

Quantitative Durchflußmessung

Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.2.5 „Quantitative und qualitative Abflußmessung“

Mitglieder dieser Arbeitsgruppe sind:

Prof. Dr. *Valentin*, München (Sprecher)
 Dipl.-Ing. *Grottker*, Hannover
 Dipl.-Ing. *Härig*, Köln
Irmann, Essen
Schramm, Maulburg
Schremmer, Dortmund
 Dr. *Vogel-Raudschus*, Lippstadt

Vorbemerkungen

Die Arbeitsgruppe 1.2.5 der ATV „Quantitative und qualitative Abflußmessung“ hat sich zum Ziel gesetzt, den gegenwärtigen Stand der Meßtechnik auf dem Gebiet der Durchflußmessung und der damit zu verbindenden Probenahme zur Bestimmung von Inhaltsstoffen aufzuzeigen, den gestellten Anforderungen gegenüberzustellen und der laufenden Entwicklung anzupassen. Entsprechende Ausarbeitungen sollen über die Korrespondenz Abwasser als Information den Anwendern zugänglich gemacht werden.

Als erster Teil wird mit diesem Beitrag eine Zusammenstellung über die momentan verfügbaren Durchflußmeßverfahren vorgelegt, welche für den Einsatz in Kanalnetzen und auf Kläranlagen geeignet erscheinen. Bei den einzelnen Meßverfahren wird auf die in DIN 19559, Teil 1, gewählte Einteilung zurückgegriffen. Von dem in der Norm gewählten Vorgehen einer möglichst gleichartigen Behandlung aller Verfahren wird jedoch abgewichen. Durch die Hervorhebung der für das Meßmedium Abwasser besonders geeigneten Verfahren soll zugleich die Entwicklung betriebssicherer Meßsysteme beeinflusst werden.

Gliederung

1. Zweck und Art der Durchflußmessung
2. Meßverfahren
 - 2.1 Durchflußbestimmung über Wasserstandsmessung
 - 2.1.1 Verfahren mit Querschnittseinengung
 - 2.1.1.1 Venturi-Kanäle
 - 2.1.1.2 Meßwehre
 - 2.1.1.3 Sohlschwellen
 - 2.1.2 Verfahren ohne Querschnittseinengung
 - 2.1.2.1 Wasserstandsmessung in einem Querschnitt
 - 2.1.2.2 Wasserstandsmessung in zwei Querschnitten
 - 2.2 Durchflußbestimmung über die Fließgeschwindigkeit
 - 2.2.1 Punktmessung
 - 2.2.2 Messung entlang einer Meßgeraden
 - 2.2.3 Messung über einen Meßquerschnitt
 - 2.3 Volumetrische Verfahren
 - 2.4 Verdünnungsverfahren
3. Meßwertaufnehmer
 - 3.1 Wasserstand
 - 3.1.1 Meßwertaufnehmer in Kontakt mit dem Meßmedium
 - 3.1.1.1 Schwimmer
 - 3.1.1.2 Automatischer Stechpegel
 - 3.1.1.3 Einperlung
 - 3.1.1.4 Druckmeßdose
 - 3.1.2 Meßwertaufnehmer ohne direkten Kontakt mit dem Meßmedium

- 3.2 Fließgeschwindigkeit
 - 3.2.1 Aufnehmer im Meßquerschnitt
 - 3.2.1.1 Meßflügel
 - 3.2.1.2 Staurohr
 - 3.2.1.3 Eintauch-MID
 - 3.2.2 Aufnehmer an der Berandung des Meßquerschnitts
 - 3.2.2.1 Magnetisch-Induktive Durchflußmesser (MID)
 - 3.2.2.1.1 Druckrohr-MID
 - 3.2.2.1.2 Gerinne-MID
 - 3.2.2.2 Ultraschallmeßgeräte
 - 3.2.2.2.1 Meßgeräte nach dem Mitführungseffekt
 - 3.2.2.2.2 Meßgeräte nach dem Prinzip des Doppler-Effekts
- 3.3 Tracer
4. Genauigkeitsanforderungen
5. Empfehlungen für die Einrichtung von Durchflußmeßstellen
 - 5.1 Meßstellen mit Querschnittseinengung
 - 5.1.1 Venturi-Kanal
 - 5.1.2 Druckrohr-MID
 - 5.2 Meßstellen ohne Querschnittseinengung
 - 5.2.1 Gerinne-MID
 - 5.2.2 Ultraschallmeßgeräte
6. Literaturhinweise

1. Zweck und Art der Durchflußmessung

An Einleitungsstellen in das öffentliche Kanalnetz bzw. in den Vorfluter wird die Durchflußmessung in Verbindung mit der Messung der Inhaltsstoffe zur Frachtermittlung herangezogen. Daneben sind sowohl im Kanalnetz als auch auf der Kläranlage Durchflußmeßstellen zur Überwachung der Stoffströme bzw. zu Steuerzwecken eingesetzt.

Grundsätzlich kann zwischen Dauer- und Kurzzeitmessungen unterschieden werden. Hierbei ist von Fall zu Fall zu prüfen, ob eine ständige Verfügbarkeit des Meßsignals unbedingt erforderlich ist, da die Anforderungen an die Zuverlässigkeit bei Dauermessungen ungleich höher sind und mit entsprechendem Wartungsaufwand verbunden sein können. Insbesondere bei mengenmäßig kleinen Einleitern ist zu prüfen, ob kurzzeitige Kontrollmessungen (z. B. für eine Woche) eine ausreichende Grundlage zur Frachtermittlung bilden. Einzelmessungen werden zur Kontrolle und zur Kalibrierung bestehender Meßeinrichtungen eingesetzt. Hierbei ist eine intensive Wartung über kürzere Zeit eher möglich.

2. Meßverfahren

Der physikalisch korrekt als Volumenstrom zu definierende Durchfluß kann als Produkt von mittlerer Geschwindigkeit und durchflossener Querschnittsfläche dargestellt werden. Er ist deshalb nur indirekt bestimmbar, wobei immer mehrere Meßgrößen zu erfassen sind. Die Veränderung dieser Meßgrößen über den gesamten Meßbereich ist maßgeblich für die Güte der Messung. Hierbei tritt vor allem im Kanalnetz als besonders erschwerend für die Meßaufgabe das ungünstige Verhältnis zwischen den Extremwerten für die Abflüsse hinzu. Dies ist besonders dann der Fall, wenn der Abflußvorgang in Gerinnen oder Leitungen mit freier Oberfläche stattfindet und Durchflußänderungen gleichzeitig Veränderungen in der Querschnittsfläche hervorrufen. Bei Druckleitungen ist die Meßaufgabe einfacher, da die Querschnittsfläche konstant bleibt, als Meßgröße von vornherein zur Verfügung steht und nur mit einer Meßgröße für die mittlere Geschwindigkeit verknüpft werden muß.

In offenen Gerinnen wird zur Überwindung der meßtechnischen Schwierigkeiten häufig auf die Möglichkeit der Querschnittseinengung zurückgegriffen. Gegenüber dem ungestörten Abfluß hat dies immer eine verzögerte Bewegung im oberstrom gelegenen Gerinneabschnitt zur Folge. Beim mehrphasigen Fluid Abwasser wird in Verzögerungsstrecken die Tendenz zur Phasentrennung verstärkt. Partikeln mit größerer Dichte als die des Trägerfluids fallen vermehrt aus und begünstigen Ablagerungen. Grundsätzlich sind daher die Gerinneabschnitte oberhalb von Einengungen auf mögliche Ablagerungen zu kontrollieren. Damit ist ein zusätzlicher Wartungsaufwand verbunden.

Im folgenden werden vier Arten von Meßverfahren vorgestellt, die im Bereich der Abwasserfortleitung und -behandlung eingesetzt werden.

2.1 Durchflußbestimmung über Wasserstandsmessung

Eine oder mehrere Wasserstandsmessungen sind nur dann aussagefähig für die Wassermengenbestimmung, wenn die strömungstechnischen Randbedingungen gleichzeitig Rückschlüsse auf die Fließgeschwindigkeit zulassen. Mit der Meßgröße Wasserstand allein ist in offenen Gerinnen bzw. teilgefüllten Rohrleitungen nur die durchflossene Fläche feststellbar. Die Meßverfahren dieser Gruppe werden daher auch als die sog. hydraulischen Verfahren gekennzeichnet.

2.1.1 Verfahren mit Querschnittseinengung

Durch den teilweisen Verbau des Querschnittes soll ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Durchfluß und dem Wasserstand unmittelbar oberstrom der Verengung hergestellt werden. Möglich ist dies nur bei strömendem Zufluß und einem Durchlaufen der Grenzverhältnisse im Bereich der Verengung. Unter den Grenzverhältnissen besteht für jede beliebige Querschnittsform ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der dort auftretenden Grenztiefe und der zugehörigen Geschwindigkeit, so daß der Durchfluß in diesem Kontrollquerschnitt bestimmt werden kann. Bei der Beziehung zwischen Grenztiefe und Grenzgeschwindigkeit wird von einer hydrostatischen Druckverteilung ausgegangen. Wegen des beträchtlichen Wasserspiegelgefälles beim Durchlaufen der Grenzverhältnisse ist die Grenztiefe selbst nicht als Meßgröße geeignet. Deshalb erfolgt die Berechnung des Durchflusses mit Hilfe der als Meßgröße gewählten Oberwassertiefe über die minimale Energiehöhe im Grenzquerschnitt. Je nach dem für die Meßaufgabe erforderlichen Aufwand können dabei Energiehöhenverluste zwischen der Meßstelle für die Oberwassertiefe und dem eigentlichen Kontrollquerschnitt berücksichtigt oder vernachlässigt werden.

Das Verfahren setzt voraus, daß die Verhältnisse unterhalb der Verengung keinen Einfluß auf den Wasserstand vor der Verengung haben, der Durchfluß also rückstaufrei bleibt. Charakteristisch für diese Verfahren ist der Aufstau und damit die Verzögerung der Fließgeschwindigkeit vor der Einengung, der Übergang zum Schießen hinter der Einengung und damit ein erzwungener Energiehöhenverlust im Wechselsprung beim Fließwechsel Schießen-Strömen. Die nachstehend genannten drei Verfahren unterscheiden sich im wesentlichen durch die Gestaltung der Verengung.

