwerk ist die Unsicherheit einer Abflussbestimmung eine Funktion der einzelnen Unsicherheiten des Abflussbeiwerts, der Breite und des Wasserstands. Wie im Abschnitt über die Unsicherheiten bei der Wasserstandsmessung angegeben, ist die Unsicherheit bei der Wasserstandsmessung eine Kombination aus der Unsicherheit bei der Wasserstandsmessung und der Unsicherheit beim Pegelnulldpunkt.

Durch die Kombination der einzelnen Unsicherheiten im Quadrat ergibt sich die Gesamtunsicherheit nach Gleichung (31):

$$u^*(Q) = \sqrt{u^*(C_d)^2 + u^*(b)^2 + [1,5u^*(h)]^2} \quad (31)$$

Bei V-förmigen Bauwerken ist die Unsicherheit eine Funktion der Unsicherheit des Abflussbeiwerts, des V-Winkels oder eines geometrischen Ausdrucks, der die Form des Wehrs widerspiegelt, sowie der Unsicherheit des Wasserstands. Bei V-förmigen Bauwerken ist der Abfluss eine Funktion der Gesamthöhe hoch 2,5. Die Unsicherheit der Stufe muss mit 2,5 multipliziert werden und nicht mit 1,5 wie bei einem horizontalen Bauwerk.

Ein Wehr mit Dreiecksprofil hat die folgenden Maße und Eigenschaften:

Gefälle stromaufwärts = 1 : 2;

Gefälle stromabwärts = 1 : 5;

Breite = 5,0 m.

Höhe der stromaufwärts gelegenen Sohle im Verhältnis zur Krone des Wehrs (p-Wert) = 0,3 m

Abflussbeiwert = 0,633

Gemessener Wasserstand = 0,08 m = 80 mm

Geschätzter Abfluss = $0,242 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Das Instrument zur Überwachung des Wasserstands ist ein Schwimmer in einem Messschacht, der in der Lage sein sollte, die Wasserstände mit einer Genauigkeit von 4 mm im Vertrauensniveau von 95 % zu messen.

Daher beträgt die absolute Unsicherheit 2 mm im Vertrauensniveau von 68 %.

In Übereinstimmung mit Anhang D kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheiten bei den Messwerten vom Schwimmersensor bimodal verteilt sind.

Daher ist die Unsicherheit der Wasserstandsstandsmessung/des Wasserstandsschreibers $u(h_1) = \Delta'x = 2 \text{ mm}$ im Vertrauensniveau von 68 %.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Streuung ($\Delta'x$) des Pegelnullpunkts in der Größenordnung von $\pm 3 \text{ mm}$ liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheit des Pegelnullpunkts durch eine Dreiecksverteilung dargestellt wird:

$$u(E) = \frac{1}{\sqrt{6}} \Delta'x = \frac{1}{\sqrt{6}} \times 3 = 1,22 \text{ mm}$$

$$u^*(h) = \frac{100 \times \sqrt{u(E)^2 + u(h_1)^2}}{h} = \frac{100 \times \sqrt{1,22^2 + 2^2}}{80} = 2,9 \% \text{ im Vertrauensniveau von } 68 \%$$

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Breite auf 0,05 m gemessen werden kann, kann die Unsicherheit bei der Breitenmessung durch eine Dreiecksverteilung dargestellt werden:

$$u(E) = \frac{1}{\sqrt{6}} \Delta'x = \frac{1}{\sqrt{6}} \times 0,05 = 0,02 \text{ mm}$$

Unsicherheit der Breite = $100 \times (0,02/5) = 0,4 \%$

Nach ISO 4360 ist die Unsicherheit des Abflusskoeffizienten an Wehren mit Dreiecksprofil eine Funktion des Geschwindigkeitskoeffizienten (C_v) und wird wie folgt angegeben:

$$u^*(C_d) = (5C_v - 4,5) \% \text{ im Vertrauensniveau von } 68 \%$$

Dabei ist $C_v = \left(\frac{H_1}{h_1}\right)^{1,5}$

Weitere Informationen sind in ISO 4360 enthalten.

