



Messfehler von magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten (MID) bei Sedimentablagerungen

Electromagnetic flowmeters and their measurement errors caused by sediments

Dipl.-Ing. Thomas Kraus, Dipl.-Ing. Andreas Müller

Zusammenfassung

Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (MID) können Durchflüsse in Druckrohrleitungen sehr genau erfassen, wenn die entsprechenden Randbedingungen eingehalten werden. Ihr Einsatzbereich ist vielfältig und in zahlreichen Industriebereichen bereits standardisiert. Im Kanalnetz wird die Messrohrleitung häufig gedübelt ausgeführt, um eine ständige Vollfüllung der Rohrleitung zu gewährleisten. Diese Konstruktion kann allerdings zu Ablagerungen im Rohr führen und Fehlmessungen hervorrufen. Zur Abschätzung der möglichen Messfehler wurden Berechnungen vorgenommen sowie Experimente an einer Laborleitung durchgeführt und einem konkreten Fall im Kanalnetz gegenübergestellt.

Summary

Electromagnetic flowmeters (MID) register discharges in pressure pipes very precisely, if certain requirements, for example uniform flow conditions, can be guaranteed. The area of application is multifarious and standardised in numerous industrial applications. In sewerage the pipe of measurement is often built as a syphon to guarantee permanent and complete filling. However this construction can lead to sedimentation in the pipe and induce errors in measuring. To estimate possible errors in measuring calculations and laboratory experiments were carried out and compared with a real case in a sewer.

Laboratory experiments indicated that the electric valences of the sediments influence the measurement errors very decisively. Calculations with the assistance of SHERCLIFF's valences for a homogenous magnetic field allowed the error estimation depending on the thickness of the sediment layer. A dependence to the measurement range could not be verified.

The sewerage measurements consisted of level- and discharge-measurements. While level-measurements indicated the degree of sedimentation and therefore were carried out in short intervals the discharge measurements were executed only after observing a change of thickness of the sediment layer.

The results of the sewerage measurements approximately matched the calculations and laboratory experiments.

1 Einleitung

Magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte nutzen die von Faraday und Maxwell formulierten elektromagnetischen Gesetzmäßigkeiten zur Messung von Fließgeschwindigkeiten in einem bekannten Querschnitt. Die Vollfüllung des Rohres ermöglicht nach der Flächenintegration der gemessenen Fließgeschwindigkeiten die Ermittlung des Durchflusses.

Die Geräte bestehen in der Regel aus einem Messwertaufnehmer, der in die Rohrleitung eingebaut wird. Die Messsignale werden zu einem Messwertumformer übertragen, der das Messergebnis verstärkt, aufbereitet, auf der Anzeige darstellt und ein proportionales Ausgangssignal erzeugt.

Im Rahmen der Eigenkontrollverordnung (EKVO) werden im Bundesland Hessen unter anderem Durchflussmesseinrichtungen auf Kläranlagen und bei industriellen Einleitern regelmäßigen Überprüfungen unterzogen. In dem der Verordnung angegliederten Merkblatt "Durchflussmesseinrichtungen und Drosselorgane in Abwasseranlagen" werden die wichtigsten Randbedingungen zum Einbau von MID angegeben.

Grundlage für sehr genaue Messungen ist ein radialsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil, weshalb die erforderlichen Längen der störungsfreien Vor- und Nachlaufstrecken bei der entsprechenden Einbausituation unbedingt eingehalten werden müssen. Bei der Dimensionierung gilt, dass eine Mindestfließgeschwindigkeit eingehalten werden muss, damit Ablagerungen nicht zu einer Verringerung des Fließquerschnitts führen und keine Fehlmessungen auftreten. Zu beachten ist auch die vom Hersteller angegebene Referenzfehlerkurve, die Hinweise über erzielbare Genauigkeiten in Abhängigkeit vom Messbereich gibt.

Werden die Richtlinien zum Einbau von MID nicht oder nur teilweise eingehalten, können Fehlmessungen auftreten. Aus Anlass einer aktuellen Sedimentations-Problematik an einem MID mit dem Durchmesser DN 1000 stellte sich die Frage nach den Fehlmessungen, die durch Ablagerungen hervorgerufen wurden. Dazu wurden Messungen an dem Problem-MID vor Ort und an einem Versuchsmid mit dem Durchmesser DN 200 durchgeführt sowie die theoretischen Messfehler berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in diesem Artikel dargestellt.