2.1.1.1 Venturi-Kanäle

Wesentlicher Bestandteil des Venturi-Kanals sind die symmetrisch angeordneten, seitlichen Einschnürungen des Gerinne-

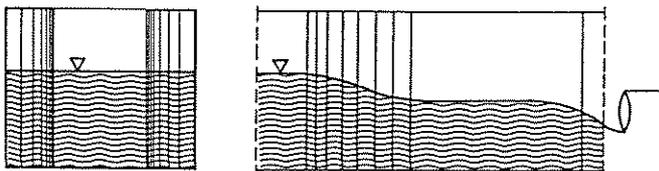


Bild 1: Schematische Darstellung einer symmetrischen seitlichen Einschnürung (Venturi-Kanal)

querschnittes (siehe Bild 1). Besonders beachtet werden muß dabei die strömungsgünstig auszubildende Verziehung auf der Anströmseite, welche Voraussetzung für eine optimale Gestaltung ist. Dagegen kann auf die bisher gebräuchlichen langen Verziehungen unterrom verzichtet werden. Diese waren ursprünglich wegen des Druckhöhenrückgewinns für die Messung in Druckrohren entwickelt worden, haben wegen des Energiehöhenüberschusses im Bereich der Engstelle für die Freispiegelströmung jedoch keine Bedeutung. Eine Ausnahme bilden allerdings die Kurzbauformen, bei denen die Länge der Drosselstrecke wesentlich kleiner als die zweifache maximale Oberwassertiefe ist. Hier ist wegen der besonderen Druckverhältnisse im Bereich der Verbauung das Gesamtsystem inklusive Verziehungen auf der Abströmseite wichtig.

Venturi-Kanäle sind die bisher in Kanalstrecken, vor allem in den Einlaufbereichen von Kläranlagen, gebräuchlichsten Meßeinrichtungen zur Durchflußmessung. Wegen dieser Bedeutung wurden Venturi-Kanäle in der DIN 19559, Teil 2, genormt. In dieser Norm wird aufgezeigt, daß eine Anpassung des Venturi-Kanals durch eine freie Gestaltung des Querschnittes in der Einengung an vielfältige Meßaufgaben möglich ist. Die erzielbare Genauigkeit bei der Durchflußmessung ist aufgrund des Meßprinzips im unteren Teil des Meßbereiches allerdings eingeschränkt, wobei die Untergrenze einer verlässlichen Messung von den örtlichen Verhältnissen, wie Gerinneabmessungen und Abwasserzusammensetzung, abhängig ist. Bei kleinen Durchflüssen nahe der unteren Grenze des Meßbereiches ist zudem die Ablagerungsfreiheit im Staubereich durch entsprechende Wartung sicherzustellen. Gegenüber den Meßwehren und Sohlschwellen hat der Venturi-Kanal den bedeutsamen Vorteil, daß durch die Einbauten an der Seitenwand des Gerinnes der Sohlenbereich unverbaut bleibt. Grundsätzlich kann auch im Bereich der Meßstelle das Kanal-längsgefälle erhalten bleiben. Ein Übergang auf einen horizontalen Gerinneabschnitt im Bereich der Einengung, u. U. sogar mit einem Absturz am Ende der Einschnürung, ist nicht erforderlich. Ein Sohlabsturz wäre hydraulisch nur bei ungünstigen Unterwasser-Verhältnissen sinnvoll. Die gleiche Wirkung ist zweckmäßiger mit einem besser angepaßten Querschnitt in der Einengung zu erreichen. Der Venturi-Einbau im offenen Gerinne erlaubt bei optimaler Formgebung die Bestimmung des Durchflusses bis zur maximalen Füllhöhe des Zulaufgerinnes. Wegen der Messung der Wassertiefe sind jedoch ausreichende Zuströmbedingungen im Oberwasser zu beachten, die einen relativ großen Platzbedarf zur Folge haben. Rein theoretisch sind bei vorgegebenem Maximaldurchfluß beliebig kleine Durchflüsse berechenbar. Im allgemeinen sind ausreichende Genauigkeiten unterhalb von Verhältnissen $Q_{\min}/Q_{\max} < 0,1$ nur unter günstigen Voraussetzungen zu erzielen.

2.1.1.2 Meßwehre

Meßwehre werden aus dünnwandigen Platten mit genau definierten Überfallkanten hergestellt. Je nach Meßaufgabe werden dabei dreieckige, rechteckige oder trapezförmige Ausschnitte gewählt (siehe Bild 2). Der Einbau der Wehre erfolgt senkrecht zur Anströmrichtung im offenen Gerinne. Da der Überfallstrahl vollständig belüftet sein muß, ist eine Mindestwehrhöhe zu beachten. Dieser Abstand zwischen Gerinnesohle und dem Beginn der Überfallkante bedingt von vorneherein einen Aufstau. Bei ungeklärtem Abwasser können Meßwehre deshalb nur für Kurzzeitmessungen herangezogen werden. Dabei ist darauf zu achten, daß der Raum vor dem Meßwehr ablagerungsfrei bleibt und keine

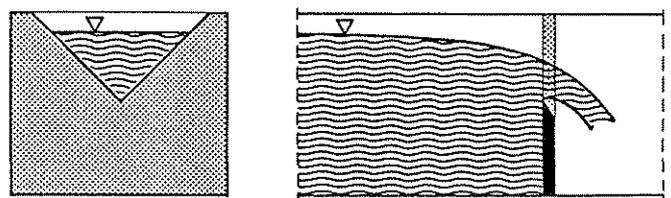


Bild 2: Abfluß über ein dreieckförmiges Meßwehr

Anlagerung von Feststoffen an der Überfallkante erfolgen kann. Unter günstigen Voraussetzungen, z. B. feststofffreiem, gereinigtem Abwasser, können unter Beachtung der Einbaubedingungen sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden. Beim Dreiecksverkehr sind aufgrund der Geometrie Verhältnisse Q_{min}/Q_{max} bis 0,01 zu erzielen. Wegen des geringen baulichen Aufwandes (Stecknut) sind Meßwehre für Kontrollmessungen und zur Kalibrierung anderer Meßeinrichtungen geeignet.

2.1.1.3 Sohlschwellen

Im Gegensatz zum Venturi-Kanal erfolgt die Einengung des Querschnittes nicht im Bereich der Seitenwände sondern an der Gerinnesohle (siehe Bild 3). Je nach Art können hierbei Kurzformen mit strömungsgünstiger Gestaltung oder Wehre mit breiter Krone zur Anwendung kommen. Ähnlich wie beim Venturi-Kanal bringen auch hier die längeren Bauarten günstigere Voraussetzungen für eine theoretische Vorausberechnung mit, wogegen die Kurzformen modelltechnisch auf ihr Abflußverhalten zu untersuchen sind.

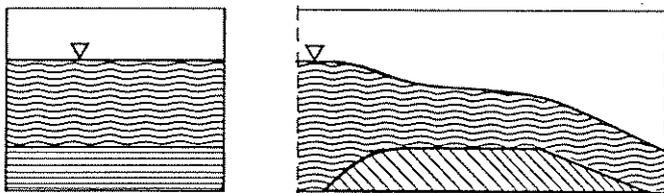


Bild 3: Abfluß über eine Sohlschwelle

Voraussetzung für die eindeutige Zuordnung zwischen Wasserstand und Abfluß ist auch hier das Durchlaufen der Grenzverhältnisse mit dem Fließwechsel von Strömen zum Schießen. Rückstau einflüsse sind auszuschließen, da dann die Oberwassertiefe allein nicht mehr als ausreichende Meßgröße zur Durchflußbestimmung unter Rückstau herangezogen werden kann. Die Durchflußbestimmung unter Rückstau ist mit der Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser zu koppeln, was zu erheblichen Abstrichen bei der erzielbaren Genauigkeit führt.

Verglichen mit dem Venturi-Kanal hat die Sohlschwelle den Vorteil des geringeren baulichen Aufwandes. Ähnlich wie beim Meßwehr wird durch die Unstetigkeit an der Gerinnesohle am Ort der Meßeinrichtung allerdings die Ablagerung von Feststoffen begünstigt. Bereits geringfügige Ablagerungen unmittelbar vor einer Sohlschwelle beeinflussen die Anströmbedingungen und verursachen daher Abweichungen in der Abflußcharakteristik. Sohlschwellen werden daher vorzugsweise für Einzelmessungen eingesetzt, wenn bei schwierigen örtlichen Verhältnissen ohne großen Aufwand eine Durchflußmessung mit ausreichender Meßgenauigkeit ermöglicht werden soll.

2.1.2 Verfahren ohne Querschnittseinengung

Wird auf die Querschnittseinengung verzichtet, so geht der durch das Extremalprinzip gewonnene eindeutige Bezug zwischen Abfluß und minimaler Energiehöhe verloren. Dies bedeutet vom Grundsatz her, daß diese eindeutige Beziehung in einem Kontrollquerschnitt ersetzt werden muß durch eine Zuordnung, bei der über die Längsentwicklung des Gerinnes ein Zusammenhang zwischen Wassertiefe und mittlerer Fließgeschwindigkeit in einem betrachteten Gerinneabschnitt gefunden werden muß. Zwangsläufig sind hierbei nur indirekt bestimmbare und zudem variable Größen wie das Widerstandsverhalten mit in die Überlegungen einzubeziehen. Vom Ergebnis her kann das nur zu unschärferen Aussagen führen, die Durchflußbestimmung ist in diesen Fällen mit größeren Toleranzen behaftet und als Grundlage für Abrechnungen nicht brauchbar.

2.1.2.1 Wasserstandsmessung in einem Querschnitt

Bei der Messung in einem einzigen Querschnitt (siehe Bild 4) geht zwangsläufig die Information über mögliche Veränderungen der Wassertiefe längs des Gerinnes verloren. Dies hat natürlich Kon-

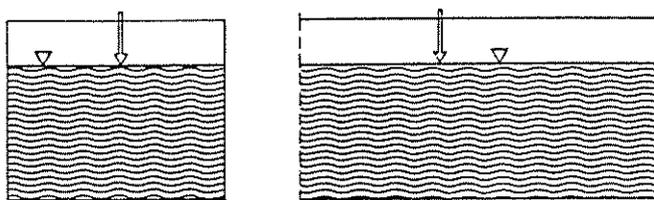


Bild 4: Prinzipskizze der Wasserstandsmessung in einem Querschnitt

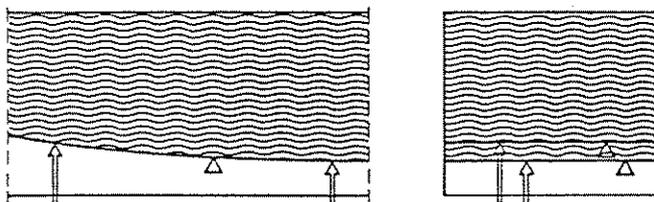


Bild 5: Wasserstandsmessung in zwei Querschnitten

sequenzen auf die zu treffenden Annahmen. Eine Wasserstandsmessung kann hierbei nur über einen fiktiven Abflußzustand, dem stationär gleichförmigen Abfluß, mit dem zugehörigen Abfluß verknüpft werden. Der stationär gleichförmige Abfluß dient wohl als Grundlage für die Dimensionierung von Kanalstrecken, seine Aussagefähigkeit im Hinblick auf das tatsächliche Geschehen ist jedoch mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden, da die idealisierenden Voraussetzungen für diesen Zustand im Kanalnetz nirgends anzutreffen sind. Hier wird angenommen, daß das Wasserspiegelgefälle mit dem Sohlgefälle gleich ist und somit längs des Gerinnes ein unveränderlicher Wasserstand vorherrscht. Der Ersatz des tatsächlich feststellbaren veränderlichen Wasserstandes durch einen fiktiven unveränderlichen ist Grundvoraussetzung für dieses Verfahren.