In diesem Beispiel wird C_v auf 1,08 geschätzt. Folglich ist die Unsicherheit des Abflussbeiwertes:

$$u^*(C_d) = (5 \times 1,08_v - 4,5) \% = 0,9 \% \text{ im Vertrauensniveau von } 68 \%$$

∴ Die Unsicherheit der Abflussschätzung im Vertrauensniveau von 68 % wird wie folgt angegeben:

$$u^*(Q) = \sqrt{u^*(C_d)^2 + u^*(b)^2 + [1,5u^*(h)]^2} = \sqrt{0,4^2 + 1^2 + [1,5 \times 2,9]^2} =$$

$$4,48 \% \text{ im Vertrauensniveau von } 68 \%$$

∴ Unsicherheit im Vertrauensniveau von 95 % = Standardunsicherheit $\times 2 = 4,48 \% \times 2 = 8,96 \%$

Abfluss $Q = 0,242 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \pm 8,96 \% \text{ bei einem Erweiterungsfaktor von } 2$

11.4 Unsicherheit bei der Abflussmessung mit einem Fließgeschwindigkeitsmessgerät

Gleichung (32) schätzt die Unsicherheit bei der Abflussmessung mit einem Fließgeschwindigkeitsmessgerät.

$$u_Q = \sqrt{u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m [(b_i d_i v_i)^2 (u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{v,i}^2)]}{(\sum_{i=1}^m b_i b_i d_i v_i)^2}} \quad (32)$$

Dabei ist

$$u_{v,i} = \sqrt{u_{p,i}^2 + \left(\frac{1}{n}\right)(u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2)}$$

$b_i = (x_{i+1} - x_{i-1}) / 2$ die Breite des vertikalen Unterabschnitts i ;

u_Q die relative Unsicherheit des Abflusses;

u_b die relative Unsicherheit der Breite eines Unterabschnitts;

u_d die relative Unsicherheit der durchschnittlichen Tiefe eines Unterabschnitts;

u_v die relative Unsicherheit der Geschwindigkeit eines Unterabschnitts;

u_m die relative Unsicherheit bei der Abflussmessung aufgrund der Annäherung des Integrals anhand von begrenzten Messlotrechten;

u_s die relative Unsicherheit bei der Abflussmessung aufgrund von Kalibrierungsfehlern und anderen Faktoren;

$u_{p,i}$	die relative Unsicherheit bei der Schätzung der mittleren Geschwindigkeit aufgrund der begrenzten Anzahl von Tiefen, in denen Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen werden; n ist die Anzahl von Tiefen, in denen Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen werden;
$u_{c,i}$	die relative Unsicherheit aufgrund von Fehlern im Zusammenhang mit den Nennwerten des Fließgeschwindigkeitsmessgeräts;
$u_{e,i}$	die relative Unsicherheit aufgrund der begrenzten Zeit für die Geschwindigkeitsmessung.

Die Beispielmessdaten wurden am 17. Juli 2007 an einer Station im Jangtse, dem größten Fluss Chinas, ermittelt. Die Anzahl der Messlotrechten beträgt 40. Es wurden zwei Punkte bei 20 % der Tiefe (0,2D) und 80 % der Tiefe (0,8D) ausgewählt, um die Geschwindigkeit für jede Messlotrechte zu messen. Die tiefste Messlotrechte bei dieser Messung ist 6,5 m und die Breite beträgt 514,4 m. Die detaillierten Daten sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5 — Messdaten

Nr. der Messlotrechten	Länge m	Tiefe m	Geschwindigkeit m/s	Messdauer s	Relative Position	Mittlere Geschwindigkeit der Messlotrechten m/s
Rechtes Ufer	13,8					
1	25,0	3,00	0,76	61,2	0,2	0,72
			0,67	62,0	0,8	
2	30,0	4,00	1	61,9	0,2	0,92
			0,84	61,4	0,8	
3	35,0	8,5	1,56	62,7	0,2	1,50
			1,44	61,0	0,8	
4	45,0	8,6	2,08	61,8	0,2	1,77
			1,45	60,2	0,8	
5	55,0	8,0	1,95	60,6	0,2	1,79
			1,62	60,4	0,8	
6	70,0	8,3	1,97	60,2	0,2	1,84
			1,71	60,2	0,8	
7	85,0	9,3	1,83	61,9	0,2	1,57
			1,31	62,8	0,8	
8	100	9,5	1,64	62,6	0,2	1,50
			1,35	65,0	0,8	
9	115	10,5	1,66	62,0	0,2	1,55
			1,44	61,0	0,8	
10	130	10,6	1,6	61,1	0,2	1,41
			1,21	63,8	0,8	
11	145	8,5	1,81	62,5	0,2	1,74
			1,66	61,9	0,8	
12	160	8,5	1,9	62,4	0,2	1,76

