

# Verbesserung der Vermischung bei der Natronlaugedosierung

Ekkehard Heinemann und Klaus Liebrecht

## Hydraulik, Wasserversorgung, Wasseraufbereitung, Entsäuerung, Mischer, Dosierung

Zur Vermeidung von Kalkkrustenbildung in Rohrleitungen unterstrom der Natronlaugedosiereinrichtung wurde mit Hilfe von Strömungsversuchen ein Mischer entwickelt, der folgenden Forderungen genügt: Einfacher Aufbau ohne bewegliche Teile, keine Einbauten in Fließrichtung hinter den Dosierlanzen, geringer Strömungswiderstand, hohe Mischwirkung zur Vermeidung von Konzentrationsspitzen. Die Auswertung der Modelldaten mit dimensionslosen Kenngrößen erlaubt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Abmessungen und Strömungsverhältnisse; die Angabe der Abmessungen des Mixers als Verhältniswerte zum Rohrdurchmesser und ein Bemessungsbeispiel erleichtern die Anwendung in der Praxis.

A special mixing system to be used in dosing facilities for caustic soda in water treatment plants was developed to avoid severe pipe incrustation by calcium carbonate, which fulfills following requirements: simple construction without movable parts, no obstacles downstream of the injection pipes, low flow resistance and high mixing efficiency in connection with a rapid reduction of concentration peaks. The evaluation of model data applying dimensionless parameters allows to transform the result to different sizes and flow conditions. The specification of system dimensions relating to the pipe diameter and a corresponding example facilitate the use in practice.

## 1. Einleitung

Bei der Trinkwasseraufbereitung kann eine Anhebung des pH-Wertes erforderlich werden. Als geeignetes und wirtschaftliches Reagenz hat sich Natronlauge bewährt; allerdings werden bei einer Überalkalisierung infolge einer örtlichen Anreicherung der Natronlauge eventuell im Wasser gelöstes Bicarbonat in unlösliches Carbonat überführt. Diese Reaktion tritt kleinräumlich immer an der Dosierstelle auf, wo die Natronlauge auf das Rohwasser trifft. Eine Verbesserung lässt sich durch Vorverdünnen der Natronlauge mit deionisiertem Wasser erreichen. Trotzdem bildete sich zum Beispiel im Wasserwerk Urfeld in einer Leitung DN600 in drei Jahren auf etwa 6 m Länge eine Carbonatschicht, die den freien Querschnitt auf bis zu 40 % einengte.

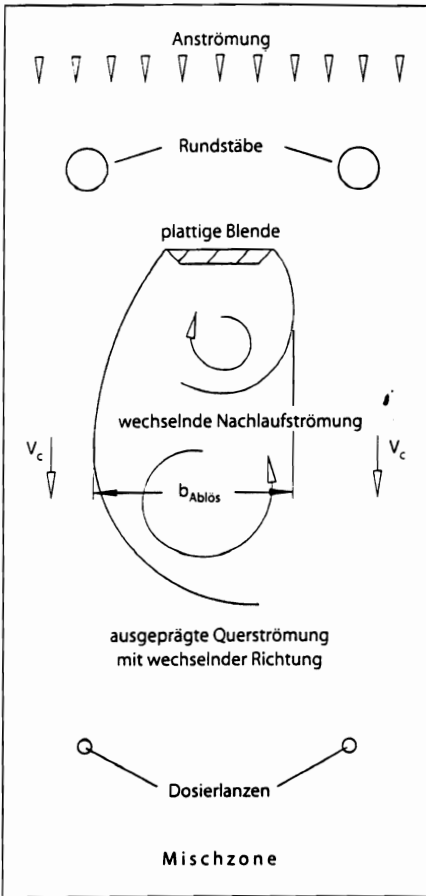
Als Abhilfe soll eine ausreichend schnelle und vollständige Vermischung der Natronlauge mit dem Rohwasser den Bereich der Überalkalisierung räumlich und zeitlich so weit verringern, dass die Carbonatbildung weitgehend eingeschränkt wird. Da anzunehmen ist, dass übliche Rührwerke infolge Kalkablagerungen in kurzer Zeit unbrauchbar werden, sollte im Auftrage des DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., der Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke Köln AG und des Wasserbeschaffungsverbandes Wesseling-Hersel im Labor für Wasser und Umwelt der Fachhochschule Köln ein geeignetes Verfahren im Labor entwickelt und erprobt werden. Dabei wurden folgende Vorgaben definiert:

- Alle statischen Einbauten müssen in Fließrichtung vor der Dosierstelle angeordnet werden, um Beeinträchtigungen der Funktion durch eventuelle Kalkablagerungen auszuschließen.
- Der Druckverlust im Rohwasserstrom darf unter üblichen Bedingungen in Wasserwerken maximal 1,0 m WS betragen.
- Der Druck der Dosierflüssigkeit wird auf maximal 1,0 MPa (entspr. 100 m WS) beschränkt.
- Der Bedarf an deionisiertem Wasser zur Vorverdünnung soll möglichst gering gehalten werden.
- Auf bewegliche Einbauten wie Rührwerke sollen aus Gründen der Betriebssicherheit verzichtet werden.
- Eine etwa 100-fache Vermischung soll nach Möglichkeit innerhalb von 0,1 Sekunden erreicht werden.

