

Vergleich und Bewertung von Durchflussmessungen nach dem Geschwindigkeits-Flächen-Verfahren in Bezug auf die begrenzte Anzahl von Messlotrechten

Die DIN EN ISO 748 schafft für stangengeführte Durchflussmessungen geltende Regelungen, unter anderem zur Bestimmung der Unsicherheiten von Durchflussmessungen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei der Berechnung der Messunsicherheiten die Anzahl der verwendeten Messlotrechten einen großen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit einer Durchflussmessung hat. Um den Einfluss der Messlotrechtenanzahl auf den gemessenen Durchfluss zu ermitteln, wurden an vier Pegeln Durchflussmessungen durchgeführt und systematisch ausgewertet.

Felix Simon, Lucas Eckel, Christoph Mudersbach und Alexander Hartung

1 Motivation

Die Größen Wassertand (W) und Durchfluss (Q) sind ein grundlegender Bestandteil der wasserwirtschaftlichen Praxis und werden für viele wasserwirtschaftliche Aufgaben und Fragestellungen benötigt. So finden diese Größen unter anderem Verwendung in Vorhersagemodellen, werden zur Kalibrierung von hydrodynamisch-numerischen Modellen genutzt und sind grundlegend zur Erstellung und Validierung von Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (W - Q -Beziehungen).

Die DIN EN ISO 748 [1] regelt für stangengeführte Durchflussmessungen die Messverfahren, die Berechnung des Durchflusses mittels der Geschwindigkeits-Flächen-Methode oder auch die Bestimmung der Unsicherheiten von Durchflussmessungen. Bei der Unsicherheitsberechnung von Durchflussmessungen hat sich gezeigt, dass die Anzahl der verwendeten Messlotrechten einen sehr großen Anteil an der Gesamtunsicherheit einer Durchflussmessung besitzt [2], [3]. Hierbei wird weder die Gewässerform noch ein mögliches Verhältnis zwischen Anzahl der Messlotrechten zur Gewässerbreite berücksichtigt. Die Angabe der Messunsicherheit bei Durchflussmessungen ist

jedoch ein wichtiger Indikator als Angabe zur Genauigkeit der Messung und sollte in wasserwirtschaftlichen Fragestellungen, wie beispielsweise der Bestimmung von Hoch- und Niedrigwasserkennwerten, berücksichtigt werden [4]. Weiter schafft die DIN EN ISO 748 Angaben zur empfohlenen Mindestanzahl von Messlotrechten auf Basis der Gewässerbreite, welche in der **Tabelle 1** dargestellt sind.

Zusätzlich ist hier beschrieben, dass die Lotrechten so gewählt werden sollten, dass die Teildurchflüsse der einzelnen Segmente jeweils weniger als 5 % zum Gesamtdurchfluss beitragen und 10 % nicht überschreiten sollten. Sowohl anhand der hier aufgeführten Werte als auch aus der praktischen Erfahrung zeigt sich, dass die Einhaltung dieser Mindestanforderungen in der Praxis nur schwer oder gar nicht zu realisieren sind. Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit in Zusammenarbeit des Lehrgebietes Wasserbau und Hydromechanik (LWH) der Hochschule Bochum und der Emscher-genossenschaft und dem Lippeverband (EGLV) untersucht, inwiefern die Anzahl der Messlotrechten verringert werden kann, ohne dass dies große Auswirkungen auf das Messergebnis hat.

Kompakt

- Die Gesamt-Unsicherheit von Durchflussmessungen nach DIN EN ISO 748 ist fast ausschließlich abhängig von der Messlotrechtenanzahl.
- Die Messlotrechtenanzahl kann ohne großen Einfluss auf Messergebnis deutlich verringert werden.
- Das Verhältnis der Gewässerbreite zur Lotrechtenanzahl sollte bei Unsicherheitsberechnung berücksichtigt werden.