2 Laboruntersuchungen und Berechnungen

In den gebräuchlichen MID fließt das elektrisch leitfähige Wasser durch ein Magnetfeld, wodurch zwischen den senkrecht zur Fließrichtung und zum Magnetfeld angeordneten Elektroden eine elektrische Spannung induziert wird. Diese Spannung wird an den Elektroden abgegriffen und kann zu einem Durchfluss umgerechnet werden. Für ein homogenes Magnetfeld und einen ungestörten Kreisquerschnitt ist die Spannung zwischen den Elektroden dem Durchfluss proportional. Die Berechnung der Spannung kann mit der SHERCLIFF'schen Wertigkeitsverteilung erfolgen (SHERCLIFF 1955, siehe auch BONFIG 1987):

$$U = \frac{2 \cdot B}{r \cdot \pi} \cdot \int_A W_S(x,y) \cdot v_z(x,y) \, dA \quad (1)$$

$$W_S(x,y) = \frac{1 + \xi^2 - \eta^2}{1 + 2 \cdot (\xi^2 - \eta^2) + (\xi^2 + \eta^2)^2} \quad (2)$$

$$\text{mit } \xi = \frac{x}{r} \text{ und } \eta = \frac{y}{r}$$

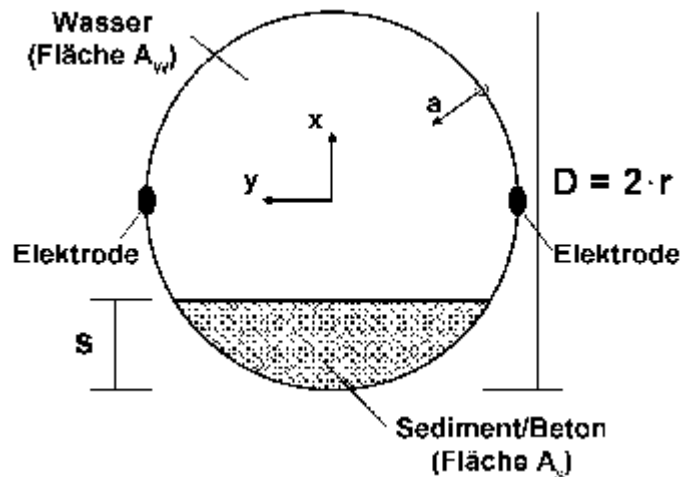


Abb. 1: Schema eines sedimentierten MID
Fig. 1: Scheme of a MID with sedimentation

Um theoretische Messfehler zu ermitteln, müssen die induzierten Spannungen abhängig von Sedimentationshöhe und Durchfluss nach Gleichung (1) jeweils für das sedimentierte und freie MID berechnet und miteinander verglichen werden. Unter Berücksichtigung, dass das Integral in Gleichung (1) für rotationssymmetrische Strömungsprofile den Durchfluss Q liefert, ergibt sich für den Messfehler F_v aus der veränderten Geschwindigkeitsverteilung ($v_z=0$ im Bereich des Sediments) folgende Gleichung:

$$F_v(D,s,Q,k_S) = \frac{1}{Q} \int_A W_S(x,y) \cdot v_{zS}(x,y) \, dA - 1 \quad (3)$$

Bei den Berechnungen wurde die Geschwindigkeitsverteilung nach ZANKE 1996 ermittelt, mit der turbulent-glatte bis -vollrauhe Fließzustände wie auch der Übergangsbereich sowie ein laminarer wandnaher Bereich durchgängig abgebildet werden kann. Um die theoretischen Messfehler für verschiedene Durchmesser D , Sedimentationshöhen s , Durchflüsse Q und Rauigkeiten k_S zu ermitteln, wurde das Integral in Gleichung (3) numerisch über ca. 4000 Teilflächen ausgewertet (Abb.2, Abb.3 und Abb.4). Es zeigte sich, dass die so ermittelten Messfehler nahezu unabhängig vom Durchfluss Q und der Rauigkeit k_S sind und sich eine dimensionslose

Darstellung in Abhängigkeit vom Verhältnis Sedimentationshöhe zum Durchmesser s/D anbietet. Die Ergebnisse aus der Berechnung und den Versuchs-Messungen sind in Abb.6 dargestellt.