## 2. Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen wurden wegen der geringeren optischen Verzerrung und der einfacheren Manipulierbarkeit nicht in einem Rohr, sondern in einer Versuchsrinne von 30 cm Breite durchgeführt. Durch die Anordnung einer Abdeckung aus Acrylglas wurde ein geschlossener Querschnitt gebildet, der während der Versuche vollständig gefüllt war. Anstelle der eigentlichen Dosierflüssigkeit Natronlauge wurde bei allen Versuchen eine Farblösung verwendet. Durch Versuche mit Zuckerlösungen verschiedener Konzentration wurde nachgewiesen, dass die Viskositätsunterschiede von Natronlauge zu wässriger Farblösung die Ergebnisse nicht beeinflussen.

Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Heinemann und Dipl.-Ing. Klaus Liebrecht, Laboratorium für Wasser und Umwelt, Fachhochschule Köln, FB BI, Betzdorfer Straße 2, D-50679 Köln.



**Bild 1:** Systematischer Aufbau der Natronlaugedosierstelle.

$v_{char}$  = charakteristische Geschwindigkeit in m/s,  
 $\nu$  = kinematische Viskosität in  $m^2/s$ .

Als charakteristische geometrische Abmessung  $l_{char}$  wird die Breite der Ablösungszone  $b_{Ablösg}$  hinter der Blende gewählt und als charakteristische Geschwindigkeit  $v_{char}$  die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_c$  seitlich der Ablösungszone (im eingeschnürten Fließquerschnitt, s. *Bild 1*). Zur Bestimmung der Breite  $b_{Ablösg}$  wurde in Versuchen die maximale und minimale Ausdehnung der Ablösungszone gemessen und die Ergebnisse gemittelt. Für ein Verhältnis von Rinnenbreite zur Blendenbreite  $b_{Ri}/b_{Bl} = 2$  bis 9 gilt näherungsweise:

$$b_{Ablösg} = b_{Bl} \cdot [0,2 \cdot \ln(b_{Ri}/b_{Bl}) + 1,2] \quad (3)$$

und damit

$$v_c = Q/A_c = Q/[h \cdot (b_{Ri} - b_{Ablösg})] \quad (4)$$

mit

$b_{Ri}$  = Breite der Rinne in m

$b_{Bl}$  = Breite der Blende in m

$A_c$  = eingeschnürter Fließquerschnitt seitlich der Ablösungszone in  $m^2$

Die Formeln für die *Strouhal-Zahl* und die *Reynolds-Zahl* werden umgeformt in:

$$Sr = b_{Ablösg} \cdot f/v_c \quad (1a)$$

und

$$Re_{Bl} = b_{Ablösg} \cdot v_c/\nu \quad (2a)$$

Die graphische Darstellung für alle Versuche mit geschlossenen Rechteckquerschnitten sind in *Bild 2* dargestellt. Es ergibt sich nach diesen Versuchen eine mittlere *Strouhal-Zahl* weitgehend unabhängig von der *Reynolds-Zahl* von  $Sr = 0,23$ . Die Pendelfrequenz ist somit in erster Näherung linear abhängig von dem Volumenstrom und dem Verhältnis der Rinnenbreite zur Blendenbreite.

Bei den untersuchten Varianten führte insbesondere die Nachlaufströmung eines mittig angeordneten „Störkörpers“ zu einer guten Mischwirkung. Hinter diesem Einbau entwickelt sich eine stark pendelnde Strömung ähnlich der Kármánschen Wirbelstraße, die fast die gesamte Rinnenbreite erfasst. Als einfachste, wirkungsvolle Form für den „Störkörper“ bewährte sich eine plattige, scharfkantige Blende. In *Bild 1* ist die prinzipielle Anordnung dargestellt.

Die wesentlichen Ergebnisse der Voruntersuchungen sind im Abschnitt 3 wiedergegeben. Aufgrund der nach visueller Beurteilung guten Mischwirkung dieser Anordnung wurden die weiteren Versuche in kreisrunden Rohren durchgeführt; die Ergebnisse werden ab Abschnitt 5 beschrieben.