2 Daten und Methodik

Um den Einfluss der Anzahl der Messlotrechten auf den gemessenen Durchfluss zu ermitteln, wurden an vier Gewässerpegeln der EGLV Durchflussmessungen durchgeführt und systematisch ausgewertet. Hierfür wurden die Pegel Ablauf HRB Do-Schornhorst (Körne), Zufahrt Kläranlage Kamen, Lünener Straße (Seseke), HRB Bönen, Ablaufpegel (Seseke) und Natroper Weg (Dattelner Mühlenbach) ausgewählt. Die Pegel Ablauf HRB Do-Schornhorst und Natroper Weg sind als V-Profil aus Betonplat-

Tabelle 1: Übersicht über die empfohlene Mindestanzahl von Messlotrechten nach DIN EN ISO 748 (Quelle: [1])

Gewässerbreite	Empfohlene Messlotrechtenanzahl
<0,5 m	≥15
>0,5 m und <5,0 m	≥20
>5,0 m	≥22

Tabelle 2: Übersicht über die gewählte maximale Anzahl an Messlotrechten je Pegel (Quelle: Simon)

Pegel	Gewässerbreite [m]	Max. Messlotrechten
Ablauf HRB Do-Scharnhorst	2,16	20
Zufahrt Kläranlage Kamen, Lünener Straße	5,40	40
HRB Bönen, Ablaufpegel	3,00	25
Natroper Weg	1,80	18

ten ausgebaut, wobei ersterer während der Messung eine Wasserspiegelbreite von 2,16 m und eine maximale Wassertiefe von 0,71 m vorwies. Die Wasserspiegelbreite am Pegel Natroper Weg betrug während der Messung 1,80 m mit einer maximalen Wassertiefe von 0,50 m. Der Pegel Zufahrt Kläranlage Kamen, Lünener Straße besitzt ein naturnahes Profil mit senkrechter Uferberandung aus Gabionen-Elementen mit einer Gewässerbreite von 5,40 m und einer maximalen Wassertiefe von 0,50 m. Am Pegel HRB Bönen, Ablaufpegel wurde das Messprofil als Rechteckelement aus Gabionen erstellt. Dieses hat eine Gewässerbreite von 3,00 m und während der Messung eine Wassertiefe von 0,60 m. Alle Pegel fallen nach [1] in den Bereich der schmalen Gerinne, weshalb die empfohlene Mindestanzahl nach **Tabelle 1** berücksichtigt werden sollten. Die Messungen wurden jeweils über vor Ort vorhandene oder mobile Messbrücken mit einem hydrometrischen Flügel durchgeführt. Die Auswertung der Messungen erfolgte im Nachgang mit der SoftwareQ.

Damit der Einfluss der Anzahl der Messlotrechten korrekt analysiert und bewertet werden kann, wurde an jedem Pegel eine Durchflussmessung mit einer hohen Messlotrechtenanzahl durchgeführt. Hierbei wurde die Anzahl der Lotrechten so

gewählt, dass einerseits die Vorgaben der DIN EN ISO 748 [1] berücksichtigt wurden, andererseits aber auch ein maximaler Abstand von rund 0,10 m bis 0,13 m zwischen den Lotrechten vorhanden war. Die sich hieraus ergebenden maximalen Messlotrechten je Pegel können der **Tabelle 2** entnommen werden.

Soweit möglich wurden je Messlotrechte 3-Punktmessungen zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m durchgeführt, in den Uferbereich wurde aufgrund der geringeren Tiefe auf 2- bzw. 1-Punktmessungen zurückgegriffen. Die Wahl der Tiefen der einzelnen Messpunkte erfolgte nach [1] auf Basis des Verfahrens mit verringerten Messpunkten. Je Messpunkt wurde die Fließgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 30 Sekunden gemessen.

2.1 Auswertung der Durchflussmessungen

Die Auswertung der Durchflussmessungen erfolgte in der SoftwareQ des Ingenieurbüros Wasser und Umwelt in der Version 4.0.11. Die mittlere Fließgeschwindigkeit der einzelnen Messlotrechten wird durch numerische Interpolation des Geschwindigkeitsprofils aus den Messwerten bestimmt. Auf eine detaillierte Beschreibung der Berechnung wird hier verzichtet und auf entsprechende Literatur verwiesen [1], [2], [5].