Da es sich bei dieser denkbar einfachen Maßnahme um eine reine Wasserstandsmessung handelt, sind die erzielbaren Ergebnisse um so unsicherer, je stärker die Abweichungen vom postulierten gleichförmigen Abfluß sind. Am besten kann dies verdeutlicht werden für den Fall eines Rückstaus, bei dem im Meßquerschnitt die Geschwindigkeit Null erreicht werden kann. Da nur die Wassertiefe als Meßgröße eingeht, wird trotzdem ein Durchfluß angezeigt. Aus diesem Grunde sollte auf dieses Verfahren nur in Ausnahmefällen zurückgegriffen und eine sorgfältige Interpretation der Aufzeichnung anhand des vorliegenden Gerinneabschnittes vorgenommen werden.

2.1.2.2 Wasserstandsmessung in zwei Querschnitten

Bei der Wasserstandsmessung in zwei Querschnitten werden Veränderungen in der Wassertiefe an den Endpunkten einer gewählten Meßstrecke erfaßt (siehe Bild 5). Somit entfällt die Voraussetzung des stationär gleichförmigen Abflusses. Über einen Energiehöhenvergleich zwischen den beiden Meßstellen kann dann auf den Durchfluß geschlossen werden. Dabei muß allerdings ein Energiehöhenverlust infolge der Fließwiderstände berücksichtigt werden, der zweckmäßigerweise für mittlere Verhältnisse zwischen den beiden Querschnitten bestimmt wird.

Gegenüber der Wasserstandsmessung in nur einem Querschnitt bringt dieses Verfahren wesentliche Vorteile, so kann z. B. ein abflußloser Zustand wegen des dann horizontalen Wasserspiegelverlaufs erkannt werden. Allgemein steigt die Genauigkeit mit dem feststellbaren Unterschied zwischen den beiden Wassertiefen. Hierbei führt die beschleunigte Bewegung wiederum zu genaueren Ergebnissen als die verzögerte. Im Bereich von Senkungskurven werden unter günstigen Verhältnissen gute Genauigkeiten erzielt. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß sowohl das Sohlgefälle als auch das Widerstandsverhalten ausreichend sicher anzugeben sind. Da in die Durchflußberechnung die Wasserspiegeldifferenz eingeht, sind an die Wasserstandsmessung entsprechend hohe Anforderungen zu stellen.

2.2 Durchflußbestimmung über die Fließgeschwindigkeit

Entsprechend der unter Ziff. 2 angeführten Definition des Durchflusses sind zu dessen Bestimmung die Größen durchflossene Querschnittsfläche und mittlere Fließgeschwindigkeit erforderlich. Die Messung irgendeiner örtlichen Geschwindigkeit im Querschnitt bedarf daher zunächst einer Zuordnung zur mittleren Fließgeschwindigkeit und einer anschließenden Verknüpfung mit der Querschnittsfläche. Nur im vollgefüllten Kreisrohr kann daher auf einen Meßwert für die Querschnittsfläche verzichtet werden. Beim Abfluß mit freier Oberfläche ist zusätzlich eine Wasserstandsmessung im Meßquerschnitt für die Flächenbestimmung erforderlich. Im folgenden werden die bekannten Verfahren zur Messung der Fließgeschwindigkeit wiedergegeben.

2.2.1 Punktmessung

Die Messung erfolgt mit einem geeigneten Meßwertaufnehmer nur für einen ausgewählten Punkt im Fließquerschnitt (siehe Bild 6). Dieses Verfahren ist für Dauermessungen nur dann geeignet, wenn über den gesamten Meßbereich eine Kalibrierung mit einem aufwendigeren Meßverfahren vorgenommen wurde und abgesichert ist, daß für alle denkbaren Abflußzustände ein reproduzierbarer Zusammenhang zwischen der örtlichen und der mittleren Fließgeschwindigkeit besteht. Normalerweise kann die punktförmige Messung nur für Einzelmessungen herangezogen werden, bei denen eine größenordnungsmäßige Abschätzung des Durchflusses vorgenommen werden soll und die punktförmig ermittelte Fließgeschwindigkeit als Anhaltswert für die mittlere Fließgeschwindigkeit dient. Eine wesentliche Erweiterung der Punktmessung stellt die sogenannte Netzmessung dar, bei der im Meßquerschnitt über die Messung an möglichst vielen Punkten eine aufwendige Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils vorgenommen wird. Im Abwasser ist ein Einsatz dieser Methode allerdings nur im Kläranlagenablauf zu Kalibrierzwecken denkbar.

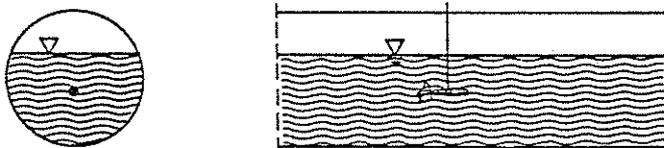


Bild 6: Prinzipskizze der Geschwindigkeitsmessung an einem Punkt im Querschnitt

2.2.2 Messung entlang einer Meßgeraden

Bei diesem bereits aufwendigeren Verfahren können Einzelmessungen zu einem Mittelwert längs der Meßgeraden verarbeitet werden (siehe Bild 7). Dies wird möglich durch

- eine Reihe von Punktmessungen
- eine integrierende Messung während der Verschiebung eines geeigneten Aufnehmers
- eine Ultraschallströmungsmessung unter Ausnutzung des Mitführungseffektes.

Der Mittelwert der Geschwindigkeit längs der Meßgeraden ist wiederum der mittleren Geschwindigkeit des gesamten Fließquerschnittes zuzuordnen. Hierzu ist eine Kalibrierung erforderlich. Es ist einleuchtend, daß durch den größeren Informationsgehalt über die Geschwindigkeitsverteilung eine gegenüber der Punktmessung verbesserte Genauigkeit zu erwarten ist. Je nach

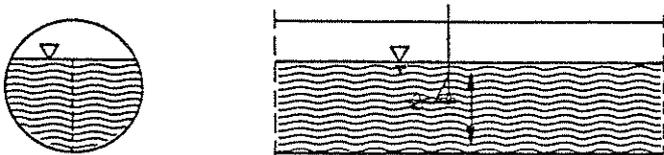


Bild 7: Prinzipskizze der Geschwindigkeitsmessung längs einer Meßgeraden durch vertikales Verschieben des Aufnehmers

Lage der Meßgeraden im Meßquerschnitt, realisierbar sind Vertikalaufnahmen zur Gerinnesohle bzw. in horizontalen Ebenen liegende Meßgeraden, ist die Zuordnung zur mittleren Fließgeschwindigkeit unterschiedlich zu bewerten. Insbesondere unter Rückstau einfluß werden mit Meßgeraden senkrecht zur Gerinnesohle Veränderungen im Geschwindigkeitsprofil und ihr Bezug zur mittleren Fließgeschwindigkeit besser erfassbar.

2.2.3 Messung über einen Meßquerschnitt

Ein wesentlicher Fortschritt für die Durchflußmessung wurde durch die Anwendung des Faradayschen Induktionsgesetzes zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit erzielt. Ausgenutzt wird dabei das Phänomen, daß durch die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld eine Spannung induziert wird (siehe Bild 8). Da Abwasser in der Regel die erforderliche Mindestleitfähigkeit besitzt, kann es als Leiter aufgefaßt werden. Durch die Strömung des Abwassers senkrecht zu einem Magnetfeld wird daher eine Meßspannung induziert, die an geeigneten Stellen durch Elektroden abgenommen wird. Besonders vorteilhaft ist, daß die abgegriffene Spannung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Meßquerschnitt proportional ist.

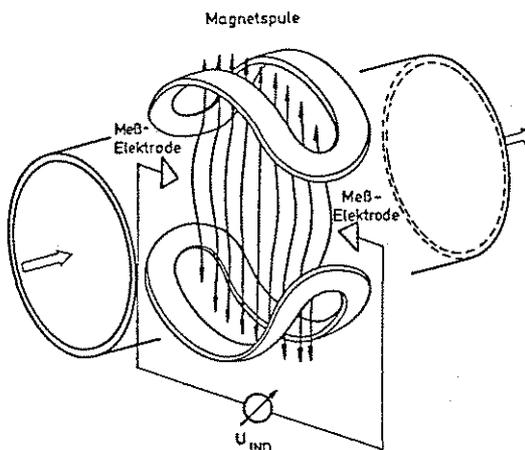


Bild 8: Prinzip der induktiven Durchflußmessung

Gegenüber allen Verfahren bietet dieses Meßprinzip eine Reihe von gravierenden Vorteilen, so daß insbesondere bei Durchflußmessungen in Druckrohrleitungen inzwischen eine deutliche Dominanz dieses Verfahrens festzustellen ist. Bedeutsam sind insbesondere die hohe erzielbare Genauigkeit über große Meßbereiche, großzügige Einbauvorschriften, da durch die verfeinerte Meßtechnik keine symmetrischen Geschwindigkeitsprofile benötigt werden, und der hydraulisch neutrale Einbau ohne Verengung und zusätzliche Verluste.

Auch für den Abfluß mit freier Oberfläche ist das Meßprinzip einsetzbar. Der unterschiedliche Beitrag der einzelnen Querschnittsflächenanteile zur Meßspannung muß für jeden Wasserstand kompensiert werden. Wegen der Verbindung mit einer Wasserstandsmessung sind die erzielbaren Genauigkeiten von vorneherein geringer als beim vollgefüllten Querschnitt.