Abb. 2: SHERCLIFF' sche Wertigkeiten $W_S(x,y)$ von 0,5 bis 2 dargestellt über dem Einheitskreis
Fig. 2: Valences $W_S(x,y)$ from 0,5 to 2 after SHERCLIFF

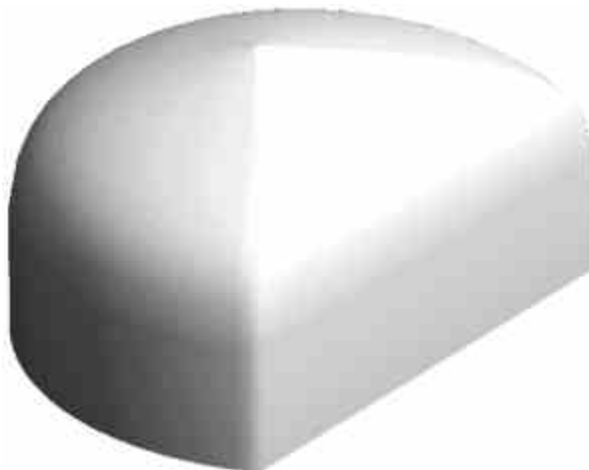


Abb. 3: Geschwindigkeitsverteilung $v_z(x,y)$ in einem sedimentierten MID ($s/D=0,25$) in normierter Darstellung ($v_{z,max}=1$) über dem Einheitskreis
Fig. 3: Distribution of flow velocity $v_z(x,y)$ in a MID with sediments ($s/D=0,25$)



Abb. 4: Produkt aus Wertigkeiten und Geschwindigkeiten (Abb. 2/3)
Fig. 4: Product of valences and flow velocities (Fig. 2/3)

Für die Messungen im Labor wurden zwei wägetank-kalibrierte MID mit dem Durchmesser DN 200 verwendet. Während in einem MID die verschiedenen Ablagerungsstärken mit unterschiedlich hohen, speziell angefertigten Betonformstücken nachgebildet wurden (Abb.5), blieb das andere MID unbeeinflusst und diente als Vergleichsmessung. Es wurden für Durchflüsse von 5 bis 60 l/s jeweils die Abweichungen des sedimentierten MID gegenüber dem Vergleichs-MID ermittelt (Abb.6).



Abb. 5: Laborleitung mit Betonformteil zur Simulation der Sedimentation

Fig. 5: Laboratory-pipe with concrete element for sediment-simulation

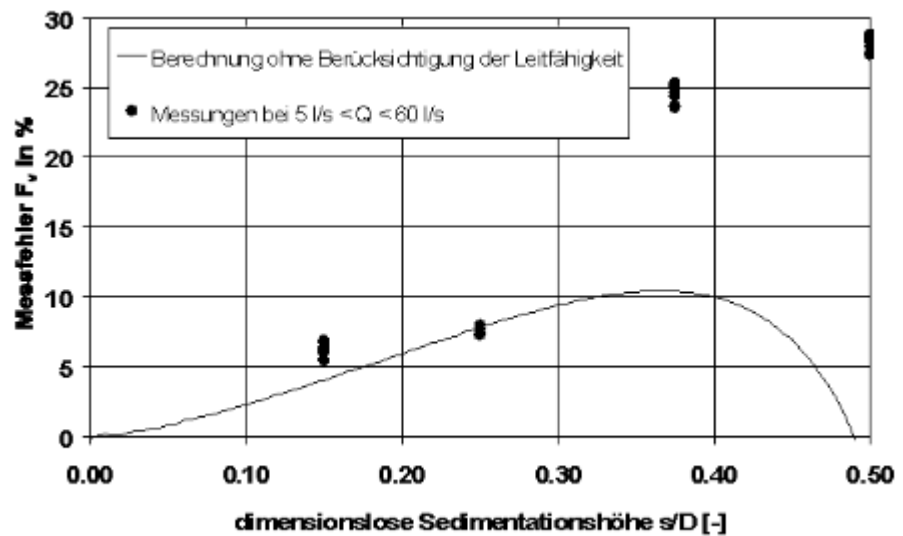


Abb. 6: Theoretischer Messfehler $F_v(s/D)$ und gemessene Messfehler ohne Berücksichtigung der Leitfähigkeiten

Fig. 6: Calculated and measured error in measurement $F_v(s/D)$ without having regard to the valences

Die dichte Lage der Messpunkte bei gleicher Sedimentationshöhe (Abb.6) bestätigt die Berechnungen, die eine weitgehende Unabhängigkeit der Messfehler vom Durchfluss ergaben. Der Vergleich zwischen Messung und Berechnung zeigt weiterhin, dass für kleine Sedimentationsverhältnisse s/D die Übereinstimmung gut, für

große s/D aber die berechneten, theoretischen Fehler zu klein ermittelt werden.