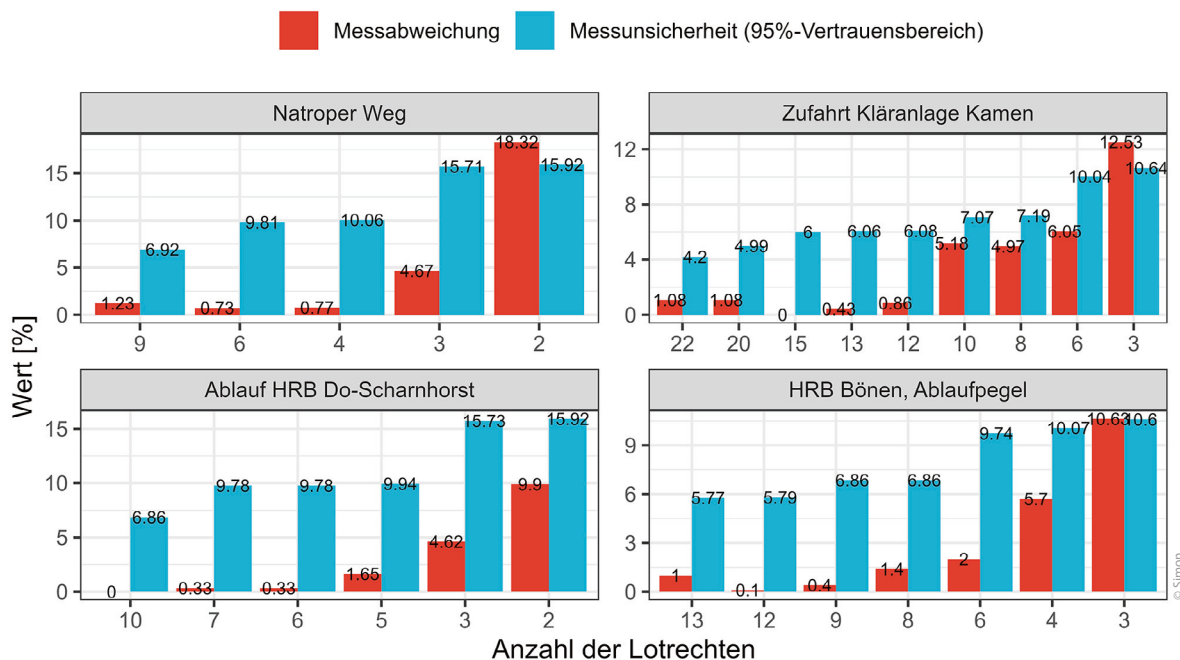


Bild 1: Abweichung der Messung (rot) zur Referenzmessung und zugehörige Messunsicherheit mit 95%-Vertrauensbereich (blau) in Abhängigkeit der verringerten Anzahl der Messlotrechten

Damit die Beurteilung der Auswirkung einer geringen Messlotrechtenanzahl korrekt interpretiert werden kann, wurde systematisch die Anzahl der Messlotrechten je Pegel in SoftwareQ in mehreren Schritten bis auf ein Minimum verringert. Mit diesem Verfahren konnte berücksichtigt werden, dass für die Auswertungen immer die Durchflussmessung mit der maximalen Messlotrechtenanzahl als Referenz dient und immer die gleichen Bedingungen vorliegen. Somit konnte ausgeschlossen werden, dass es durch wiederholte Durchflussmessungen bereits zu Messabweichungen kommt. An den Pegeln HRB Bönen, Ablaufpegel und Zufahrt Kläranlage Kamen, Lünener Straße wurde die Anzahl der Messlotrechten auf zwei und bei den Pegeln Ablauf HRB Do-Scharnhorst und Natroper Weg auf drei reduziert. Es handelt sich hierbei um eine konstante Anpassung der Lotrechten, sodass die Messlotrechten immer gleichverteilt (gleicher Abstand zwischen den Lotrechten) über den Querschnitt sind. Eine zusätzliche Variante, bei welcher die Aufteilung der Messlotrechten an die Verteilung der Fließgeschwindigkeit angepasst wurden, wurde ebenfalls durchgeführt, hier jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Zusätzlich zur Abweichung der Messungen wurde auch jeweils die Unsicherheit der Durchflussmessungen bestimmt. Messunsicherheiten entstehen unter anderem durch die eingesetzten Messgeräte, das Messverfahren oder auch das Messpersonal, wobei jede Messung mit Unsicherheiten behaftet ist [5]. Die Berechnung der Unsicherheiten von stangengeführten Durchflussmessungen sind in der DIN EN ISO 748 geregelt. Die relative kombinierte Standardunsicherheit setzt sich hierbei aus einzelnen Standardunsicherheiten der jeweiligen Messkomponenten, wie zum Beispiel der Messung der Tiefe oder auch der Fließgeschwindigkeit, zusammen. Nach [1] wird die kombinierte Standardunsicherheit anhand der nachfolgenden Formel berechnet:

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\Sigma\left(\left(b_i d_i v_i\right)^2\left(u_{b_i}^2 + u_{d_i}^2 + \left(u_{v_i}^2 + \left(\frac{1}{n_i}\right)\left(u_{c_i}^2 + u_{e_i}^2\right)\right)\right)\right)}{\left(\Sigma b_i d_i v_i\right)^2} \quad (1)$$

Die Messunsicherheit wird in der Hydrometrie üblicherweise als erweiterte Messunsicherheit mit einem Vertrauensbereich von 95 % angegeben. Auf eine detaillierte Beschreibung der Bestimmung der Messunsicherheit wird hier verzichtet und auf entsprechende Literatur verwiesen [1], [6], [7], [8].

3 Ergebnisse

Der Vergleich der Messabweichungen durch eine verringerte Messlotrechtenanzahl wird nachfolgend ausschließlich auf die Größe Q bezogen. Es werden jeweils die Abweichungen der Durchflussmessungen sowie die zugehörige berechnete Messunsicherheit nach [1] auf Basis eines 95%igen Vertrauensbereichs betrachtet. Die Ergebnisse der vier betrachteten Pegel sind in **Bild 1** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass deutliche Unterschiede zwischen dem Verlauf der berechneten Messabweichung und Messunsicherheit vorhanden sind. Die Abweichung der Durchflussmessung zur Referenzmessung liegt bei allen vier Pegeln erst bei der geringsten Lotrechtenanzahl (2 bzw. 3) über einem Wert von 10 %. Bei den Pegeln Natroper Weg und Ablauf HRB Do-Scharnhorst liegt die Messabweichung bei einer Durchflussmessung mit nur 3 Lotrechten (Referenzmessung 18 bzw. 20) sogar unter 5 %. Weiter ist zu erkennen, dass eine deutliche Verringerung der Messlotrechtenzahl nicht unbedingt einen starken Einfluss auf das Messergebnis hat.

Die Ergebnisse der Messunsicherheit, welche nach der DIN EN ISO 748 berechnet wurden, zeigen, dass diese höher ausfallen als die Messabweichung, auch wenn beide Parameter nicht unbedingt direkt miteinander verglichen werden können. Es wird dennoch ersichtlich, dass eine Steigerung der Messunsicherheit nur an bestimmten Stellen vorhanden ist. Diese Veränderung fällt genau an die Stellen, an denen die Tabelle D.6 der DIN EN ISO 748 eine Änderung der Unsicherheit auf Basis der begrenzten Anzahl an Messlotrechten vorsieht (jeweils bei 25, 20, 15, 10 und 5). Werden Messabweichung und Messunsicherheit weiter verglichen, lässt sich erkennen, dass die Messabweichung mit einer höheren Lot-