2.3 Volumetrische Verfahren

Während bei den bisher vorgestellten Verfahren die Fläche und mittlere Geschwindigkeit als Meßgrößen bestimmt werden mußten, wird hier die Messung des Volumens bei gleichzeitiger Messung der Zeit vorgenommen. Der Volumenstrom wird durch den Quotienten aus den Meßgrößen Volumen und Zeit gebildet. Von Bedeutung ist besonders die diskontinuierliche Messung über einen einmal zu füllenden Behälter. Weniger häufig erfolgen kontinuierliche Messungen über Kippbehälter und Wasserzähler, weil hier die Anwendungsbereiche doch sehr eingeschränkt sind. Im Bereich der Kläranlage kann z. B. die Füllung des Vorklärbeckens zur Kalibrierung einer vorgeschalteten Meßeinrichtung verwendet werden.

Bei zeitlich veränderlichem Zufluß wird über dieses Verfahren ein integraler Mittelwert erhalten. Die Genauigkeit hängt von der Genauigkeit der beiden Meßgröße ab. Hier ist insbesondere bei großen Behältern eine sehr genaue Bestimmung des Wasserstandes erforderlich.

2.4 Verdünnungsverfahren

Generell ist hierbei zwischen Verfahren mit Dauereingabe und Kurzzeiteingabe zu unterscheiden. Bei der Dauereingabe wird ein Tracer in konstanter Dosierung dem Abwasser zugegeben. An einer genügend stromab gelegenen Meßstelle wird die Konzentration des Tracers gemessen, sobald sich stationäre Verhältnisse eingestellt haben. Aus dieser gemessenen Konzentration, der Konzentration bei der Tracerzugabe und ggf. unter Berücksichtigung einer Hintergrundkonzentration, kann der Durchfluß über die beobachtete Verdünnung berechnet werden.

Bei der Kurzzeiteingabe wird eine bestimmte Tracermenge als Impuls dem Abfluß zugeführt. Zur Durchflußbestimmung muß hierbei über die am Meßort ermittelte Ganglinie der Tracerkonzentration integriert werden. Da die vollständige Durchmischung des Tracers Grundvoraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist, sind hochturbulente Abflüsse mit hohen Reynoldszahlen erforderlich. Sicherzustellen ist darüber hinaus, daß nicht Teile des Tracers an Wasserinhaltsstoffe gebunden werden. Zugabe und Probenahme bedingen ebenso wie die Analytik große Erfahrung. Wegen der immer restriktiver werdenden Haltung der Wasseraufsichtsbehörden gegen die Verwendung von radioaktiven und chemischen Tracern wird die Anwendung im Kanalnetz auf Einzeluntersuchungen beschränkt bleiben. Zur Dauermessung ist das Verfahren wegen des erheblichen Aufwandes kaum geeignet.

3. Meßwertaufnehmer

Ein idealer Meßwertaufnehmer ist robust und wartungsarm und mißt ohne zusätzliche Beeinträchtigung des Fließquerschnittes mit hoher Langzeitkonstanz unbeeinflusst von extremen Umweltbedingungen mit guter Genauigkeit in einem relativ großen Meßbereich den Meßwert. Dieser direkt von DIN 19 559, Teil 1, entnommenen Definition des idealen Meßwertaufnehmers ist nichts hinzuzufügen.

Bei den einzelnen Meßverfahren wurden die Auswirkungen von Querschnittseinengungen bereits eingehend erläutert. Die Verzögerung der Fließgeschwindigkeit oberstrom der Einengung begünstigt die Phasentrennung und zieht somit immer einen unvermeidlichen Wartungsaufwand nach sich. Beeinträchtigungen sind immer zu erwarten, wenn der Meßwertaufnehmer direkten Kontakt mit dem Meßmedium Abwasser hat. Den Idealvorstellungen kommt ein Meßwertaufnehmer nahe, der berührungsfrei mißt und keine Querschnittsveränderung zur Erzeugung des Meßwertes braucht. Zu den unter Ziff. 2 angeführten Meßverfahren werden hier nur zu den Ziff. 2.1, 2.2 und 2.4 Angaben über mögliche Meßwertaufnehmer gemacht, da die Behältermessung keiner näheren Erläuterung bedarf.

3.1 Wasserstand

Bei den meisten unter Ziff. 2 genannten Meßverfahren ist der Wasserstand unverzichtbare Meßgröße zur Bestimmung des Durchflusses oder der Querschnittsfläche. Da der Wasserstand mit der Beaufschlagung des Gerinnes variiert, müssen die hier eingesetzten Aufnehmer die Veränderungen im Wasserstand aufzeichnen können. Wegen der Wartungsbedürftigkeit der mit dem Meßmedium in Berührung stehenden Aufnehmer ist hier zusätzlich unterschieden, ob dieser Kontakt besteht oder nicht.

3.1.1 Meßwertaufnehmer in Kontakt mit dem Meßmedium

Grundsätzlich besteht hier die Gefahr von Anlagerungen, Bewuchs oder Verhängen des Fühlers durch zopfbildende Stoffe, so daß eine Wartung unabdingbar ist. Beim Eintauchen in den Meßquerschnitt ist dann mit zusätzlicher Störung der Strömung zu rechnen.

3.1.1.1 Schwimmer

Die Stellung eines auf der Wasseroberfläche schwimmenden Körpers gegenüber einem Bezugspunkt (siehe Bild 9) wird mittels mechanischer Einrichtungen wie Hebel oder Seilzug auf ein Anzeigergerät oder einen Meßumformer übertragen. Die Störung des Meßquerschnitts wird durch die Verwendung eines eigenen Schwimmerschachtes außerhalb des Gerinnes verringert. Bei der Wartung muß hier auf den unbehinderten Wasseraustausch zum Schwimmerschacht geachtet werden. Da die Eintauchtiefe des schwimmenden Körpers durch seine mittlere Dichte bestimmt wird, ist dieser ablagerungsfrei zu halten. Als Vorteil kann die einfache Kontrolle der Meßwertanzeige gelten.

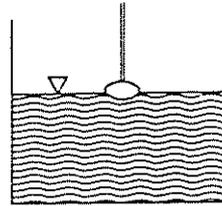


Bild 9:
Prinzip der
Schwimmertmessung

Die Führung des Schwimmers in einem Meßrohr, das in den Meßquerschnitt ragt, beeinträchtigt die Strömung auch ohne zusätzliche Anlagerungen. Zudem erschwert sie die genaue Zuordnung zum maßgeblichen Wasserstand, da bei der Umströmung des Führungsrohres Druckunterschiede am Rohrumfang auftreten. Noch schwerwiegender sind die Beeinträchtigungen des Meßquerschnittes durch Oberflächenschwimmer, die direkt angeströmt werden. Hier wird zusätzlich das Strömungsprofil beeinflusst, so daß zur Erzielung brauchbarer Genauigkeiten der Einfluß dieser Störungen auf den Meßwert durch eine eigene Kalibrierung ausgeschaltet werden muß. Die unvermeidbaren Verformungen der Wasseroberfläche durch die Umströmung des Schwimmers sind mit der Anströmgeschwindigkeit zunehmend. Diese können bei unzureichender Wartung die Messung stark verfälschen.

3.1.1.2 Automatischer Stechpegel

Durch das Abtasten der Wasseroberfläche liegt hier eine im Normalbetrieb unerhebliche Störung des Meßquerschnittes vor. Die Vertikalbewegung des Tipplers (siehe Bild 10) wird über einen Servomotor gesteuert. Da der Vertikalbewegung Grenzen gesetzt sind, können Schwallwellen zum Eintauchen des Tipplers führen. Das Anhängen von zopfbildenden Stoffen ist nicht auszuschließen, so daß Störungen im Betrieb auftreten können. Die erreichbare Meßgenauigkeit ist im Normalbetrieb sehr hoch.

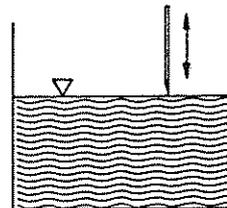


Bild 10:
Automatischer
Stechpegel

3.1.1.3 Einperlung

Durch ein Tauchrohr wird ein Gas (Luft, Stickstoff) in das Wasser eingepert (siehe Bild 11). Abgesehen von sehr kleinen Überdeckungen ist der sich im Tauchrohr aufbauende Druck direkt ein Maß für den Wasserstand über dem Fühler. Bei größeren Querschnitten ist die Störung des Profils durch das einzuführende Tauchrohr vernachlässigbar. Wegen der Gefahr des Zuwachsens der Einperloffnung ist das Tauchrohr zu warten. Die Meßwertaufnahme kann auch in größerer Entfernung vom Meßort mit Druckmeßgeräten erfolgen, da wegen der kleinen Strömungsgeschwin-

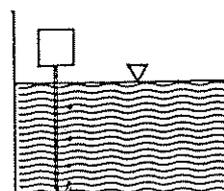


Bild 11: Einperlverfahren

digkeiten der Druckabfall in der Fühlerleitung in der Regel vernachlässigbar klein ist. Die Genauigkeit der Wasserstandsmessung wird in erster Linie durch die Güte des eingesetzten Druckmeßgerätes bestimmt.

3.1.1.4 Druckmeßdose

Druckmeßdosen formen die Eingangsgröße Druck in ein elektrisches Signal um, das mit dem Wasserstand korreliert werden muß. Beim heutigen Stand der Meßtechnik sind mit unterschiedlichen Systemen lineare Beziehungen zwischen Meßgröße und Wasserstand erreichbar. Wegen der Gefahr der Verlegung und Verstopfung sind Leitungen zwischen Meßort und Meßwertempfänger für die Druckmessung in Abwasserkanälen nicht empfehlenswert. Erfolgreicher ist der bündige Einbau an der Gerinne- wand oder in der Sohle (siehe Bild 12). Dies setzt allerdings den direkten Kontakt des verformbaren Elements des Aufnehmers mit dem Meßmedium voraus.

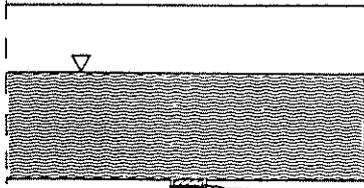


Bild 12: An der Gerinnesohle bündig eingebaute Druckmeßdose

Bei sohlbündigem Einbau in Verzögerungsstrecken sind Ablagerungen sorgfältig zu entfernen, damit Beschädigungen der Druckmeßdose vermieden werden. Die Meßgenauigkeit wird durch die Auswahl der entsprechenden Güteklasse bestimmt. Temperaturabhängigkeit, Nullpunktstabilität und Langzeitdrift werden durch die Weiterentwicklung von leistungsfähigen Meßverstärkern laufend verringert. In überlasteten Regenwassersammlern, bei denen mit einem Übergang vom Freispiegelabfluß zum Druckrohrabfluß zu rechnen ist, sind allein Druckmeßdosen in der Lage, den Meßwert Wasserstand bzw. Druck zu erfassen.