### 3. Dimensionslose Darstellung

Für die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse wurde eine Darstellung in Form dimensionsloser Kennzahlen gewählt. Hierzu bieten sich die *Strouhal-Zahl*  $Sr$  für die Frequenz der Pendelströmung sowie die *Reynolds-Zahl*  $Re$  zur Beschreibung der Strömungsform an:

$$Sr = l_{char} \cdot f/v_{char} \quad (1)$$

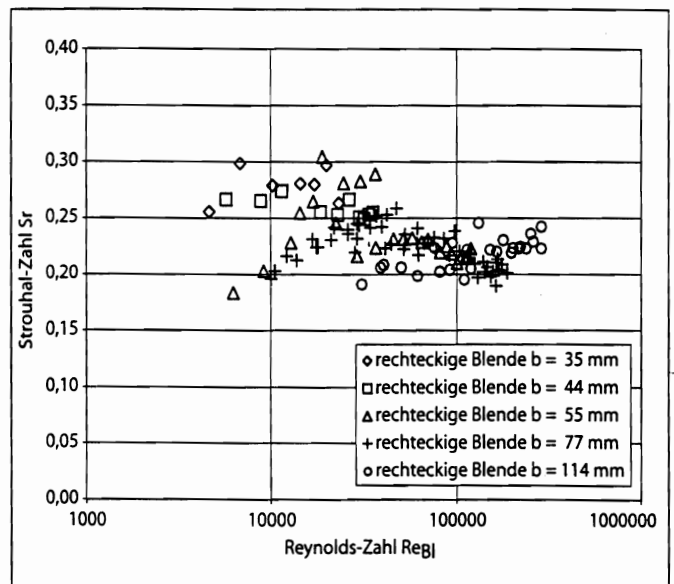
und

$$Re_{Bl} = l_{char} \cdot v_{char}/\nu \quad (2)$$

mit

$l_{char}$  = charakteristische Länge in m,

$f$  = Frequenz der Pendelströmung in 1/s,



**Bild 2:** *Strouhal-Zahl*  $Sr$  als Abhängige der blendenbezogenen *Reynolds-Zahl*  $Re_{Bl}$  für Rechteckquerschnitte.

## 4. Messtechnik zur Konzentrationsbestimmung

Für die Messung der Mischwirkung wurden kleine Photometer eingesetzt, bei denen das Licht einer roten Leuchtdiode von einer Photodiode aufgefangen wird. Als Färbemittel für die Dosierflüssigkeit wurde Methylenblau verwendet, da seine Extinktion im roten Licht sehr hoch ist. Durch eine entsprechend kalibrierte Messelektronik konnte die Konzentration der eingemischten Dosierflüssigkeit gemessen werden.

Der Abstand zwischen Lichtquelle und Photodiode betrug 8,5 mm bei einem Lichtstrahldurchmesser von 3 mm. Bei einer Messfrequenz von 50 Messungen pro Sekunde war bei einem Rohrdurchmesser von 288 mm eine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung gewährleistet.

Die Messfühler waren im Rohr radial verschiebbar in einer Entfernung von 0,10, 0,30, 1,00 und 3,00 m unterstrom der Dosierlanze angeordnet. Da das Rohrstück mit den Photometern drehbar eingebaut war, konnte mit den Messfühlern in den genannten Ebenen jede Stelle erreicht werden. Gemessen wurden in jeder Ebene jeweils 620 Werte in neun Positionen. Die Messelektronik war so ausgelegt, dass als Werte das Konzentrationsverhältnis  $c_c$  ausgegeben wurde;  $c_c$  ist der Verhältniswert aus der örtlichen Konzentration  $C$  geteilt durch die mittlere Konzentration  $C_m$ , die sich bei einer völligen Vermischung ergibt:

$$c_c = C/C_m \quad (5)$$

## 5. Messungen im kreisrunden Querschnitt

Die rechteckige Blende in Form eines vertikalen Streifens gleicher Breite wurde in der oben erwähnten Versuchsrohrleitung mit einem inneren Durchmesser von 288 mm untersucht. Die Ergebnisse waren zunächst nicht überzeugend.

Bei einem Kreisrohr und vertikaler, rechteckiger Blende variieren die Abstände zwischen der Blende und der Rohrwand über die Höhe sehr stark; als Folge ergeben sich unterschiedliche Ablösungen, in denen die Ursache für die Instabilitäten zu sehen ist. Wird die Blendenbreite so gewählt, dass in jeder horizontalen Ebene eine günstig wirkende Einschnürung gewährleistet ist, so ergibt sich eine über die Höhe veränderte Blendenbreite und damit eine Blende mit bogenförmigem Rand, die nachfolgend als „Bogenblende“ bezeichnet wird.