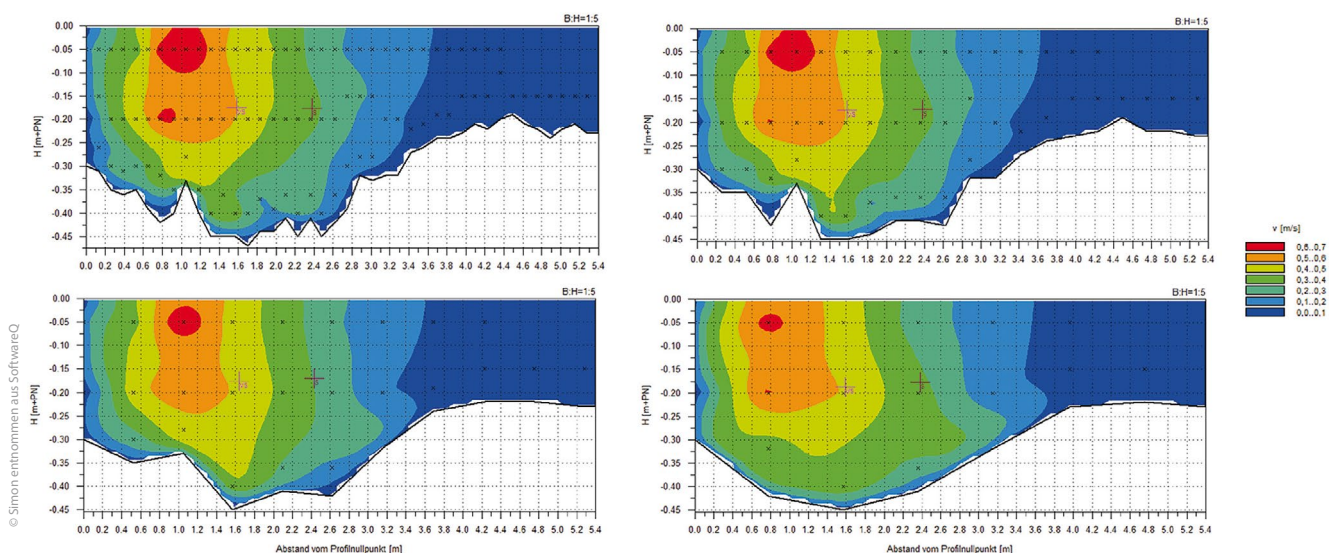


Bild 2: Isotachenpläne des Pegels Zufahrt Kläranlage Kamen mit der Referenzmessung mit 40 Messlotrechten (oben links) sowie den in SoftwareQ angepassten Durchflussmessungen mit 20 (oben rechts), 10 (unten links) und 6 Messlotrechten (unten rechts)

rechtenanzahl konstant bleibt oder nur gering ansteigt und erst in den letzten Schritten sprunghaft ansteigt, wohingegen die Messunsicherheit teilweise um mehrere Prozent steigt.

Bild 2 zeigt die Isotachenpläne des Pegels Zufahrt Kläranlage Kamen für vier ausgewählte Messungen. Hierbei stellt der Isotachenplan oben links die vor Ort durchgeführte Referenzmessung mit 40 Messlotrechten auf einer Breite von 5,40 m dar. Weiter sind die in SoftwareQ angepassten Messungen mit einer verringerten Lotrechtenanzahl von 20 (oben rechts), 10 (unten links) und 6 (unten rechts) dargestellt. Aus dieser Darstellung ist erkennbar, dass der grundlegende Geschwindigkeitsverlauf über den Querschnitt bei allen vier Messungen ziemlich identisch verläuft, was sich auch in einer geringen Messabweichung widerspiegelt. Die Messabweichungen zur Referenzmessungen (oben links) betragen bei einer Messung mit 20 Lotrechten (oben rechts) nur 1,08 %, bei 10 Lotrechten (unten links) 5,18 % und bei 6 Lotrechten (unten rechts) 6,05 %. Eine Messung mit 12 Messlotrechten würde hier sogar eine Abweichung von nur 0,86 % aufweisen. Bei der Variante, dass die Verteilung der Messlotrechten an die Fließgeschwindigkeitsverteilung angepasst wird, ergeben sich insgesamt noch geringere Messabweichungen. Dennoch ist ersichtlich, dass Tiefeninformationen verloren gehen und die Gewässersohle nicht so detailliert dargestellt werden kann.

4 Fazit

Messabweichungen und Messunsicherheiten sind ein wichtiger Bestandteil der Hydrometrie und können nicht gänzlich vermieden werden. Aus Gründen der Qualitätssicherung sollten diese jedoch so gering wie möglich gehalten werden, da die aus den Durchflussmessungen gewonnenen Daten grundlegend für die Ermittlung von Niedrig- und Hochwasserwahrscheinlichkeiten oder auch für den Betrieb und Planung von wasserwirtschaftlichen Anlagen sind. Allerdings müssen auch Aspekte des Betriebs und der Unterhaltung von Pegelmessstellen beachtet werden, so dass eine Optimierung des Zeit- und Ressourcenaufwands für Messungen erfolgen sollte.