- Entwurf -

E DIN EN ISO 25377:2022-10
prEN ISO 25377:2022 (D)

Tabelle 5 (fortgesetzt)

Nr. der Messlotrechten	Länge m	Tiefe m	Geschwin- digkeit m/s	Messdauer s	Relative Position	Mittlere Ge- schwindigkeit der Messlotrechten m/s
			1,62	63,5	0,8	
13	175	8,5	1,84	61,5	0,2	1,70
			1,55	63,1	0,8	
14	190	9,2	1,83	62,0	0,2	1,68
			1,52	60,9	0,8	
15	205	9,5	1,79	60,4	0,2	1,59
			1,39	63,2	0,8	
16	220	8,9	1,75	61,9	0,2	1,60
			1,44	61,0	0,8	
17	235	8,1	1,78	60,8	0,2	1,56
			1,34	61,7	0,8	
18	250	8,5	1,79	60,5	0,2	1,56
			1,33	62,0	0,8	
19	265	8,1	1,8	60,2	0,2	1,62
			1,44	60,6	0,8	
20	280	7,1	1,78	60,7	0,2	1,62
			1,46	60,0	0,8	
21	290	7,0	1,7	60,7	0,2	1,46
			1,22	63,6	0,8	
22	300	6,2	1,84	61,4	0,2	1,54
			1,23	62,8	0,8	
23	310	6,5	1,6	61,0	0,2	1,46
			1,32	62,5	0,8	
24	320	6,3	1,6	61,2	0,2	1,50
			1,4	62,7	0,8	
25	330	5,1	1,54	60,0	0,2	1,38
			1,22	63,2	0,8	
26	340	6,1	1,58	61,8	0,2	1,40
			1,21	64,0	0,8	
27	350	5,0	1,59	61,6	0,2	1,51
			1,42	61,7	0,8	
28	360	4,60	1,57	62,2	0,2	1,46
			1,34	61,6	0,8	
29	370	4,80	1,51	61,2	0,2	1,34
			1,17	61,8	0,8	

Tabelle 5 (fortgesetzt)

Nr. der Messlotrechten	Länge m	Tiefe m	Geschwin- digkeit m/s	Messdauer s	Relative Position	Mittlere Ge- schwindigkeit der Messlotrechten m/s
30	380	4,40	1,44	60,9	0,2	1,36
			1,28	60,5	0,8	
31	390	5,0	1,39	62,9	0,2	1,24
			1,08	62,2	0,8	
32	405	4,80	1,42	61,6	0,2	1,12
			0,81	64,1	0,8	
33	420	4,00	1,32	62,5	0,2	1,03
			0,73	63,7	0,8	
34	430	3,20	1,37	60,2	0,2	1,26
			1,14	63,3	0,8	
35	445	3,40	1,45	63,9	0,2	1,29
			1,12	64,7	0,8	
36	465	3,30	1,43	61,3	0,2	1,29
			1,14	63,1	0,8	
37	485	3,50	1,31	63,0	0,2	1,15
			0,99	62,6	0,8	
38	505	3,30	1,2	64,4	0,2	1,05
			0,89	63,8	0,8	
39	525	4,00	1,12	60,1	0,2	0,85
			0,57	63,8	0,8	
40	535	3,00	0,72	64,5	0,2	0,57
			0,41	63,1	0,8	
Linkes Ufer	540					

Hier wird u_s als 1 % angenommen.

Anzahl der bei der Messung verwendeten Messlotrechten: 40

Anzahl der Messpunkte je Messlotrechter (0,2D und 0,8D): 2

Mittlere Geschwindigkeit im Messquerschnitt: von 0,5 bis 1,6 m/s

Expositionsdauer des Fließgeschwindigkeitsmessgeräts: 60 s

Die Unsicherheiten der Komponenten (in Prozent) können der ISO 748:—, Anhang E, entnommen werden, die die Ergebnisse der seit ihrer ersten Veröffentlichung durchgeführten Untersuchungen enthält.