3.1.2 Meßwertempfänger ohne direkten Kontakt mit dem Meßmedium

Zunehmend wird zur Wasserstandsmessung das Echoiot eingesetzt. Von einem oberhalb des Wasserspiegels angeordneten Schall- bzw. Ultraschallsender wird ein kurzer Impuls ausgesandt, der nach der Reflexion an der Wasseroberfläche von einem Empfänger als Echo aufgenommen wird (siehe Bild 13). Aus der Laufzeit des Signals kann der Abstand zwischen Sender/Empfänger und dem Wasserspiegel und damit der Wasserstand im Gerinne ermittelt werden. Da die Schallgeschwindigkeit in der Luft von der Temperatur abhängig ist, muß über eine Kompensationsmessung dieser Einfluß eliminiert werden. Die früher verwendeten niederfrequenten Schallimpulse (bis zu 10 kHz) konnten bei engen Schachtwänden reflektiert werden und damit zu Meßwertverfälschungen führen. Bei den heute üblichen Frequenzen von mehr als 40 kHz ist die Schallkeule enger und die Gefahr der Reflexion von seitlichen Begrenzungen gebannt. Dagegen kann Schaum an der Wasseroberfläche bei der Verwendung der höherfrequenten Signale einen erhöhten Wasserstand vortäuschen. Hier ist durch besondere Wartungsmaßnahmen die Mitführung von Schaum zu verhindern. Wesentlich erscheint noch, daß die Reflexionsebene für die Schallkeule nicht in Bereiche mit Krüm-

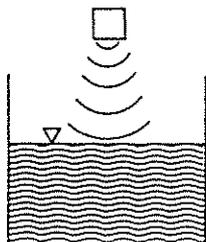


Bild 13: Prinzip der akustischen Wasserstandsmessung

mungen des Wasserspiegels gelegt wird. Da auch der höchste Wasserstand in einem Gerinne mit ausreichender Genauigkeit erfaßt werden soll, ist ein Mindestabstand zum Sensorkopf einzuhalten. Moderne Sensoren mit einer Kompensationsmessung bringen sehr genaue Meßwerte.

3.2 Fließgeschwindigkeit

Wegen der vektoriiellen Eigenschaft der Geschwindigkeit ist eine Geschwindigkeitsmessung mit der Bestimmung des Betrages der Geschwindigkeit und deren Richtung verbunden. Insbesondere bei Punktmessungen wird jedoch das Meßgerät so positioniert, daß die Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung erfaßt wird. Durch die Entwicklung der Meßtechnik stehen heute neben den mechanischen auch elektromagnetische, optische und akustische Meßverfahren zur Verfügung. Wegen der begrenzten Einsatzmöglichkeiten im Abwasser wird hier auf die Beschreibung der optischen Geräte verzichtet. Auch bei den Meßwertempfängern für die Fließgeschwindigkeit ist ein wesentliches Kriterium für die Betriebssicherheit und die Einsatzmöglichkeit, ob ein direkter Kontakt mit dem Meßmedium besteht. Im Gegensatz zu Ziff. 3.1 wird hier unterschieden, ob der Meßfühler im durchflossenen Querschnitt eingesetzt oder an der Berandung des Gerinnes ohne Störung der Strömungsverhältnisse angebracht wird.

3.2.1 Aufnehmer im Meßquerschnitt

Gemeinsam ist den hier wiedergegebenen Typen von Meßgeräten, daß sie für Punkt- bzw. Netzmessungen eingesetzt werden. Damit dient ihre Verwendung ausschließlich Kontrollzwecken; Dauermessungen sind nur in Ausnahmefällen bei gereinigtem Abwasser denkbar. Im Rohabwasser ist grundsätzlich nur ein kurzfristiger Meßbetrieb möglich, da durch Anlagerung von mitgeführten Stoffen die Betriebsbereitschaft sehr schnell unterbunden wird.

3.2.1.1 Meßflügel

Wesentlicher Bestandteil des Meßflügels ist eine Schaufel mit schraubenförmig gekrümmten Flächen, die leicht drehbar auf einer horizontalen Achse gelagert ist. Die Achse ist bei der Messung parallel zur Gerinneachse ausgerichtet (siehe Bild 14). Durch die Strömung wird die Schaufel in Rotation versetzt, wobei aus der Drehzahl mit Hilfe einer Eichkurve auf die Anströmgeschwindigkeit geschlossen werden kann. Dieses hydrologische Standardgerät zeichnet sich durch seine leichte Bedienbarkeit aus und ist für Kurzzeitmessungen auch im Abwasser einsetzbar. Durch die Lagerreibung ist die Anlaufgeschwindigkeit auf einen Wert von ca. 3 cm/s beschränkt.

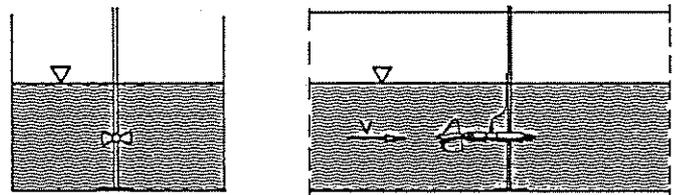


Bild 14: Meßflügel

3.2.1.2 Staurohr

Mit einem Staurohr, das senkrecht zu seiner Öffnung angeströmt werden muß, wird der Staudruck als Differenz zwischen Gesamtdruck und hydrostatischem Druck ermittelt (siehe Bild 15). Sein Einsatz ist allerdings nur bei höheren Fließgeschwindigkeiten zu empfehlen, da unterhalb von etwa 0,5 m/s der Staudruck weniger als 1 cm WS ausmacht und in den Bereich möglicher Wasserstandsschwankungen gerät. Bei günstigen Voraussetzungen, wie kein Anteil an zopf bildenden Stoffen und hohe Fließgeschwindigkeiten, ist die Geschwindigkeitsmessung mit dem Staurohr ohne großen Aufwand durchzuführen und vom Ergebnis her kostentensiveren Verfahren gleichwertig.

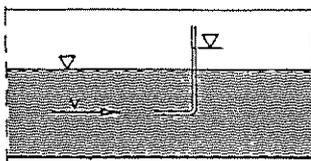


Bild 15: Staurohr

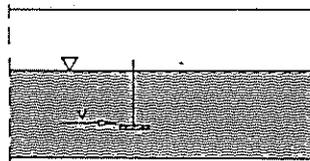


Bild 16: Eintauch-MID

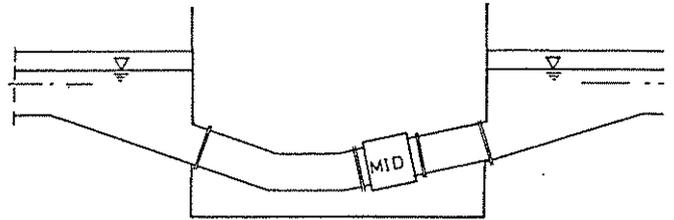


Bild 17: Dükerung eines MID

3.2.1.3 Eintauch-MID

Der Eintauch-MID ist die Sonderform eines Magnetisch-Induktiven Durchflußmeßgerätes (MID), bei dem die Elektroden zum Abgriff der Meßspannung und der Elektromagnet in einem Gehäuse zusammengefaßt sind. Er stellt das elektromagnetische Gegenstück ohne bewegliche Teile des mechanischen Meßflügels dar. Die Meßspannung wird durch das vorbeifließende Wasser erzeugt, so daß letztendlich auch mit diesem Gerät eine Punktmessung vorgenommen wird (siehe Bild 16). Dem Eintauch-MID müssen daher die gleichen betriebstechnischen Nachteile wie dem Meßflügel beigemessen werden. Als einziger Vorteil ist der Umstand zu werten, daß die Strömungsrichtung erkannt wird. Dies ist bei einer Punktmessung allerdings von untergeordneter Bedeutung.

3.2.2 Aufnehmer an der Berandung des Meßquerschnitts

Der Kontakt mit dem Meßmedium ist hier auf die bündig eingebauten Elektroden (MID) oder die Meßköpfe bei Ultraschallmessungen beschränkt. Dadurch wird weder die Querschnittsfläche beeinträchtigt noch eine Störung im Geschwindigkeitsprofil verursacht. Die damit verbundenen betrieblichen Vorteile sind offenkundig.

3.2.2.1 Magnetisch-Induktive Durchflußmesser (MID)

Der problemlose Einsatz dieser Meßgeräte in Druckrohrleitungen kann im Bereich der Abwassertechnik eigentlich nur dort genutzt werden, wo der Meßquerschnitt ständig voll gefüllt ist. Dies ist vor allem im Bereich der Kläranlagen zur Steuerung und Überwachung von Volumenströmen gegeben. Wegen der integralen Messung über den gesamten Querschnitt ist von Bedeutung, daß auch bei teilweiser Verlegung des Meßquerschnittes mit Feststoffen der Durchfluß noch korrekt angezeigt werden kann. Das Meßsignal ist der mittleren Geschwindigkeit proportional. Durch die geschwindigkeitsabhängige Vorgabe des Meßbereichendwertes zwischen 0,5 und 10 m/s kann mit einem Meßwertgeber ein großer Meßbereich erfaßt werden.

Im Bereich des Kanalnetzes bereitet der große Schwankungsbereich in der Wasserführung dem Einsatz dieses Gerätetyps wegen der Forderung nach Völlfüllung Schwierigkeiten. Eingegangen wird hier deshalb auf zwei Sonderbauweisen, mit denen auch im Kanalnetz Durchflußmessungen mit dem MID erst ermöglicht werden. Zum einen wird durch konstruktive Maßnahmen ein Abfluß unter Druck künstlich erzeugt, zum anderen wird mit dem Gerinne-MID ein unter Teilfüllungszuständen einsetzbares Gerät vorgestellt.

3.2.2.1.1 Druckrohr-MID

Der Vorteil der genauen Messung ohne Querschnittseinengung muß hier durch konstruktive Maßnahmen herbeigeführt werden, deren Auswirkungen auf den Kanalnetzbetrieb sorgfältig untersucht werden müssen. Die bekanntesten Ausführungsarten sind

- Dükerung
- Überstau im Kanal
- Rückstau über Regelorgan.