Die Breite der entwickelten Bogenblende kann mit der Gleichung beschrieben werden:

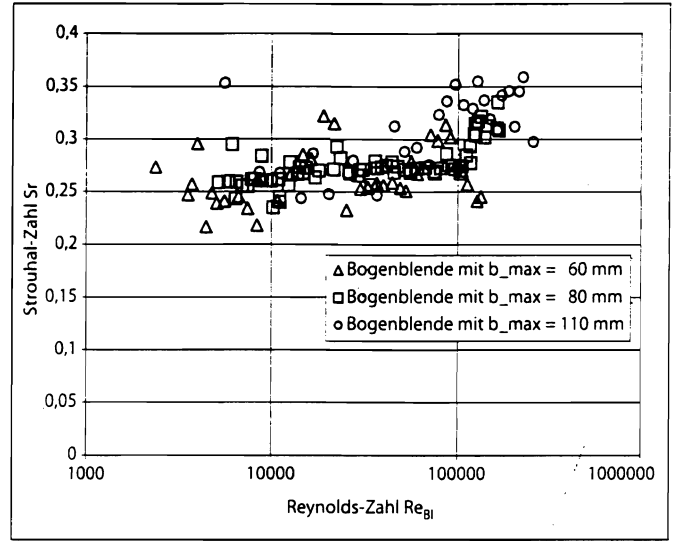
$$b/b_{Bl,max} = [(1 - z/r)/14,17]^{0,363} + 0,616 \text{ für } 0 < z < r \quad (6)$$

mit

- $r$  = innerer Radius des Rohres,
- $z$  = vertikaler Abstand von der Rohrachse,
- $b_{Bl,max}$  = maximale Blendenbreite in Höhe der Rohrachse.

Die Stirnfläche der so ausgebildeten Blende beträgt  $A_{Bl} = 0,896 \cdot b_{Bl,max} \cdot d$ .

Bogenblenden mit einer maximalen Breite  $b_{Bl,max}$  von 60, 80 und 110 mm wurden in die Rohrleitung eingebaut. Die



**Bild 3:** Strouhal-Zahl  $Sr$  als Abhängige der blendenbezogenen Reynolds-Zahl  $Re_{Bl}$  für bogenförmige Blenden.

Ergebnisse, dargestellt in *Bild 3*, zeigen eine geringe Streuung um eine Strouhal-Zahl von 0,25 für  $Re_{Bl} < 100.000$ . Da sich bei einem Kreisquerschnitt die Breite über der Höhe verändert, müssen die charakteristischen Größen neu definiert werden: Als charakteristische Länge wird die Ablösungsbreite in der Mitte der Blende eingesetzt:

$$b_{Ablösg,max} = b_{Bl,max} \cdot [0,2 \cdot \ln(d/b_{Bl,max}) + 1,2] \quad (3a)$$

mit

$d$  = Rohrdurchmesser in m.

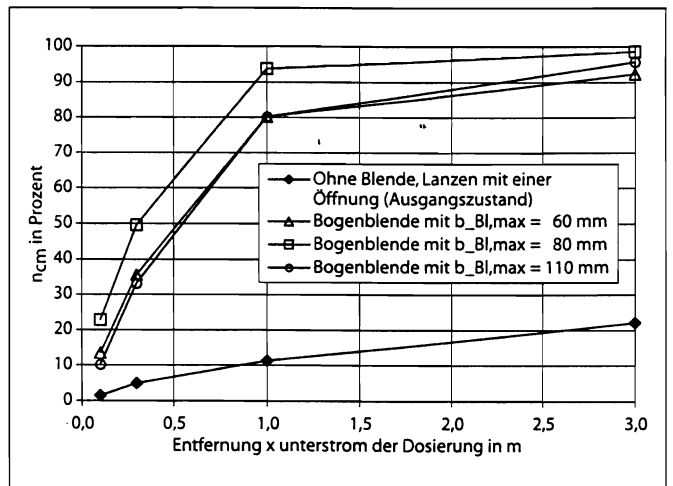
Der eingeschnürte Fließquerschnitt  $A_c$  kann für die hier betrachtete Form der Blende mit genügender Genauigkeit entsprechend der beobachteten Ablösungsbreite in Verbindung mit Gleichung (3a) berechnet werden zu:

$$A_c = A \cdot (1 - b_{Ablösg,max}/d) \quad (7)$$

mit

$A$  = unverbauter Fließquerschnitt, hier Rohrquerschnitt in  $m^2$  und damit

$$v_c = Q/A_c = Q/A \cdot (1 - b_{Ablösg,max}/d). \quad (4a)$$



**Bild 4:** Anteil der Messwerte innerhalb der Grenzen  $0,67 \leq c_c \leq 1,5$  in Prozent bei  $Q = 40 \text{ l/s}$  als Abhängige des Fließweges  $x$ .