Die Abweichungen der Messergebnisse von den mit dem oben beschriebenen Verfahren berechneten Messfehlern in Abb.6 lassen sich mit den unterschiedlichen Leitfähigkeiten des fließenden Wassers k_W und des im MID liegenden wassergesättigten Sediments k_S erklären. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass die Leitfähigkeit des Wassers deutlich größer ist, als die des wassergesättigten Sediments. Um den Einfluss der Leitfähigkeiten auf die Messfehler abschätzen und berechnen zu können, ist es sinnvoll auf das Wertigkeitskonzept nach BEVIR 1971 zurückzugreifen (vgl. auch BONFIG 1987):

$$U = \int_V \vec{W}_B \cdot \vec{v} \, dV$$

mit:

$$\vec{W}_B = \vec{B} \times \left(\frac{\kappa}{I} \cdot \vec{E} \right) \quad (4)$$

Die Wertigkeitsvektoren W_B könnten dadurch bestimmt werden, dass bei ruhender Flüssigkeit ein Strom I zwischen den Elektroden angelegt wird und man die dabei entstehenden Feldstärken E in der Flüssigkeit misst oder auch als Potenzialströmung berechnet. Für den ungestörten Kreisquerschnitt bei homogenem Magnetfeld und der Annahme nur einer Geschwindigkeitskomponente in der Rohrachse (z -Achse) ergibt das über die Rohrachse ausgewertete Integral in Gleichung (4) die SHERCLIFFsche Wertigkeitsverteilung. Die Ermittlung der Wertigkeiten nach Gleichung (4) für Sedimentationsverhältnisse von $0 < s/d < 0,5$ und Leitfähigkeitsverhältnissen $k_W/k_S > 1$ ist sehr aufwendig, denn das Feldstärken- bzw. Wertigkeitsfeld verzerrt sich, wenn verschiedene Leitfähigkeiten im Querschnitt auftreten. Interessanterweise tritt jedoch solch eine Verzerrung für den Fall $s/D=0,5$ nicht auf. In diesem Fall steigen bei einem angenommenen Strom I die Feldstärken E , die Wertigkeiten W_B und damit auch die Spannung U in Gleichung (4) proportional an. Die durch verschiedene Leitfähigkeiten bedingten zusätzlichen Messfehler F_k lassen sich also leicht nach Gleichung (5) berechnen (Parallelschaltung von Widerständen) und sind in Abb.7 dargestellt:

$$F_k(s/D = 0,5, \kappa_W / \kappa_S) = \frac{2}{1 + 1/(\kappa_W / \kappa_S)} - 1 \quad (5)$$