$u_m = 1,0$ (ISO 748:—, Tabelle E.6)

$u_s = 1,0$ (siehe oben)

- Entwurf -

E DIN EN ISO 25377:2022-10
prEN ISO 25377:2022 (D)

$u_b = 0,25$ (siehe E.2)

$u_d = 0,65$ (bei einer Tiefe zwischen 0,4 m und 6 m)/0,25 (bei einer Tiefe zwischen 6 m und 14 m) (siehe E.3)

$u_p = 3,5$ (ISO 748:—, Tabelle E.4)

$u_c = 0,5$ (ISO 748:—, Tabelle E.5)

$u_e = 3,0$ (bei Tiefe 0,2D) (ISO 748:—, Tabelle E.3)

3,0 (bei Tiefe 0,8D) (ISO 748:—, Tabelle E.3)

Daher ist $u_e = \sqrt{3,0^2 + 3,0^2} = 4,2$

Tabelle 6 — Berechnung des Abflusses an der Messlotrechten

Nr. der Messlotrechten	Tiefe m	Mittlere Geschwindigkeit der Messlotrechten m/s	Länge m	Mittlere Geschwindigkeit an der Messlotrechten ($b_i d_i v_i$) m^3/s
Rechtes Ufer			13,8	
1	3,00	0,72	25	29,59
2	4,00	0,92	30	18,4
3	8,50	1,50	35	95,63
4	8,60	1,77	45	152,22
5	8,00	1,79	55	179,00
6	8,30	1,84	70	229,08
7	9,30	1,57	85	219,02
8	9,50	1,50	100	213,75
9	10,50	1,55	115	244,13
10	10,6	1,41	130	224,19
11	8,50	1,74	145	221,85
12	8,50	1,76	160	224,40
13	8,50	1,7	175	216,75
14	9,20	1,68	190	231,84
15	9,50	1,59	205	226,58
16	8,90	1,6	220	213,60
17	8,10	1,56	235	189,54
18	8,50	1,56	250	198,90
19	8,10	1,62	265	196,83
20	7,10	1,62	280	143,78
21	7,00	1,46	290	102,20
22	6,20	1,54	300	95,48

Tabelle 6 (fortgesetzt)

Nr. der Messlotrechten	Tiefe m	Mittlere Geschwindigkeit der Messlotrechten m/s	Länge m	Mittlere Geschwindigkeit an der Messlotrechten ($b_i d_i v_i$) m^3/s
23	6,50	1,46	310	94,90
24	6,30	1,5	320	94,50
25	5,10	1,38	330	70,38
26	6,10	1,4	340	85,40
27	5,00	1,51	350	75,50
28	4,60	1,46	360	67,16
29	4,80	1,34	370	64,32
30	4,40	1,36	380	59,84
31	5,00	1,24	390	77,50
32	4,80	1,12	405	80,64
33	4,00	1,03	420	51,50
34	3,20	1,26	430	50,40
35	3,40	1,29	445	76,755
36	3,30	1,29	465	85,14
37	3,50	1,15	485	80,50
38	3,30	1,05	505	69,30
39	4,00	0,85	525	51,00
40	3,00	0,57	535	17,10
Linkes Ufer			540	
Gesamtabfluss				5 118,57

Aus der Gleichung zur Abschätzung der Unsicherheit bei der Abflussmessung und Tabelle 6 ergibt sich daher Folgendes:

$$u_Q = \sqrt{1,0^2 + 1,0^2 + \frac{\sum_{i=1}^m \left[(b_i d_i v_i)^2 \left(2,5^2 + 0,65^2 + 3,5^2 + \left(\frac{1}{2} \right) (0,5^2 + 4,2^2) \right) \right]}{\left(\sum_{i=1}^m b_i d_i v_i \right)^2}}$$

$$u_Q = 1,72$$

Das Beispiel für die Abschätzung der Unsicherheit bei der Abflussmessung mit einem Fließgeschwindigkeitsmessgerät wird mit dem in diesem Dokument beschriebenen Verfahren durchgeführt. Le Coz et al. (2012) [8] geben an, dass das hier verwendete Verfahren der Unsicherheitsanalyse gut für standardmäßige Abflussmessungen geeignet ist, die alle Anforderungen nach ISO 748 erfüllen. Für eine Reihe von nicht standardmäßigen Messungen scheinen die mit diesem Verfahren erhaltenen Unsicherheitswerte jedoch irrelevant zu sein [8]. Daher werden oft alternative Verfahren benötigt [8] [10].