Der Verlustbeiwert  $\zeta$  der Bogenblende, theoretisch ermittelt nach *Borda-Carnot* sowie in Messreihen bestätigt, beträgt unabhängig von der *Reynolds-Zahl*:

$$\zeta = \{d/[0,6(d - 1,14 b_{\max})] - 1\}^2 \quad (8)$$

Die Ergebnisse für Blenden von 60, 80 und 110 mm Breite sind in *Bild 4* als Auftragung der Mischgüte (Prozentanteil der Messwerte mit nahezu vollständiger Durchmischung, siehe Abschnitt 7) über die Mischstrecke wiedergegeben. Eine optimale Einmischung ergibt sich für die Blendenbreite

$$b_{Bl, \max} = ca. 0,28 \cdot d \quad (9)$$

**Tabelle 1.** Abmessungen und Kenngrößen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser  $d$  in m und  $Q$  in  $m^3/s$  für die empfohlene Bogenblende mit  $b_{Bl, \max} / d = 0,28$ :

Form der Bogenblende	
y	b
0,1 · d (Mitte)	0,280 · d
0,05 · d	0,275 · d
0,15 · d	0,266 · d
0,25 · d	0,255 · d
0,35 · d	0,247 · d
0,45 · d	0,219 · d
Eingeschürfte Kreissegment	$\approx 0,455$
Charakter. Länge:	$b_{\text{Ablosg}} = 0,407 \cdot d$
$Re_{\text{Bl}}$ für Wasser bei 20°C	$Re_{\text{Bl}} \approx 687000 \cdot Q/d^3$
Verlustbeiwert:	$\zeta = 2,1$
Verlusthöhe:	$0,174 \cdot \zeta \cdot v^2/d$
Pendelfrequenz:	
$Re_{\text{Bl}} \leq 100000$ :	$f = 1,46 \cdot Q/d^3$
$Re_{\text{Bl}} > 100000$ :	$f = 1,78 \cdot Q/d^3$

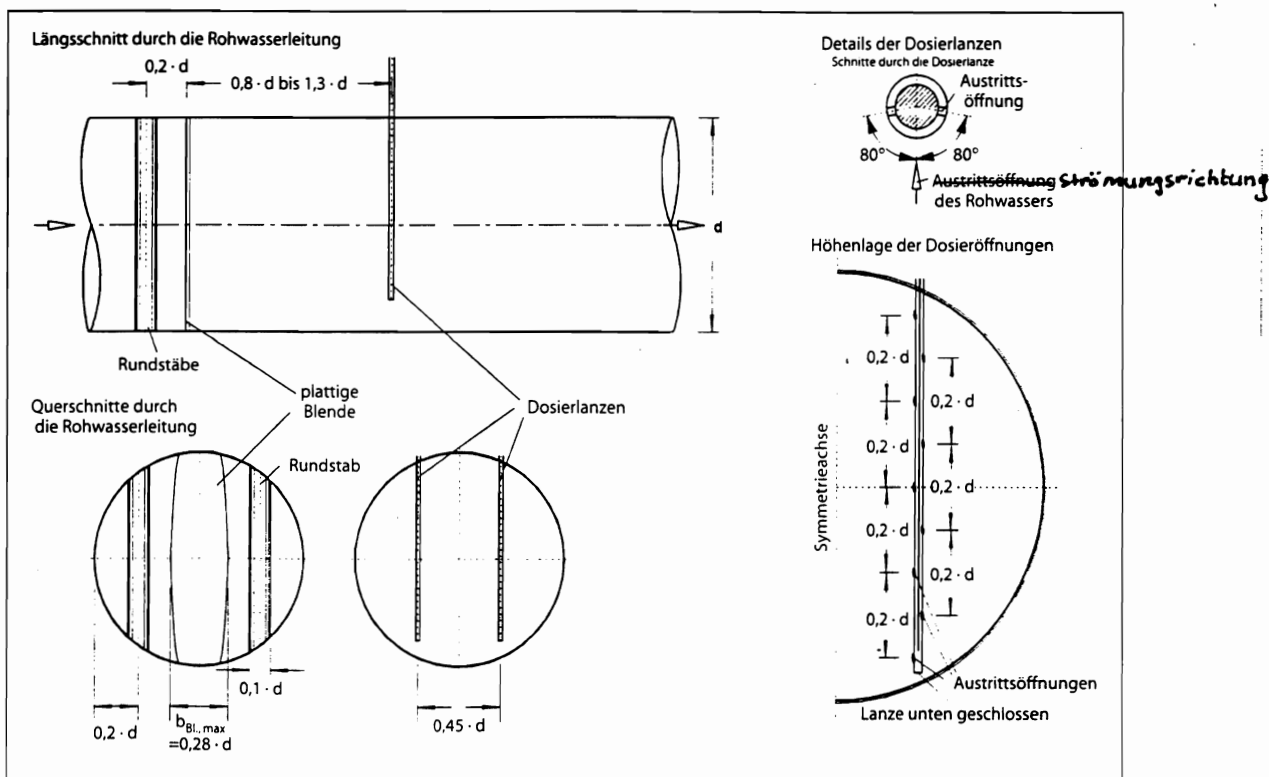
Diese Breite entspricht den Beobachtungen in rechteckigen Querschnitten und wird als „Standardausbildung“ empfohlen. Für die empfohlene Breite der Bogenblende ergeben sich die Abmessungen und Kennzahlen als Verhältniswerte zum Rohrdurchmesser  $d$  und Volumenstrom  $Q$  in *Tab. 1*.