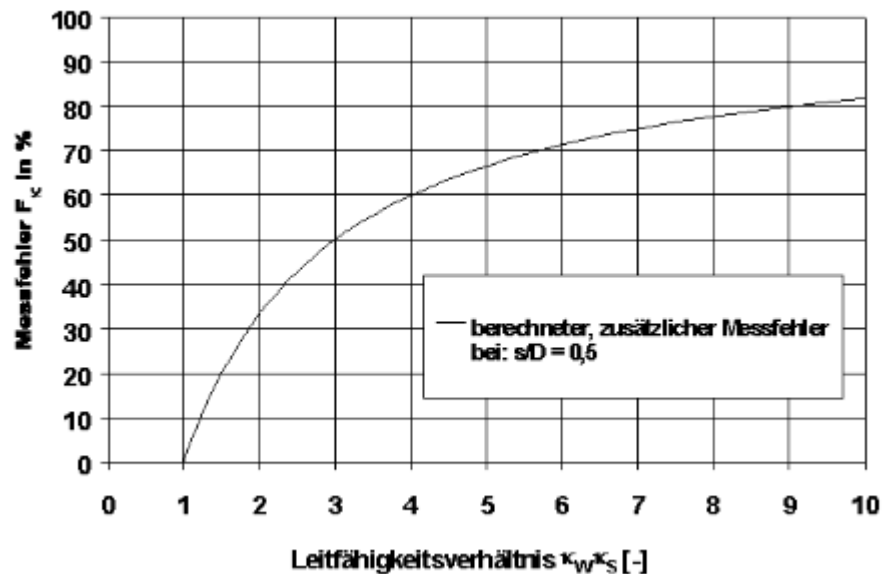


Abb. 7: Messfehler F_k in Abhängigkeit vom Leitfähigkeitsverhältnis

$$k_W/k_S$$

Fig. 7: Measurement error depending on conductivity ratio k_W/k_S

Die Berechnung des theoretischen zusätzlichen Messfehlers bei halber Belegung des Querschnitts mit einem elektrisch nicht leitenden Sediment ergibt nach Gleichung (5) den Wert $F_k(s/D=0,5, k_W/k_S=\infty) = 100\%$. Das heißt, dass sich in diesem Fall die abgegriffene Messspannung und damit auch der vom MID angezeigte Durchfluss allein aus der Änderung der Wertigkeiten verdoppelt!

Eine hälftige Belegung eines MID mit Sedimenten ist natürlich nicht praxisrelevant, trotzdem lassen sich mit den Ergebnissen aus Gleichung (5) auch für Sedimentationsverhältnisse $0 < s/d < 0,5$ die zusätzlichen Messfehler F_k aus Leitfähigkeitsverhältnissen $k_W/k_S > 1$ abschätzen. Für eine Schätzfunktion für $F_k(s/D, k_W/k_S)$ sind bisher die Werte $F_k(s/D=0,5, k_W/k_S)$ (Gleichung (5)) und $F_k(s/D=0, k_W/k_S)=0$ bekannt. Diese Punkte sind geeignet zu verbinden. Aufgrund der Kenntnis, dass sich die Wertigkeiten aus einer Potentialströmung ableiten lassen, kann ausgesagt werden, dass die partielle Ableitung von F_k nach s/D an der Stelle $s/D=0$ Null und für $s/D=0,5$ relativ groß sein muss. Aufgrund dieser Eigenschaften der gesuchten Funktion kann davon ausgegangen werden, dass der Verlauf von $F_k(s/D, k_W/k_S)$ gut durch eine Potenzfunktion x^k mit $k > 1$ beschrieben werden kann. Nimmt man $k=3$ an und überlagert die ermittelten Fehlerfunktionen $F_v(s/D)$ und $F_k(s/D, k_W/k_S)$ zur Gesamtfehlerfunktion $F_{v,k}(s/D, k_W/k_S)$, ergeben sich die in Abb.8 dargestellte Funktionsverläufe. Es ist zu erkennen, dass sich die an einem Versuchs-MID gemessenen Messfehler gut durch die oben gemachten Betrachtungen und Berechnungen erklären und nachvollziehen lassen. Die Übereinstimmung der Fehlerfunktion $F_{v,k}(s/D, k_W/k_S=2)$ mit den

Messwerten lässt auf ein Leitfähigkeitsverhältnis von ca. $k_W/k_S \gg 2$ schließen.

Die verwendete Shercliff'sche Wertigkeitsverteilung gilt eigentlich nur für homogene Magnetfelder, so dass die Anwendbarkeit für MID neuerer Bauart in Frage stand, in denen meist inhomogene Felder zum Einsatz kommen. Trotz intensiver Literaturrecherche konnte aber kein geeigneteres Berechnungsmodell für MID neuerer Bauart gefunden werden. Die gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten deutet aber auf die Eignung des oben beschriebenen Berechnungsverfahrens hin.