Bei der Dükerung wird in einem Sonderbauwerk der Übergang vom Freispiegel- zum Druckrohrabfluß erzwungen (siehe Bild 17). Da der Düker einen künstlichen Tiefpunkt bildet, ist darauf zu achten, daß Ablagerungen im Einstaubereich oberstrom des Dükerreinlaufes verhindert werden. Strömungstechnisch ist bei die-

ser konstruktiven Maßnahme letztendlich eine Einengung des Kanalquerschnittes auf den Meßquerschnitt im Dükerbereich vorhanden. Begrenzt wird deshalb der erfassbare Meßbereich durch den zulässigen Aufstau im Oberwasser im Hinblick auf den Größtabfluß und durch die Mindestgeschwindigkeit im Durchflußmesser. Diese Mindestfließgeschwindigkeit kann ohne weiteres unterhalb des Grenzwertes für den ablagerungsfreien Transport liegen, da wegen der zeitlich stark veränderlichen Wasserführung kurzfristige Ablagerungen toleriert werden können. Zur Vermeidung von Ablagerungen im Bereich des Meßgerätes wird der Einbau des MID im ansteigenden Dükerast empfohlen. Die Errichtung eines Sonderbauwerkes zur Dükerung des Meßgerätes stellt einen erheblichen baulichen Aufwand dar. Im Bauwerk selbst müssen Umführungen vorgesehen werden, die bei Wartungsarbeiten am Meßgerät und bei Überschreitungen des zulässigen Rückstaus den Abfluß im Kanal sicherstellen.

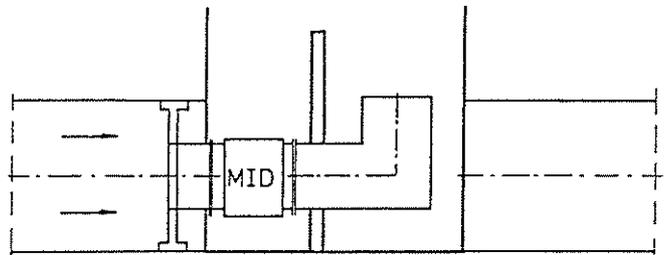


Bild 18: Einbau eines MID in einen Schacht: Überstau im Kanal

Weniger aufwendig als die Dükerung ist die Methode des Überstaus im Kanal, da hierbei auf bauliche Maßnahmen verzichtet werden kann. Von einem Kontrollschacht aus wird der ankommende Kanalabschnitt durch einen Einsatz verschlossen, von dem aus ein Rohr mit kleinerer Nennweite als die des Kanals mit eingeflanschtem MID in den Bereich des Schachtes geführt wird. Das Rohrende wird nach dem MID so weit nach oben gezogen, daß der Überlauf über dem Scheitel des Zuflußrohres liegt (siehe Bild 18). Damit ist die Völlfüllung des Meßquerschnittes gewährleistet. Prinzipiell ist diese Konzeption durch ein schräg angeflanshtes Rohrstück oder durch den Einbau eines Krümmers hinter dem Durchflußmeßgerät zu erreichen. Auch hier liegt de facto eine Querschnittseinengung mit den bereits bekannten Nachteilen vor. Da der Kanalquerschnitt hier ohne Umführungsmöglichkeit verbaut wird, ist diese Methode für Dauermessungen ungeeignet. Die zeitliche Ausdehnung der Maßnahme muß mit den zu erwartenden Ablagerungen abgestimmt werden, da der eingestaute Kanalabschnitt für Wartungsmaßnahmen unzugänglich bleibt. Wegen des unkomplizierten Einbaus und der doch erzielbaren hohen Meßgenauigkeit bietet sich diese Methode für Kontrollmessungen an.

Zur Steuerung des Auslaufs von Regenrückhaltebecken (siehe Bild 19) wird der MID mit einem nachgeschalteten Drosselorgan eingesetzt. Das Drosselorgan wird hierbei immer so geregelt, daß beim gewünschten Durchfluß die Völlfüllung im Meßquerschnitt sichergestellt ist. Die Vorteile der genauen Durchflußmessung mit Hilfe des MID werden hierbei durch einen erhöhten Aufwand an Steuerungsmaßnahmen sichergestellt. Da ohnehin eine Ausflußregelung bei Speichermaßnahmen in Kanalnetzen angestrebt wird, können in diesem Sonderfall Durchflußmessung und Regelung zusammenwirken [3].

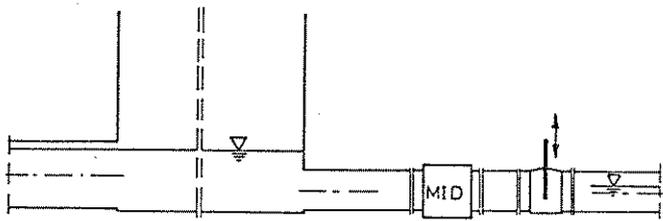


Bild 19: Erzeugung der Vollfüllung durch ein Regelorgan

3.2.2.1.2 Gerinne-MID

Der im Druckrohr eingesetzte MID bringt ein Meßsignal, so lange die Elektroden mit dem Meßmedium Berührung haben. Dies ist bei direktem Abgriff bis etwa zur halben Füllhöhe im Kreisrohr der Fall (siehe Bild 20). Da nur durch den bewegten Leiter die Spannung induziert wird, im Luftraum unter Teilfüllungsbedingungen demnach kein Beitrag erbracht werden kann, ist vom Wirkungsprinzip her der MID auch unter Teilfüllungsbedingungen einsetzbar. Das Signal des Meßgerätes muß zur Durchflußbestimmung allerdings noch mit der Durchflußfläche und speziellen Korrekturfaktoren verknüpft werden. Für das teilgefüllte Kreisrohr wurden die entsprechenden experimentellen Nachweise bereits 1977 erbracht [4]. Durch ein Tieferlegen der Elektroden und entsprechende Umgestaltung des Magnetfeldes ließe sich der erfassbare Füllhöhenbereich ausweiten. Angeboten wird derzeit ein Gerät, bei dem die Geschwindigkeitsmessung des MID im Teilfüllungsbereich des Kreisrohres mit einer Echolotmessung zur Bestimmung des durchflossenen Querschnittes kombiniert ist.

Die meßtechnisch bestens abgesicherte Erfassung des Strömungsfeldes im Kreisrohr durch das über umliegende Spulen aufgeprägte Magnetfeld läßt sich auf andere Querschnitte nicht ohne weiteres übertragen. Insbesondere das nach oben offene Rechteckprofil stellt an das Induktionsprinzip Anforderungen, die kaum zu brauchbaren Lösungen führen dürften. Für das teilgefüllte Kreisrohr ist der Gerinne-MID bereits verwirklicht. Es wird sich zeigen, ob die erhöhten Anforderungen an Meßsicherheit den Mehraufwand an Meßtechnik tragbar erscheinen lassen. Gegenüber dem Druckrohr-MID bringt der Gerinne-MID den Vorteil der einengungsfreien Messung und ist damit für den Betrieb im Ka-

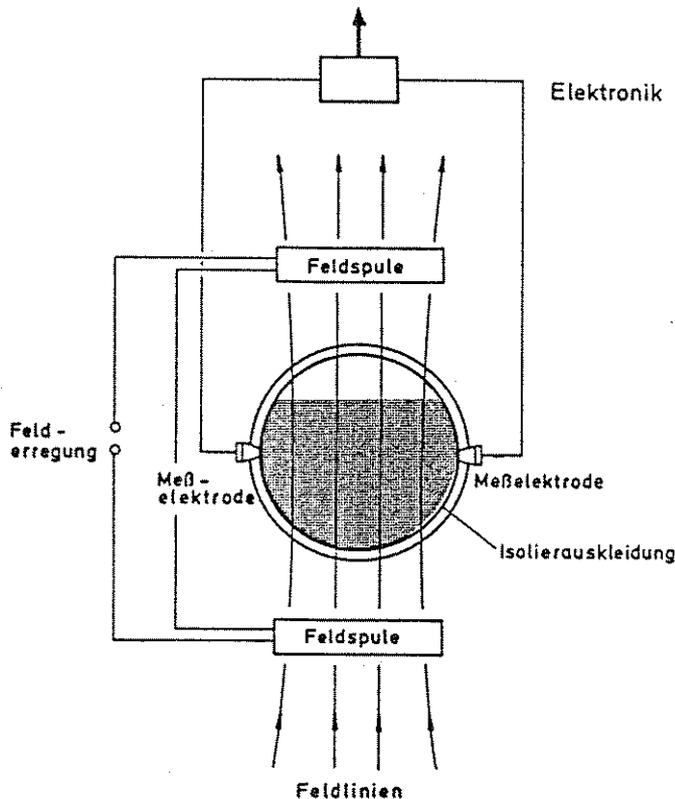


Bild 20: Wirkungsweise des MID im teilgefüllten Kreisrohr

nalnetz sicherer. Die Eignung für Dauermessungen läßt einen verstärkten Einsatz wünschenswert erscheinen.

3.2.2.2 Ultraschallmeßgeräte

Bei den Ultraschallmeßgeräten werden Sensoren, die als Ultraschallsender bzw. -empfänger wirken, in die Rohrleitung eingebaut oder auch nur auf der Rohrleitung befestigt. Stehen die Sensoren nicht mit dem Meßmedium in Berührung, so durchläuft das Schallsignal zunächst die Rohrwand. Im Gegensatz zum MID, bei dem die das Magnetfeld erzeugenden Spulen das Rohr umgreifen und mit zunehmendem Durchmesser zu sehr schweren Konstruktionen führen, sind die Sensoren der Ultraschallmeßgeräte praktisch unabhängig vom Rohrdurchmesser. Ihr Einsatz erfordert im Vergleich zum MID einen geringeren baulichen Aufwand.

Vom Prinzip her sind zwei Verfahren der Geschwindigkeitsmessung denkbar, nämlich die Ausnützung des Mitführungseffektes oder des Doppler-Effektes.