## 6. Gestaltung des Mischers

Bei den Versuchen zeigte sich, dass der pendelnde Strahl zum Teil nur unvollständig in die wandnahen Bereiche eindringt. Als Ursache wird die Leitwirkung der Wandung angesehen; deshalb wurde die wandnahe Strömung durch Turbulenzelemente destabilisiert. Die besten Ergebnisse wurden mit senkrechten Rundstäben von  $0,1 \cdot d$  Durchmesser erzielt, die ca.  $0,2 \cdot d$  oberstrom der Blende so angeordnet sind, dass zur Wand ein freier Durchlass von  $0,1 \cdot d$  bis  $0,2 \cdot d$  bleibt (*Bild 5*).

Mit der Pendelbewegung der Strömung und den Turbulenzelementen war eine gute Vermischung in horizontaler Richtung erreicht (bei vertikal angeordneter Blende). Die Verteilung in der Vertikalen sollte durch eine gleichmäßige Zugabe der Dosierflüssigkeit über die ganze Höhe des Querschnittes erfolgen. Diese Aufgabe lässt sich mittels senkrechter Dosierlanzen lösen, die unten verschlossen sind und gleichmäßig über die ganze Höhe verteilt viele kleine Öffnungen erhalten. Wenn die Summe dieser Öffnungsquerschnitte erfahrungsgemäß weniger als ca. 25% des inneren Lanzenquerschnittes beträgt, tritt die Dosierflüssigkeit gleichmäßig durch die einzelnen Bohrungen aus.

Bei Natronlauge-Dosieranlagen ist bei der Gestaltung der Dosierlanzen eine zusätzliche Einschränkung zu beachten: Hinter runden Dosierlanzen bilden sich unvermeidlich kleine Ablösungszonen. Wenn die Lauge in diese Zonen eingetragen wird, so kommt es infolge der Stagnation zu einer Über-



**Bild 5:** Anordnung von turbulenzfördernden Einbauten und Dosierlanzen für eine Natronlauge-dosierstelle.

alkalisierung mit der unerwünschten Bildung von Kalkkrusten. Es zeigte sich, dass dieser Effekt bei geringeren Austrittsgeschwindigkeiten nur für eine Ausrichtung der Öffnungen quer oder um bis zu 15° gegen die Strömung vermieden werden kann. Aus Versuchen wurde für diese Ausrichtung die erforderliche Austrittsgeschwindigkeit der Dosierflüssigkeit  $v_{\text{Dos,erf}}$  aus den Öffnungen abgeleitet:

$$v_{\text{Dos,erf}} = 1,3 \cdot v \cdot (d_{\text{Lanze}}/d_{\text{Dos}})^{1/3} \quad (10)$$

mit

$d_{\text{Lanze}}$  = Durchmesser der Lanze in m,

$d_{\text{Dos}}$  = Durchmesser der Bohrungen in m,

$v$  = Strömungsgeschwindigkeit im freien Querschnitt in m/s.

Von Bedeutung ist für Natronlauge-Dosieranlagen auch die Anordnung der beiden Dosierlanzen: Zum einen sollen sie so dicht an der Blende angeordnet sein, dass die pendelnde Strömung noch möglichst intensiv ist. Andererseits muss bei allen Betriebsbedingungen das Eindringen der Natronlauge in den Strömungsschatten hinter der Blende vermieden werden, da sonst in der Stagnationszone eine Überalkalisierung zu erwarten ist. Günstig erwies sich ein Abstand von  $0,8 \cdot d$  bis  $1,3 \cdot d$  unterstrom der Blende mit einem Abstand von  $0,45 \cdot d$  untereinander. Die empfohlenen Abmessungen und die Details zur Gestaltung sind in *Bild 5* zusammengestellt.

Für die Messungen wurden als Dosierlanzen Messingrohre von 7 mm Durchmesser verwendet. Insgesamt 9 Bohrungen von 0,6 mm Durchmesser waren gleichmäßig über die Höhe so verteilt, dass 5 Öffnungen zur Rohrmitte und 4 Öffnungen zur Rohrwand hin zeigten.