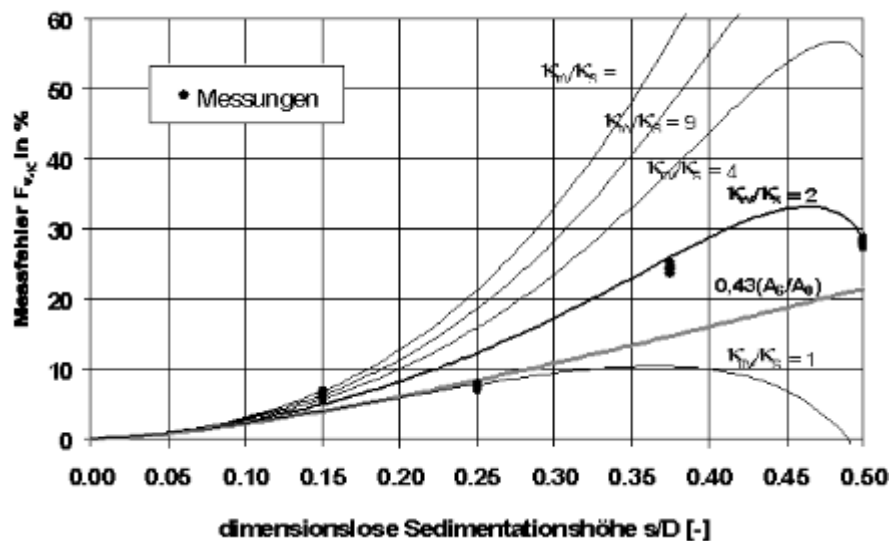


Abb. 8: Näherungsfunktionen der Messfehler $F_{v,k}(s/D, k_W/k_S)$

Fig. 8: Approximated functions of measurement errors

3 Messungen im Kanal

In einem Kanalabschnitt eines Abwasserverbandes wurden im Bereich eines Messdükers Ablagerungen festgestellt. In dem Düker befand sich ein MID mit dem Nenndurchmesser von DN 1000. Der Durchmesser des ankommenden Kanals betrug DN 1600. Die weiterführende Kanalstrecke war als Kastenprofil mit schräger Sohle (Fünfeckkanal) ausgeführt. Die Höhenlage gewährleistete eine ständige Vollfüllung der Messrohrleitung bei allen auftretenden Abflüssen. Der Trockenwetterabfluss betrug ca. 250 l/s, im Regenwetterfall traten bis zu 1400 l/s auf.

Zur Analyse von eventuell ablagerungsabhängigen Fehlmessungen wurden im Rahmen eines Messprogramms Durchflussmessungen sowie Messungen der Ablagerungsstärken vorgenommen. Die Häufigkeit der Messungen richtete sich dabei nach dem Grad der Veränderungen der Ablagerungsstärken im Messrohr.

Das Messprinzip der Durchflussmessung durfte nur möglichst geringen Fehlereinflüssen unterliegen und musste unter den vorgegebenen Bedingungen vor Ort leicht einsetzbar sein. Wegen der großen Kanaldimension schied eine Vergleichsmessung mit einem mobilen, im Labor kalibrierten MID aus. Auch von einer Vielpunktmessung mit

einer magnetisch-induktiven Messsonde wurde abgesehen, da instationäre Verhältnisse damit nicht hinreichend genau berücksichtigt werden konnten. Um trotzdem ein hydraulisches Messverfahren anzuwenden, fiel die Entscheidung auf den Einsatz eines Messwehres, welches in die zum Zuströmschacht des Messdükers mündende Rohrleitung eingebaut werden sollte.

Für die Ermittlung der Ablagerungsstärken wurde ein Tastpegel druckdicht in die Messrohrleitung eingebaut. Der Pegel bestand aus einer kreisrunden Platte mit dem Durchmesser von ca. 15 cm und einer in Plattenmitte angebrachten Stange. Die gesamte Konstruktion konnte bis zum Rohrscheitel hochgeschoben und bis zur Rohrsohle herabgelassen werden. Bei vollständig gehobenem Pegel schloss die Platte mit der Rohrwandung bündig ab, so dass keine Beeinflussung der Strömung durch in den Querschnitt hineinragende Bauteile vorlag.

einer Komplettreinigung von Messrohrleitung und zuführendem Kanal wurden kontinuierlich Messungen der Ablagerungsstärken vorgenommen. Während nach einigen Wochen bei Trockenwetterabfluss keine nennenswerten Ablagerungen auftraten, konnte nach Ablauf eines stärkeren Regenereignisses eine Ablagerungsschicht von ca. 25 bis 30 cm Stärke festgestellt werden. Vergleichsmessungen mit dem Messwehr ergaben bei dieser Situation Abweichungen von ca. 11 %. Auch nach einer erneuten Reinigung der Messrohrleitung wurde Geschiebe erst nach größeren Regenereignissen eingetragen. Die Ablagerungsstärke betrug auch in diesem Fall ca. 25 bis 30 cm.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen können Abb.9 entnommen werden.