Anhang A (informativ)

Einführung in die Unsicherheit bei hydrometrischen Bestimmungen

A.1 Grundlegende Definitionen und Regeln

Eine Messung kann niemals wirklich genau sein: Gemessene Werte haben immer einen Unsicherheitsbereich. Folglich sollte ein Messwert nicht ohne eine zusätzliche qualitative Abschätzung angegeben werden. Das Standardverfahren besteht in der Angabe einer Messunsicherheit.

Der GUM (ISO/IEC Guide 98-3) beschreibt die Messunsicherheit als einen Wert, der die Streuung von Messungen charakterisiert, die einem Ergebnis begründet zugewiesen werden könnte. Der GUM definiert im Weiteren die Standardunsicherheit als Unsicherheit, die als eine Standardabweichung angegeben wird.

Diese Definition weist drei Grundzüge auf:

- a) die Unsicherheit kann aus einem Satz von Messungen schnell bestimmt werden;
- b) die Unsicherheit kann für einen Messprozess nachgebildet werden; und
- c) ein „Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten“ kann verwendet werden, um Unsicherheiten zu kombinieren.

Für eine Messreihe bezieht sich die Unsicherheit auf die Differenz zwischen jedem gemessenen Wert x_i aus einem Mittelwert $\bar{x}$, der Reihe. Die Standardabweichung und folglich die Unsicherheit $u(x)$, ist:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} [(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{x} - x_3)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2]}$$

Dabei sind die Komponenten $\bar{x} - x_i$ die Abweichung der i -ten Messung x_i vom Mittelwert $\bar{x}$.

Oder kürzer:

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (d_i)^2} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist $d_i = \bar{x} - x_i$ die Differenz der i -ten Messung vom Mittelwert $\bar{x}$,

und

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.2})$$

Je größer die Anzahl n der Messungen ist, die zum Berechnen des Mittelwertes $\bar{x}$ verwendet wird, je dichter ist eine Annäherung an einen „wahren“ Wert möglich. Folglich verringert sich die Unsicherheit des Mittelwertes $u(\bar{x})$ in dem Maße, wie die Anzahl der Messungen n zunimmt. Die Beziehung des GUM dazu ist:

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} u(x) \quad (\text{A.3})$$

Unter gleich bleibenden Bedingungen können Wiederholreihen von n Messungen verwendet werden, um einen Mittelwert mit einer $\frac{1}{\sqrt{n}}$ -Verringerung der Messunsicherheit zu bestimmen. Ein Instrument, das an einer

Reihe von Messungen arbeitet und die Variabilität der gemessenen Parameter aufzeigt, kann davon profitieren. Jedoch gilt dieser Prozess nur für zufällige Auswirkungen auf die Eingangsquantität. Unsicherheiten, die Bestandteil des Messvorganges sind (systematische Effekte), können auf diese Weise nicht reduziert werden.

Der GUM definiert eine Regel zum Kombinieren von Unsicherheiten aus mehreren Quellen – das „Gesetz der Fortpflanzung von Unsicherheiten“. Für eine Beziehung f zwischen einem Ergebnis y und abhängigen Variablen $x_1, x_2 \dots x_n$, bei denen $y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$, ist die Unsicherheit von y :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2$$

oder

$$u_c^2(y) = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial x_n} u(x_n) \right]^2 \quad (\text{A.4})$$

Dabei sind die Variablen $x_1, x_2 \dots x_n$ unabhängige Variablen.

Gleichung (A.4) gilt nur, wenn die Variablen $x_1, x_2 \dots x_n$ nicht miteinander in Zusammenhang stehen; d. h., wenn die Variable x_i den Wert ändert, ist keine andere x -Variable von dieser Änderung betroffen. Wenn sich zwei oder mehr x Variablen gegenseitig beeinflussen (d. h. sie stehen miteinander in Zusammenhang), dann besteht eine zusätzliche Unsicherheits-Komponente. Gleichung (A.4) wird dann zu:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i x_j) \quad (\text{A.5})$$

Fast alle hydrometrischen Abschätzungen der Unsicherheit erfordern die Anwendung einer vereinfachten Formel, d. h. Gleichung (A.4).

Dieses Gesetz bedeutet, dass Unsicherheiten als quadratische Summenwerte kombiniert werden. Auf die Teilableitungen $\frac{\partial f}{\partial x_n}$ wird in Form von Empfindlichkeitskoeffizienten Bezug genommen. Das Ergebnis $u_c(y)$ kann gegenüber einigen Variablen x empfindlicher sein als gegenüber anderen. Zum Beispiel ist der prozentuale Anteil des Abflusses durch einen V-Querschnitt 2,5 mal empfindlicher gegenüber der Unsicherheit der Wasserstandsmessung als gegenüber der Unsicherheit des V-Winkels.