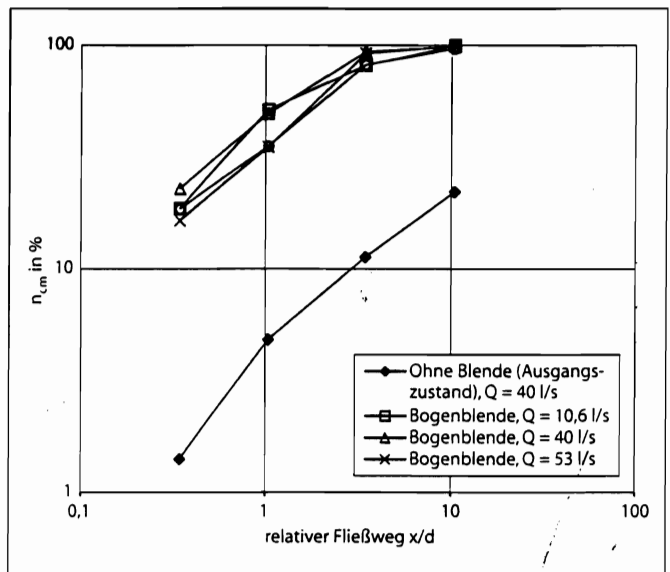
Um einen eventuellen Einfluss der Viskosität der Dosierflüssigkeit zu bestimmen, wurden auch Versuche mit gefärbten Zuckerlösungen durchgeführt, die eine bis sechsfache Zähigkeit der wässrigen Farblösung aufwiesen. Da diese Versuche die gleichen Ergebnisse wie die übrigen Versuche zeigten, sind die Versuchsergebnisse auf Natronlauge als Dosiermittel übertragbar, sofern ihre Viskosität nicht durch eine zu hohe Konzentration weiter ansteigt. Dies wird durch die Vorverdünnung in der Regel verhindert.

## 7. Ergebnisse

Folgende signifikante Daten aus jeweils etwa 24 000 Messwerten wurden bestimmt und graphisch dargestellt:

- Prozentualer Anteil  $n_{\text{cm}}$  der Messwerte mit einem Konzentrationsverhältnis  $0,67 < c_c < 1,5$  als Maß für die Durchmischung.
- An jedem Messpunkt wurden aus den 62 entsprechend 10% höchsten Werten das arithmetische Mittel gebildet. Das jeweils höchste Konzentrationsverhältnis in einer Messebene wird als „ $c_{10}$ “ bezeichnet und ist ein Maß für die Konzentrationsspitzen.

Die dargestellten Ergebnisse wurden in der kreisrunden Rohrstrecke mit einem Innendurchmesser von  $d = 288$  mm ermittelt.



**Bild 6:** Anteil der Messwerte innerhalb der Grenzen  $0,67 < c/c_m < 1,5$  in Prozent als Abhängige des relativen Fließweges  $x/d$ .

Zu a)

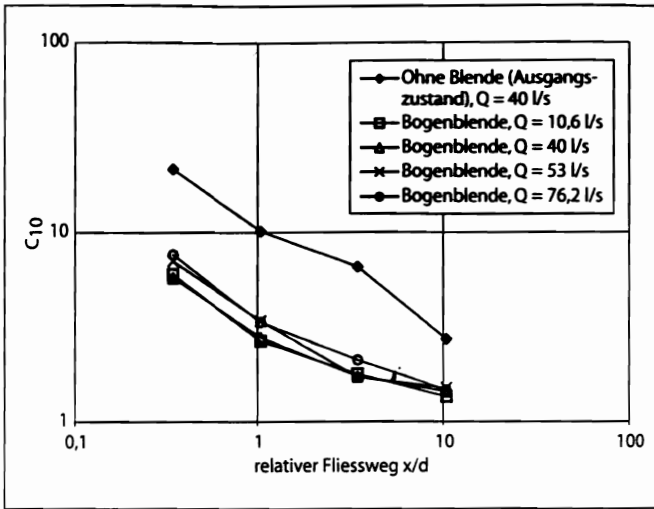
Der Anteil  $n_{\text{cm}}$  ist ein Kriterium für die Durchmischung: Beträgt  $n_{\text{cm}}$  näherungsweise 100%, so ist die Dosierflüssigkeit vollständig mit dem Rohwasser gemischt.

Für quantitative Aussagen zur Verbesserung der Durchmischung wird in *Bild 6* der Anteil  $n_{\text{cm}}$  als Funktion des relativen Fließweges  $x/d$  wiedergegeben. Der Bezugszustand ist  $Q = 40$  l/s, keine Einbauten, zwei unten offene Dosierlanzen bis zur Rohrmitte. Weitere Versuche der empfohlenen Anordnung (Bogenblende mit  $b_{\text{Bl,max}} = 80$  mm, Turbulenzelemente, Dosierlanzen wie oben beschrieben) wurden mit Volumenströmen zwischen 10,6 l/s und 76,2 l/s gefahren.

Aus *Bild 6* lässt sich ablesen, dass die empfohlene Anordnung in gleichen Abständen hinter der Dosierung eine 10-fach verbesserte Durchmischung gegenüber dem Ausgangszustand erbringt. Wesentlich bei dieser Darstellung ist ferner, dass sich die Werte bei den Versuchen mit der Bogenblende in den einzelnen Messebenen nur unwesentlich unterscheiden, obwohl die Volumenströme (und damit die Geschwindigkeiten) im Verhältnis 1 : 7,2 variiert wurden. Daraus ist zu schließen, dass bei der gefundenen Lösung vorwiegend die geometrischen Verhältnisse die Durchmischung beeinflussen und die Ergebnisse auch auf andere Rohrdurchmesser übertragbar sind.

