

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                        |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | DIN EN ISO 25377                       |  |
| ICS 17.120.20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Ersatz für<br>DIN ISO/TS 25377:2008-01 |                                                                                     |
| <p><b>Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG)<br/>(ISO 25377:2020);<br/>Deutsche Fassung EN ISO 25377:2022</b></p> <p>Hydrometric uncertainty guidance (HUG) (ISO 25377:2020);<br/>German version EN ISO 25377:2022</p> <p>Lignes directrices relatives à l'incertitude en hydrométrie (ISO 25377:2020);<br/>Version allemande EN ISO 25377:2022</p> |                                        |                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                        | Gesamtumfang 86 Seiten                                                              |
| DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                        |                                                                                     |

## Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 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).

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 748:2022-12 |
| 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](http://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.

## Frühere Ausgaben

DIN ISO/TS 25377: 2008-01

## Nationaler Anhang NA (informativ)

### Literaturhinweise

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

DIN EN ISO 748:2022-12, *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)*

DIN V 19218, *Durchflussmessung von Fluiden — Verfahren zur Unsicherheitsermittlung; (ISO 5168:2005, modifiziert)*

– Leerseite –

Deutsche Fassung

## 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)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 20. Dezember 2022 angenommen.

Diese Europäische Norm wurde korrigiert und vom CEN-CENELEC-Management-Zentrum am 4. April 2023 neu herausgegeben.

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

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

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



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

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

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 $\bar{V}_x$ . . . . .                                                            | 16    |
| 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 . . . . .                                                    | 20    |
| 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 . . . . .                                                                         | 26    |
| 9.1 Leistungsspezifikationen . . . . .                                                                        | 26    |
| 9.2 Gültigkeit von Unsicherheitsaussagen . . . . .                                                            | 26    |
| 9.3 Herstellerspezifikationen . . . . .                                                                       | 27    |
| 9.4 Leistungsleitfaden für hydrometrische Geräte zur Anwendung in technischen<br>Standardbeispielen . . . . . | 28    |
| 10 Anleitung zur Aufstellung von Abschnitten über Unsicherheit in Normen der<br>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 . . . . .                                                                                    | 30    |
| 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                                                                  | 47 |
| 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            | 68 |
| Anhang E          | (informativ) Unsicherheitsanalyse der Wasserstand-Abfluss-Beziehung                                                  | 72 |
| E.1               | Wasserstand-Abfluss-Beziehung                                                                                        | 72 |
| E.2               | Unsicherheit in der Wasserstand-Abfluss-Beziehung                                                                    | 72 |
| E.3               | Beispiel                                                                                                             | 73 |
| Anhang F          | (informativ) Messung der Geschwindigkeit                                                                             | 76 |
| F.1               | Messung der Geschwindigkeit mit Fließgeschwindigkeitsmessgeräten                                                     | 76 |
| F.1.1             | Vertikale Segmente                                                                                                   | 76 |
| F.1.2             | Horizontale Segmente                                                                                                 | 76 |
| F.2               | Verfahren mit Ultraschall-Dopplergeräten (ADCP) auf schwimmenden Booten                                              | 77 |
| F.3               | Geschwindigkeitsflächen-Unsicherheiten beim Verfahren mit Ultraschall-Dopplergeräten (ADCP) auf schwimmenden Booten  | 79 |
| F.3.1             | Zufällige und systematische Effekte                                                                                  | 79 |
| F.3.2             | Bestimmung der Unsicherheit für Ultraschall-Dopplergeräte (ADCP) auf schwimmenden Booten                             | 79 |
| Literaturhinweise |                                                                                                                      | 81 |

## 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 . . . . . 77

Bild F.2 — Dreidimensionaler Geschwindigkeitsvektor und Bootskoordinaten . . . . . 78

Tabellen

Tabelle 1 — Wahrscheinlichkeitsverteilung . . . . . 26

Tabelle 2 — Umweltfaktoren . . . . . 26

Tabelle 3 — Maximale und minimale Nennleistungen . . . . . 28

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 . . . . . 69

Tabelle E.1 — Wasserstand-Abfluss-Daten an einer Station . . . . . 73

Tabelle E.2 — Berechnung der Unsicherheit in der Wasserstand-Abfluss-Beziehung . . . . . 74

## **Europäisches Vorwort**

Der Text von ISO 25377:2020 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 113 „Hydrometry“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und vom Technischen Komitee CEN/TC 318 „Hydrometrie“ als EN ISO 25377:2022 übernommen, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2023, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2023 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt CEN ISO/TS 25377:2007.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

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

### **Anerkennungsnotiz**

Der Text von ISO 25377:2020 wurde von CEN als EN 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](http://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](http://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](http://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](http://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, en: guide to the estimation of uncertainty in measurement). 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 ganz 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 sollen 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.

Dieses Dokument ist anwendbar 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      |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $\alpha$                                | 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            |
| $\sigma$                                | Standardabweichung                                                                                                                                                                | a              |
| $\Delta'x, \Delta'y$                    | Streuung der Messung um den Mittelwert einer Reihe von x-y-Messungen für eine symmetrische Verteilung:<br>$\Delta'x = 0,5 (x_{\max} - x_{\min})$ usw.                             | 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              |
| $\Delta$                                | 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 <sup>2</sup> |
| $B$                                     | 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 <sup>2</sup>  |
| $h$              | 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 <sup>3</sup> /s |
| $Q_p$            | geschätzter Durchfluss dicht an Begrenzungen oder an einem Bereich, in dem die Messung mit den Primärmitteln nicht erfolgen kann                                                                                                   | m <sup>3</sup> /s |
| $Q_T$            | beim Verdünnungsverfahren, Tracerabfluss im Strom                                                                                                                                                                                  | m <sup>3</sup> /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         |
| <sup>a</sup> Die Reihenfolge der Dimensionen hängt von ihrer Bedeutung im Kontext ab.<br><sup>b</sup> 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  $\Delta x$  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 sollte beachtet werden, 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;
- $\Delta x$  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:

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

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 müssen alle Messungen im Vertrauensniveau von 95 % mit einer Aussage in der folgenden Form angegeben werden:

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

oder

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

Weitere Informationen sind in Abschnitt 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:

- die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{V}_x$  im Gerinneabschnitt; und
- 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  $Q$ .