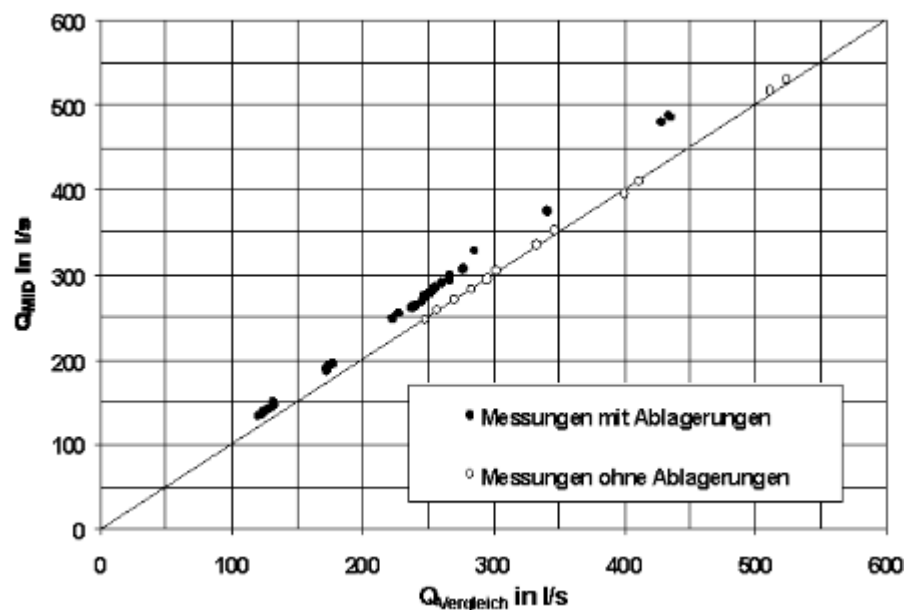


Abb. 9: Ergebnis der Vergleichsmessungen
Fig. 9: Results of the comparative measurements

Die Lage der Punkte oberhalb der 45°-Linie verdeutlicht, dass von der Messeinrichtung zu große Abflüsse ermittelt werden. Die Abweichungen liegen zwischen 10 und 15 % und betragen im Mittel ca. 11 %. Abb.10 stellt die gemessenen Abweichungen in Abhängigkeit vom Messbereich dar. Neben den Messungen im Kanal sind auch die Labormessungen bei verschiedenen Ablagerungsstärken aufgetragen. Es ist auch bei den Messungen im Kanal keine Abhängigkeit der Abweichungen vom Messbereich erkennbar.

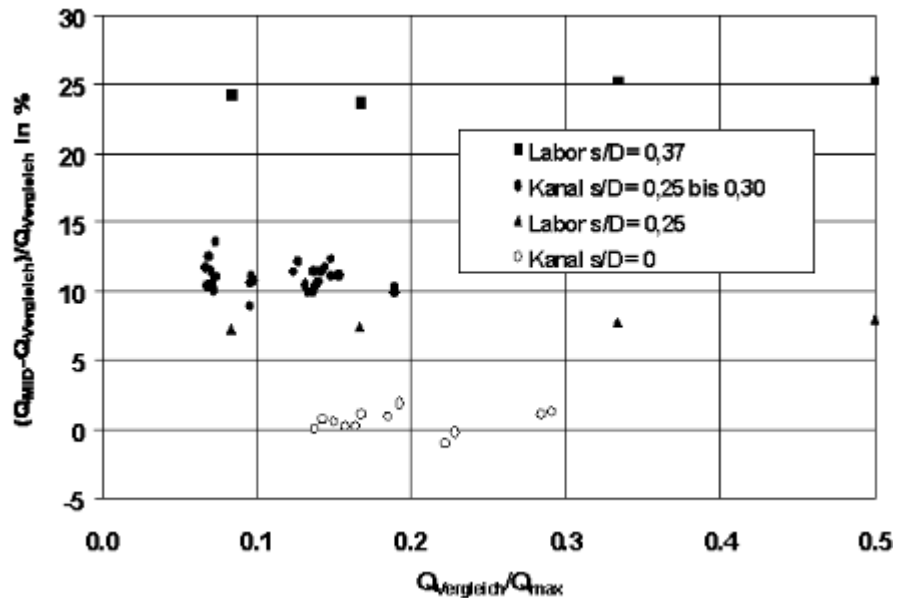


Abb. 10: Darstellung der gemessenen Abweichungen
Fig. 10: Plot of the measured discrepancies

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ablagerungen in MID-Messrohrleitungen führen zu Fehlmessungen. Gegenüber einer von Sedimenten freien Leitung wird der Abfluss hier überschätzt.