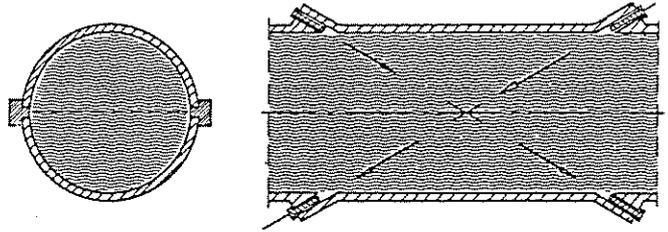


Bild 21: Ultraschallmessung der Geschwindigkeit nach dem Mitführungseffekt

3.2.2.2.1 Meßgeräte nach dem Mitführungseffekt

Zwischen zwei Meßköpfen wird die Laufzeit der Schallimpulse diagonal zur Strömung gemessen (siehe Bild 21). Wegen der Überlagerung mit der Fließgeschwindigkeit unterscheidet sich die Laufzeit des Signals in Strömungsrichtung von der entgegen der Strömungsrichtung (Mitführungseffekt). Die mittlere Fließgeschwindigkeit des Meßmediums längs der durch Sender und Empfänger begrenzten Meßstrecke kann über diese Entfernung, dem Winkel zwischen Meßstrecke und Hauptströmungsrichtung und den Einzellaufzeiten des Schallsignals berechnet werden. Für die Messung dieser mittleren Fließgeschwindigkeit ist es unerheblich, welches Geschwindigkeitsprofil im Strömungsfeld vorhanden ist, da längs der Strecke integriert wird. Bei der Verwendung von nur zwei Meßköpfen und einem Umschalten zwischen Empfänger- und Senderfunktion bei den Sensoren werden allerdings Querströmungen nicht mehr kompensiert.

Grundsätzlich ist es bedeutungslos, ob die Messung im Druckrohr oder im Freispiegelgerinne stattfindet. Die Messung der mittleren Fließgeschwindigkeit erfolgt nur auf der durch die Sensoren vorgegebenen Meßstrecke; die Zuordnung zur mittleren Fließgeschwindigkeit im Gesamtquerschnitt muß erst noch vorgenommen werden. Hierbei ist dann entscheidend, ob auf bekannte Gesetzmäßigkeiten wie bei der turbulenten Rohrströmung zurückgegriffen werden kann, oder ob durch Punktmessungen eine Kalibrierung für das Geschwindigkeitsfeld im Querschnitt mit freier Oberfläche vorgenommen werden muß.

Das Meßprinzip setzt voraus, daß der vom Sender abgestrahlte Schallimpuls nach dem Durchlaufen der Meßstrecke den Empfänger erreicht. Stören können dabei im Meßmedium mitgeführte Feststoffe oder Gasblasen, welche die Schallsignale vorzeitig reflektieren bzw. absorbieren. In gewissen Grenzen läßt sich der Ausfall von Schallimpulsen durch einen angepaßten Auswerteprozess, bei dem nur ein bestimmter Prozentsatz an Signalen empfangen werden muß, umgehen. Bei hohem Gehalt an Feststoffen oder Gasblasen ist selbst mit diesen Hilfsmitteln die Messung nicht mehr möglich, da die Elektronik allein nicht entscheiden kann, welche Signale ungestört ankommen. Der Anwendungsbereich des Ultraschallmeßgerätes ist deshalb weniger im Rohabwasser mit dem hohen Anteil an Verunreinigungen als in weitgehend homogenen, sprich gereinigtem Abwasser zu suchen. Bei günstigen Voraussetzungen, wie gleichbleibende rela-

tive Geschwindigkeitsverteilung unter günstigen Anströmbedingungen, können von der erzielbaren Genauigkeit her ähnlich gute Ergebnisse wie mit dem MID erreicht werden. Diese Voraussetzungen sind in Rohrabschnitten mit gereinigtem Abwasser erfüllt. Bei großen Durchmessern sind zudem die Investitionskosten günstiger als beim MID.

3.2.2.2 Meßgeräte nach dem Prinzip des Doppler-Effekts

Bei diesen Meßgeräten ist die Anwesenheit von Feststoffteilchen im Meßmedium Voraussetzung für die Messung (siehe Bild 22). Im Bereich der Überdeckung der Schallkeulen von Sender und Empfänger, die bei diesem System nebeneinander an der Gerinnwand angebracht sind, wird durch die dort bewegten Partikel eine Frequenzverschiebung verursacht, die geschwindigkeitsproportional ist. Letztendlich wird auf diese Weise an einem nicht genau definierten Ort im Inneren der Flüssigkeit eine örtliche Geschwindigkeit gemessen. Die Umsetzung in ein Durchflußsignal ist wiederum gebunden an die Verknüpfung mit der mittleren Fließgeschwindigkeit im Querschnitt. Aus diesem Grunde hat dieses Verfahren gegenüber den unter Ziff. 3.2.1 geschilderten den Vorteil, daß die Messung ohne Störung im Fließquerschnitt erfolgt. Die Anwendbarkeit für eine Dauermessung zur Bestimmung des Gesamtdurchflusses bleibt mit weiterem Aufwand verbunden.

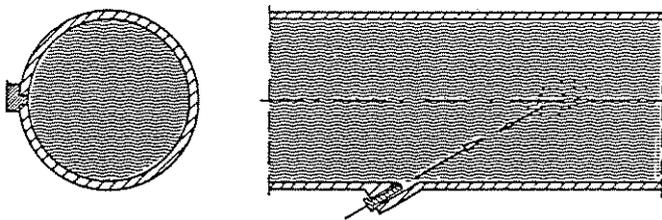


Bild 22: Punktförmige Messung nach dem Doppler-Effekt

3.3 Tracer

Zur Durchflußbestimmung mit Hilfe des Verdünnungsverfahrens benötigt man einen Tracer. Hierfür sind Substanzen geeignet, die in Spuren nachweisbar sind. Zum Einsatz kommen Salze, Farbstoffe und radioaktive Stoffe. Wegen der hohen Nachweisempfindlichkeit werden Fluoreszenzfarbstoffe bevorzugt eingesetzt. Wichtig für die Auswahl des Tracers ist, daß die Substanz im Abwasser nicht enthalten ist und im Meßmedium keine Veränderung erfährt. Wegen der notwendigen Erfahrungen in der Auswahl und im Umgang mit den Tracern kommt ein Einsatz nur in Sonderfällen in Betracht.

4. Genauigkeitsanforderungen

Durch das Abwasserabgabengesetz ist der Durchflußmessung wegen der Frachtermittlung eine große Bedeutung zugekommen. Dienten früher im Abwasserbereich installierte Durchflußmeßstationen nur der Information über das Abflußgeschehen, beispielsweise im Kläranlagenzulauf, so gilt es heute, Abflußmengen bei Direkt- und Indirekt-Einleitern möglichst genau zu erfassen. Damit stand zunächst einmal zur Diskussion, welche Genauigkeiten bei den derzeit verfügbaren Methoden überhaupt erzielbar sind.

Im Arbeitsausschuß V 31 des Normenausschusses Wasserwesen (NAW) im DIN wurden die Fragen der Meßunsicherheit und von Genauigkeitsanforderung bei der Durchflußmessung im Meßmedium Abwasser eingehend erörtert. Die Ergebnisse dieser Diskussionen sind in der DIN 19559, Teil 1 [1], aufgenommen. Ohne im einzelnen auf die Systematik dieser Betrachtungen einzugehen, sollen hier einige grundsätzliche Anmerkungen ergänzend angefügt werden.

Jeder Meßmethode sind physikalische Grenzen im Bezug auf die erzielbare Genauigkeit gesetzt, die zudem mit dem Meßbereich veränderlich sind. Ganz allgemein sind an der oberen Bereichsgrenze, bei der Durchflußmessung also beim maximalen Durchfluß, die prozentualen Abweichungen des Meßwertes vom Soll-

wert am kleinsten, an der unteren Bereichsgrenze am größten. Bezogen auf den tatsächlichen momentanen Meßwert kann der Absolutbetrag der möglichen Abweichung beim Größtdurchfluß größer sein als der kleinste erfaßbare Abfluß bei entsprechendem Meßbereich. In der DIN 19559 werden im Hinblick auf die Fehlergrenzen zwei metrologische Klassen vorgeschlagen. Der Gesamtmeßbereich wird in einen oberen und unteren Belastungsbereich eingeteilt, wobei im unteren Belastungsbereich die Fehlergrenze höher angesetzt ist.

Bei der Angabe von Fehlergrenzen ist zu beachten, auf welche Bedingungen hierbei Bezug genommen wird. Nach der DIN 19 559, Teil 1, werden Garantie- und Verkehrsfehlergrenzen unterschieden. Die Garantiefehlergrenzen gelten dabei für die Kalibrierung auf einem Prüfstand unter Nennbedingungen. Die Verkehrsfehlergrenzen können ebenfalls auf die Nennbedingungen oder auf die davon abweichenden Betriebsbedingungen abgestellt sein. Dies ist z. B. dann gegeben, wenn das Meßmedium unter Nennbedingungen Reinwasser, unter Betriebsbedingungen dagegen Abwasser ist.

Grundsätzlich sind für den Anwender die Verkehrsfehlergrenzen über den gesamten Meßbereich von besonderem Interesse. Nur dadurch stehen Angaben über die unter Betriebsbedingungen zu erzielenden Genauigkeiten zur Verfügung. Von den Herstellern können jedoch nur Garantiefehlergrenzen angegeben werden, da ihnen der Einsatzort zumeist unbekannt ist und Einbauvorschriften nicht immer überwacht werden können. Durch Kontrollmessungen können Abweichungen von den Verkehrsfehlergrenzen vor Ort festgestellt werden. Jedoch ist hierzu ein Meßgerät mit einer höheren Genauigkeit zu verwenden als das zu überprüfende Gerät. Nicht zuletzt dürfte für manche größere Anlage eine Überprüfung vorhandener Durchflußmeßeinrichtungen auf ihre Zuverlässigkeit von Vorteil sein. Der Mehraufwand an Investitionskosten für verbesserte Meßverfahren ist über zu entrichtende Gebühren in seinen Auswirkungen zahlenmäßig abschätzbar.

5. Empfehlungen für die Einrichtung von Durchflußmeßstellen

In den vorstehenden Ausführungen wurde ein Überblick über derzeit existierende Meßverfahren zur Durchflußbestimmung im Bereich der Abwassertechnik gegeben. Nachfolgend sollen Vorstellungen über die Einrichtung von Meßstellen nach dem derzeitigen Stand der Technik entwickelt werden, wobei wegen der weitergehenden Anforderungen solche für die Dauermessung im Vordergrund stehen. Da für Kurzzeitmessungen unter mehr oder weniger strengen Restriktionen alle Meßverfahren brauchbar sind, wird durch die Beschränkung auf Dauermeßstellen eine Konzentration auf zukunftsträchtige Technologien angestrebt. Der ideale Meßwertaufnehmer für die Durchflußmessung in Kanalstrecken mit Freispiegelabfluß ist noch nicht verfügbar. Es wird daher versucht, bestmögliche Kombinationen durch den Einsatz von Meßwertaufnehmern, die den idealen Vorstellungen nahekommen, aufzuzeigen.