Aus den hier aufgezeigten Untersuchungen geht hervor, dass die Unsicherheit von Durchflussmessungen nicht zwingend durch eine geringe Messlotrechtenanzahl getrieben wird. Es wird ersichtlich, dass eine deutliche Verringerung der Messlot-

Felix Simon, Lucas Eckel, Christoph Mudersbach
and Alexander Hartung

Comparison and evaluation of discharge measurements according to the velocity-area method in relation to the limited number of measurement verticals

DIN EN ISO 748 creates regulations applicable to rod-guided flow measurements, among other things for determining the uncertainties of flow measurements. However, it has been shown that when calculating the measurement uncertainties, the number of measuring verticals used has a large impact on the total uncertainty of a flow measurement. In order to determine the influence of the number of verticals on the measured flow, flow measurements were carried out at four gauging stations and systematically evaluated.

rechtenanzahl, auch unterhalb der Angaben der DIN EN ISO 748, vorgenommen werden kann, ohne dass es zu einer hohen Messabweichung kommt. Der große Vorteil hierbei liegt insbesondere im Zeitaufwand für eine Durchflussmessung. Je geringer der Zeitaufwand desto geringer ist auch der Kostenaufwand für eine Durchflussmessung. Gerade im Hochwasserfall ist es wichtig, dass die Dauer einer Messung nicht zu hoch ausfällt, damit Veränderungen des Wasserstandes innerhalb einer Messung möglichst geringgehalten werden.

Die durchgeführten Untersuchungen müssen mit weiteren Durchflussmessungen an anderen Pegeln verifiziert werden. Es lässt sich doch schon jetzt erkennen, dass die Anzahl der Messlotrechten, wie sie in der aktuellen Version der DIN EN ISO 748 gefordert werden, deutlich verringert werden kann. Insbesondere an Pegeln mit einem einfachen gegliederten Querschnitt (Rechteck oder V-Profil) reichen wenige Messlotrechten oft aus, um dennoch ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten. Zusätzlich könnte bei der Berechnung der Messunsicherheit die Gewässerform und das Verhältnis von Messlotrechtenanzahl zu Gewässerbite berücksichtigt werden.

Autoren

Felix Simon, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Mudersbach

Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum

felix.simon@hs-bochum.de

christoph.mudersbach@hs-bochum.de

Lucas Eckel, B. Sc.

WWU Münster

(vormals: Emschergenossenschaft/Lippeverband)

Schlossplatz 2, 48149 Münster

leckel@uni-muenster.de

Dr. Alexander Hartung

Emschergenossenschaft/Lippeverband

Kronprinzenstraße 24, 45128 Essen

hartung.alexander@eglv.de

Literatur

- [1] Norm DIN EN ISO 748:2022: Hydrometrie. Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten. 2022.
- [2] Morgenschweis, G.: Hydrometrie. 2. A. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [3] Despax, A. et al.: Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. In: Journal of Hydrology 533 (2016), S. 128-140.
- [4] Simon, F. et al.: Unsicherheitsbetrachtung von Durchflussmessungen und deren Auswirkungen auf Hoch- und Niedrigwasserkennwerte. In: WasserWirtschaft 111 (2021), 7-8, S. 30-33.
- [5] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder: Pegelhandbuch. 5. A. Berlin: Kulturbuch-Verlag GmbH, 2018.
- [6] Cohn, T. A.; Kiang, J. E.; Mason, R. R.: Estimating Discharge Measurement Uncertainty Using the Interpolated Variance Estimator. In: Journal of Hydraulic Engineering 139 (2013), Heft 5, S. 502-510.
- [7] Herschy, R. W.: The uncertainty in a current meter measurement. In: Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002), 5-6, S. 281-284.
- [8] Simon, F.; Netzel, F.; Mudersbach, C.: Ein Vorschlag für einen vereinfachten Berechnungsansatz der Messunsicherheit. In: WasserWirtschaft 109 (2019), 7-8, S. 80-83.

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-023-1872-9>