Laborversuche und Berechnungen ergaben außerdem, dass die theoretischen Messfehler $F_{v,k}$ eines sedimentierten MID im wesentlichen nur vom Verhältnis Sedimentationshöhe zu Durchmesser s/D und vom Leitfähigkeitsverhältnis Wasser/wassergesättigtes Sediment k_W/k_S abhängig sind. Zusätzliche Messungen an einer Messstelle vor Ort bestätigten diese Untersuchungen.

Im betrachteten Fall einer Messleitung im Kanalsystem (DN 1000) und einer Ablagerungsstärke von 25 bis 30 cm lag über den Messbereich ein annähernd konstanter Fehler von ca. 11 % vor.

Für den praktischen Gebrauch und zur näherungsweise Abschätzung von Mindestmessfehlern in sedimentierten MID können die Gleichungen 6 und 7 herangezogen werden (siehe die graue Linie in Abb.8).

(6)

$$F_v(s/D) \geq 0,43 \cdot \frac{A_s}{A_0}$$

mit:

$$\frac{A_s}{A_0} \left(\frac{s}{D} \right) = \frac{1}{\pi} \left(2 \cdot \arccos \left(1 - 2 \frac{s}{D} \right) + \left(1 - 2 \frac{s}{D} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - 2 \frac{s}{D} \right)^2} \right) \quad (7)$$

**Verwendete
Kurzzzeichen:**

a Abstand eines Punktes zur Wandung [m]

A Symbol für die Fläche des MIDs senkrecht zur Rohrachse

A_0 Gesamtfläche des MIDs senkrecht zur Rohrachse [m²]

A_S sedimentierte Fläche des MIDs senkrecht zur Rohrachse [m²]

B magnetischer Induktion bei homogenem Magnetfeld [T=Vs/m²]

D Durchmesser MIDs [m]

F_k zusätzlicher durch die Wirkung von kW/kS bedingter Messfehler [-]

F_v durch eine veränderte Geschwindigkeitsverteilung bedingter Messfehler [-]

$F_{v,k}$ Gesamtmessfehler [-]

I Stromstärke, die bei v=0 zwischen den Elektroden erzwungen wird [A]

k spezifische Leitfähigkeit [S/m=A/(Vm)]

k_W spezifische Leitfähigkeit des fließenden Wassers [S/m]

k_S spezifische Leitfähigkeit des wassergesättigten Sediments [S/m]

r Radius des MID [m]

s Sedimentationshöhe im MID [m]

$v_z(x,y)$ Fließgeschwindigkeit in Richtung der Rohrachse [m/s]

$v_{z,S}(x,y)$ vz im sedimentierten MID [m/s]

$W_S(x, y)$ Shercliffsche Wertigkeit [-]

$B(x,y,z)$ magnetischer Induktionsvektor [$T=Vs/m^2$]

$E(x,y,z)$ gemessene oder berechnete elektrische Feldstärke [V/m]

$v(x,y,z)$ Fließgeschwindigkeitsvektor [m/s]

$W_B(x,y,z)$ Wertigkeitsvektor nach BEVIR [Vs/m^4]

Literatur

BEVIR, M. K. (1971): Long induced voltage electromagnetic flowmeters and the effect of velocity profile. Quart. Journ. Mech. and Applied Math., Vol. XXIV, Pt. 3, S. 347-372.

BONFIG, K.W. (1987): Technische Durchflußmessung. Essen, Vulkan-Verlag.

SHERCLIFF, J. A. (1955): Experiments on the dependence of sensitivity on velocity profile in electromagnetic flowmeters. J. Schi. Instr. 32, S. 441-442.

ZANKE, U. C. E. (1996): Lösungen für das universelle Geschwindigkeitsverteilungsgesetz und die Shields-Kurve. Wasser & Boden, 48. Jahrgang, Heft 9, S. 21 - 26.

Autoren

Dipl.-Ing. Thomas Kraus
Dipl.-Ing. Andreas Müller

Technische Universität Darmstadt
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Petersenstraße 13

64287 Darmstadt

Tel.: 06151/163643

Fax: 06151/163243

email: kraus@ihwb.tu-darmstadt.de



[Diese Seite drucken](#)

[FENSTER SCHLIESSEN](#)