Ganz allgemein sind bei der Auswahl des geeigneten Meßverfahrens die Eigenschaften des Meßmediums, der Meßbereich mit den Anforderungen an die Meßgenauigkeit, die Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit und ggf. Rückwirkungen auf das Abflußvermögen bei Querschnittsverengungen zu beachten. Bei Einsätzen im Bereich von Klärwerken steht in der Regel eine Stromquelle zur Verfügung, so daß die Meßwertanzeige in beliebiger Form angezeigt oder gespeichert werden kann. Anders sind die Verhältnisse im Kanalnetz. Hier ist eine Installation mit eigener Stromversorgung unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften wünschenswert. Die bisher gebräuchlichen automatisch registrierenden Geräte mit dem Datenträger Magnetband waren im allgemeinen sehr zuverlässig. Der relativ hohe Stromverbrauch begrenzte allerdings die Einsatzdauer. Durch die Entwicklung der Halbleiterspeicher wurden in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt, welche nicht nur die Einsatzdauer, sondern auch die Auswertung der gespeicherten Daten entschieden verbessert haben.

5.1 Meßstellen mit Querschnittseinengung

Wegen des häufigen Einsatzes werden hier vor allem die Venturi-Kanäle angesprochen. Daneben wird der Druckrohr-MID mit den möglichen Einbauförmigkeiten angeführt, welche als Drosselstellen für den Kanalabfluß anzusehen sind.

5.1.1 Venturi-Kanal

Einzelheiten für die zweckmäßige Konstruktion sind in der DIN 19559, Teil 2 [2], festgehalten. In dieser Vorschrift werden auch Rechenverfahren angegeben, welche die Reibungsverluste bei der Durchströmung erfassen. Damit kann die Schlüsselkurve für bestehende Anlagen überprüft werden, sofern die für das Rechenverfahren vereinbarten Voraussetzungen erfüllt sind. Diese Beziehungen gelten z. B. nicht für die Kurzform. Die Durchflußcharakteristik im Venturi wird durch die Querschnittsform bestimmt. Als Meßgröße wird die Wassertiefe vor der Einschnürung zweckmäßigerweise berührungslos, d. h. mit Hilfe einer Echolotmessung, aufgenommen. Dadurch entfällt die Wartung für den Meßwertaufnehmer, der Kontakt mit dem Meßmedium hat. Ausgeschaltet werden dadurch eine Reihe von Fehlermöglichkeiten, auf die bei den Meßwertaufnehmern für den Wasserstand im einzelnen eingegangen wurde.

Wartungsabhängig ist der Zustand des Gerinnes oberstrom des Venturi-Kanals. Hier müssen mögliche Ablagerungen entfernt werden, damit die Anströmbedingungen unverändert bleiben. Für bestehende Anlagen ohne berührungslose Wasserstandsmessung ist eine Umrüstung zu empfehlen. Außerdem kann mit Hilfe anderer Meßverfahren oder durch Nachrechnen eine Kontrolle der Durchflußanzeige vorgenommen werden. Wegen des beschränkten Meßbereichs sind die erzielbaren Genauigkeiten für die Abflüsse an der unteren Bereichsgrenze zu beachten und der Venturi-Kanal entsprechend zu dimensionieren.

5.1.2 Druckrohr-MID

Der unter Vollfüllung arbeitende MID verbindet die Vorteile der Messung der mittleren Geschwindigkeit über den Meßquerschnitt mit der relativ hohen Meßgenauigkeit dieses Verfahrens, die zudem über einen großen Meßbereich garantiert wird. Von Nachteil ist der konstruktive Aufwand, der zur Erzielung des vollgefüllten Zustandes im Kanalnetz getrieben werden muß. Dies bedingt nicht zuletzt die Einordnung unter den Meßstellen mit Querschnittseinengung. Für Dauermessungen im Kanalsystem mit großen Durchflußschwankungen sind die vorgestellten Möglichkeiten noch alles andere als ideal. Trotz des hohen baulichen Aufwandes sind wegen der Verzögerungsstrecke oberstrom des Meßwertaufnehmers Wartungsmaßnahmen unumgänglich.

Dagegen kann unter vorteilhaften örtlichen Gegebenheiten, wie sie z. B. am Klärwerksablauf gegeben sind, durch die geschickte Anordnung von zwei Meßwertaufnehmern mit unterschiedlichen Durchmessern ein großer Meßbereich mit hoher Genauigkeit erfaßt werden. Hierbei ist die Meßbereichsumschaltung der Einzelgeräte ebenso hilfreich wie die Einzel- und Parallelmessung, was allerdings einen zusätzlichen Steueraufwand bedingt. Im Kanalnetz ist der Einsatz des Druckrohr-MID immer mit einschränkenden Maßnahmen verbunden. Unumgänglich ist eine sorgfältige hydraulische Bemessung des Sonderbauwerkes, welches für Minimal- und Maximalabfluß dimensioniert werden muß.

Für Kurzzeit- und Kontrollmessungen ein wertvolles Hilfsmittel ist der in Kontrollschächten zu installierende Druckrohr-MID, bei dem durch Einstau der Haltung oberstrom des Schachtes und einen Auslauf oberhalb des Rohrscheitels der bauliche Aufwand gering bleibt. Bei einer sorgfältigen Planung einer solchen Meßstelle müssen die Nennweite des MID und die Rückstaulänge aufeinander abgestimmt werden. Hierbei spielen mögliche Maximalabflüsse eine große Rolle, da keine Umgehung der Meßstrecke verfügbar ist.

Die Vorteile der genauen Durchflußbestimmung über einen großen Meßbereich lassen diese Variante des MID vor allem als Kontrollinstrument für Indirekt-Einleiter angemessen erscheinen. Er-

gänzende Untersuchungen über die Zuordnung dieser genauen Kurzzeitmessung zu weniger präzisen Dauermessungen mit anderen Verfahren (z. B. Venturi-Kanal) wären ebenso in der Praxis zu erproben wie eine Optimierung des Durchflußverhaltens im Bereich der Einengung durch hydraulisch günstige Gestaltung des Rohreinlaufs und des Überfalls nach dem Meßgerät.

5.2 Meßstellen ohne Querschnittseinengung

Vor allem für die Durchflußmessung in Kanalstrecken ist für die wartungsarme Dauermessung eine Meßmethode anzustreben, die rückstaufrei bleibt. Wegen des großen Meßbereiches sind zudem Wasserstandsmessungen zur Bestimmung der Querschnittsfläche zusätzlich erforderlich. Vom Meßprinzip her ist die Geschwindigkeitsmessung über den gesamten Querschnitt mit Hilfe des Induktionsverfahrens wünschenswert. Bei gereinigtem Abwasser bietet auch die Geschwindigkeitsmessung längs einer Meßgeraden mit Hilfe des Mitführungseffektes Verbesserungen gegenüber bislang praktizierten Verfahren.

5.2.1 Gerinne-MID

Anzustreben ist ein möglichst großer Meßbereich in Standardquerschnitten in Kombination mit einer berührungslosen Wasserstandsmessung. Untersuchungen an der TU München haben erwiesen, daß im Kreisrohr von Füllungsgraden größer 0,5 bis zur Vollfüllung reproduzierbare Meßergebnisse mit dem Druckrohr-MID erzielt werden können [4]. Am Markt wird derzeit ein Gerinne-MID angeboten [5], der in Kombination mit einer Echolotmessung den Bereich der Teilfüllung bis hinauf zum Füllungsgrad 0,5 im Kreisrohr abdeckt. Eine Kombination beider Geräte würde bereits eine vollständige Erfassung des Meßbereiches ermöglichen. Realisierbar ohne größeren Aufwand müßte ein Meßgerät sein, das von Füllungsgraden von mehr als 0,3 bis zur Vollfüllung mißt. Die Durchflüsse bei Füllungsgraden von weniger als 0,3 würden dann lediglich über eine Wasserstandsmessung mit registriert. Da hier die Werte für den Durchfluß sehr rasch gegen Null gehen, kann in diesem Bereich eine verminderte Genauigkeit in Kauf genommen werden. In der Volumenbilanz über längere Zeiträume spielen diese Fehlmessungen keine entscheidende Rolle. Hier ist eine gezielte Weiterentwicklung der verfügbaren Meßgeräte unter dem Blickwinkel praktischer Umsetzbarkeit erforderlich.

5.2.2 Ultraschallmeßgeräte

Wegen der Geschwindigkeitsmessung längs einer Meßgeraden sind bei wechselnden Wasserständen und im Bereich ungleichförmiger Wasserspiegellagen immer Schwierigkeiten in der Zuordnung gemessener Geschwindigkeit — mittlere Fließgeschwindigkeit im Gesamtquerschnitt zu erwarten. Diese Schwierigkeit wird auch durch die Messung in unterschiedlichen Ebenen nicht umgangen. Der Einsatz dieser Methode wird gegenüber dem Gerinne-MID immer mit vergleichbar geringerer Meßgenauigkeit und von zusätzlichen Anforderungen an das Meßmedium begleitet sein. Wegen des geringeren baulichen Aufwandes sind in Sonderfällen auch diesem Verfahren durchaus Vorteile gegenüber den bisher gebräuchlichen Systemen zuzugestehen.

6. Literaturhinweise

- [1] DIN 19559, Teil 1:
Durchflußmessung von Abwasser in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen; Allgemeine Angaben
- [2] DIN 19559, Teil 2:
Durchflußmessung von Abwasser in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen; Venturi-Kanäle
- [3] *Fahrner, H.:*
Handbuch für die Planung von wartungsarmen Regenbecken-Abfluß-Steuerungen mit geregelttem Drosselschieber. Eigenverlag der Vollmar GmbH, Stuttgart 1984
- [4] *Valentin, F.:*
Strömungstechnische Probleme bei Übergängen zwischen Teil- und Vollfüllung und Durchflußbestimmung in Kanalstrecken. Schlußbericht Teilprojekt A 8 des SFB 81 an der TU München. München 1981
- [5] — — —
Turbo-Werk Meßtechnik GmbH, Magnetisch-Induktive Abflußmeßeinrichtung Typ „top-flux GR“ für geschlossene, teilgefüllte Rohre