A.2 Einführung in die Definitionen

A.2.1 Allgemeines

Die in A.1 angegebenen Definitionen können an Beispielen interpretiert werden.

In Tabelle A.1 ist eine Reihe von Messungen ($n = 20$) aufgeführt, um die Breite eines Abschnitts des rechteckigen Gerinnes zu bestimmen. Gleichung (A.2) bestimmt die mittlere Breite $\bar{x}$ aus Werten x_i , gemessen an unterschiedlichen Positionen, die in dem Gerinne zufällig gewählt wurden.

Tabelle A.1 — Einzelmessungen der Gerinnebreite

Index i	Wert x_i	$d_i = \bar{x} - x_i$	d_i^2
1	1 203	4,35	18,922 5
2	1 220	-12,65	160,022 5
3	1 218	-10,65	113,422 5
4	1 193	14,35	205,922 5
5	1 210	-2,65	7,022 5

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Index i	Wert x_i	$d_i = \bar{x} - x_i$	d_i^2
6	1 194	13,35	178,222 5
7	1 206	1,35	1,822 5
8	1 185	22,35	499,522 5
9	1 227	-19,65	386,122 5
10	1 197	10,35	107,122 5
11	1 225	-17,65	311,522 5
12	1 219	-11,65	135,722 5
13	1 210	-2,65	7,022 5
14	1 194	13,35	178,222 5
15	1 221	-13,65	186,322 5
16	1 209	-1,65	2,722 5
17	1 205	2,35	5,522 5
18	1 204	3,35	11,222 5
19	1 197	10,35	107,122 5
20	1 210	-2,65	7,022 5
	$\bar{x} = 1\,207,4$		$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i)^2} = 11,8$

Aus Tabelle A.1 und unter Anwendung von Gleichung (A.2) ist die beste Abschätzung der Gerinnebreite, deren Mittelwert $\bar{x} = 1\,207,4$ mm. Die Standardabweichung wird mit Gleichung (A.1) berechnet und beträgt 11,8 mm. Dieses ist die Unsicherheit der gemessenen Werte. Die Unsicherheit der durchschnittlichen Gerinnebreite aus dieser Messreihe wird durch den Faktor $\frac{1}{\sqrt{n-1}}$ reduziert, wobei $n = 20$ ist. Damit beträgt die Unsicherheit des Mittelwertes der Gerinnebreite 2,6 mm.

In Tabelle A.2 wurden die gleichen 20 Messungen in Größenbereiche mit einer Abstufung von 5 mm sortiert.

Tabelle A.2 — Breitenmessungen, eingruppiert in 5-mm-Abstufungen ($n = 20$)

1 185 bis 1 190	1 190 bis 1 195	1 195 bis 1 200	1 200 bis 1 205	1 205 bis 1 210	1 210 bis 1 215	1 215 bis 1 220	1 220 bis 1 225	1 225 bis 1 230
					1 212			
	1 192			1 208	1 214			
	1 193	1 199	1 203	1 206	1 214	1 215	1 221	
1 189	1 192	1 198	1 203	1 206	1 211	1 219	1 220	1 225

A.2.2 Datenhistogramme

Die gleichen Daten können als ein Histogramm dargestellt werden, in dem Einzelwerte nicht explizit angegeben, sondern durch Zählung in den Abstufungen angezeigt werden. Von jedem Posten in der Stufe wird angenommen, dass er den mittleren Stufenwert hat.

Tabelle A.3 — Breitenmessungen, eingruppiert als Histogramm in 5-mm-Abstufungen ($n = 20$)

[illegible]

Größere Datensätze können eine charakteristische Form der Eingruppierung zeigen; z. B. Tabelle A.4 zeigt ein Histogramm mit einer größeren Anzahl von Zahlenwerten aus Messungen (bis zu 8 in einigen der Stufen) für das gleiche Gerinne wie in Tabelle A.1.

Tabelle A.4 — Gerinne 1: Breitenmessungen, gruppiert als Histogramm in 5-mm-Abstufungen ($n = 78$)

[illegible]

Bei Tabelle A.5 handelt es sich um ein weiteres rechteckiges Gerinne mit unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Verteilung der gemessenen Werte.

[illegible]

44

[illegible]