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

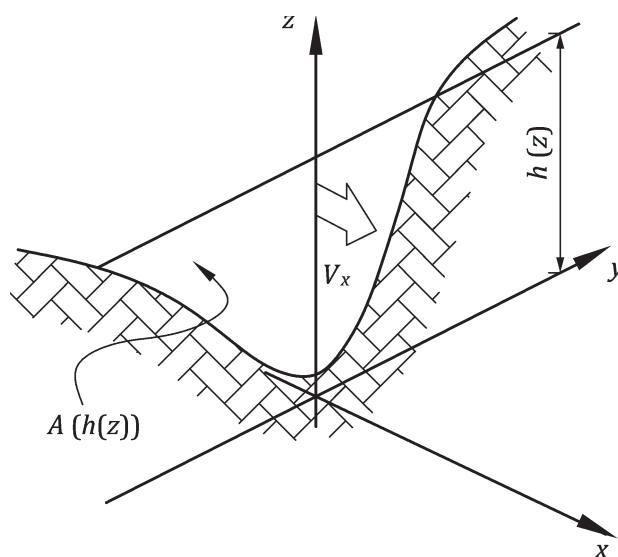
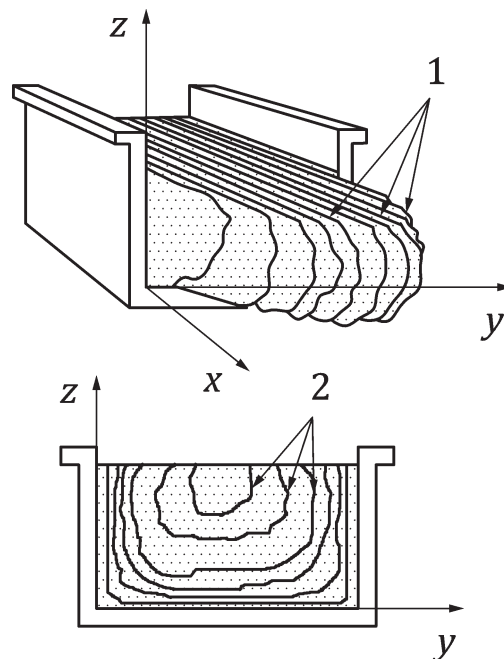


Bild 1 — Koordinatenbeziehung in einem Gerinne-Querschnitt

## 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. Geschwindigkeitsgradienten 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:

$$Q = F_y F_z \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V_x(y_i, z_j) \Delta z_j \Delta y_i + Q_p \quad (9)$$

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  $\Delta z_j$  und der Breite  $\Delta y_i$ . Eine Reihe von  $\Delta y_i$ -Strömungskuben ist jedem horizontalen Segment, und eine Reihe von  $\Delta z_j$ -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, en: Acoustic Current Doppler Profiles). 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:

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

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;
- $u^*[V_x(y_i z_j)]$  die Gesamt-Unsicherheit der Geschwindigkeitsbestimmung.

Dazu gehört:

$$u^*[V_x(y_i z_j)]^2 = u_k^*[V_x(y_i z_j)]^2 + u_r^*[V_x(y_i z_j)]^2 \quad (11)$$

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 Kalibrierungsaussage, 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 müssen möglicherweise im Grenzbereich oder bei hoher Scherspannung verworfen werden.

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

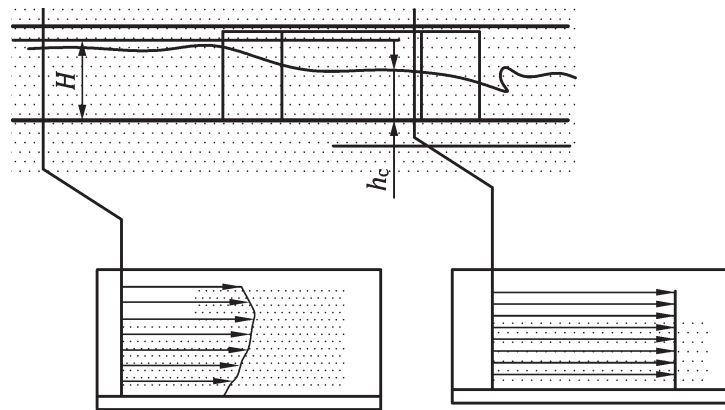
Die Abschätzung der Unsicherheit ist in diesen Bereichen problematisch. Jede Aussage muss die kritischen Gedanken enthalten, auf denen die Abschätzung basiert. Es ist unwahrscheinlich, dass Unsicherheiten unter 20 % für die gesamte Umfangsströmung begründet werden können. Ein normativer Wert von 40 % 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  $\alpha$ .

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;

$\alpha$  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

$\alpha$  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  $\alpha$  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 muss auf ein Vertrauensniveau von 68 % umgewandelt werden (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  $h$ .