Zu b)

Für die Natronlauge dosierung ist weniger die gute Durchmischung als vielmehr die Höhe der vorhandenen Konzentrationsspitzen entscheidend, da die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Carbonatbildung vorwiegend von der Restkonzentration der Natronlauge abhängt. Daher wurde mit  $c_{10}$  das Konzentrationsverhältnis der Konzentrationsspitzen quantitativ erfasst. Ist  $c_{10}$  auf einen Wert von 1,5 abgebaut, so wird nur noch eine sehr geringe und langsame Carbonatbildung auftreten und nahezu im gesamten Wasservolumen sind die angestrebten Gleichgewichtsbedingungen eingestellt.



**Bild 7:** Höchste Konzentrationsverhältnisse  $C/C_m$  (mit  $C$  aus 10% der höchsten Messwerte) als Abhängige des relativen Fließweges  $x/d$ .

In *Bild 7* werden für dieselben Versuche wie in *Bild 6* die Werte von  $c_{10}$  als Funktion des relativen Fließweges  $x/d$  unterstrom der Dosierstelle aufgetragen.

Der Mischer mit der Bogenblende baut die „Konzentrationspitzen“ bei einem relativen Fließweg von  $x/d = 0,3$  auf ein  $c_{10} = 6,9$  ab, während beim Bezugzustand noch ein Wert von  $c_{10} = 46,4$  erreicht wird. Der Einfluss der geometrischen Verhältnisse ist hier noch deutlicher als bei der Durchmischung. Die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr hat praktisch keinen Einfluss auf das Mischergebnis. Eine gewünschte Mischgüte wird immer nach der Fließstrecke  $x/d$  erreicht. Fließt das Wasser schneller, so ist die benötigte Einmischzeit entsprechend kürzer.

## 8. Diskussion der Ergebnisse

Mit den signifikanten Daten  $n_{cm}$  und  $c_{10}$ , den Darstellungen und Auswertungen ist die Verbesserung der Mischwirkung sowohl für die gleichmäßige Durchmischung als auch für den Abbau der Konzentrationspitzen durch die entwickelte Anordnung nachgewiesen.

Für die Übertragung der Ergebnisse auf größere oder kleinere Rohrdurchmesser werden aufgrund der in den Versuchen erreichten *Reynolds*-Zahlen in der Rohrleitung von  $Re > 300\,000$  bzw. Untersuchungen an kleineren Versuchsanordnungen keine Schwierigkeiten erwartet. In größeren Rohren wird aufgrund der höheren Turbulenz die Mischwirkung der entwickelten Anordnung noch unterstützt.

Die hohe Intensität der Vermischung als wichtiges Ziel der Untersuchung wird insbesondere daran deutlich, dass aus den Messergebnissen eine ca. 1600-fache Verdünnung nach ca. 0,1 Sekunde Fließzeit ermittelt werden konnte. Darüber hinaus werden auch die Bedingungen zur Begrenzung der Druckverluste in der Dosiereinrichtung sowie in der Hauptströmung eingehalten bzw. weit unterschritten. Die in der Einleitung definierten Zielvorstellungen zur Gestaltung einer neuen Dosieranordnung für die Dosierung von Natronlauge zur Trinkwasseraufbereitung sind voll erfüllt.

Die Anwendung zur Dimensionierung einer Dosierstrecke soll beispielhaft in nachfolgendem Kapitel anhand eines Praxisbeispiels dargestellt werden.

## 9. Berechnungsbeispiel

Als Beispiel für die Dimensionierung eines Mischers soll das eingangs erwähnte Wasserwerk Urfeld herangezogen werden. Folgende Betriebsdaten sind bekannt:

In einer Leitung DN 600 fließen 150 bis 1400 m<sup>3</sup>/h Rohwasser. Durch zwei Dosierlanzen mit 20 mm Durchmesser wird konstant 700 l/h deionisiertes Wasser zugegeben, in dem abhängig vom Rohwasservolumenstrom Natronlauge gelöst ist.

Die Anlage wird auf eine Zugabe von 0,1 l/s (360 l/h) deionisiertem Wasser ausgelegt. Als Alternative zum Mischer mit einem Durchmesser gleich Rohrdurchmesser (DN 600) wird die Anlage auch für eine Leitung dimensioniert, die im Bereich des Mischers auf 500 mm Durchmesser verringert wird (s. Abschnitt 10!). Um die Werte der Alternativlösung kenntlich zu machen, werden sie *kursiv* dargestellt.

In die Herleitungsgleichungen bzw. in *Tab. 1* werden die folgenden Werte eingesetzt:

$$d = 0,60 \text{ m} / \quad d = 0,50 \text{ m}$$

$$Q_{\min} = 150 \text{ m}^3/\text{h} = 150/3600 \text{ m}^3/\text{s} = 0,0417 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{\min}$$

$$Q_{\max} = 1400 \text{ m}^3/\text{h} = 1400/3600 \text{ m}^3/\text{s} = 0,389 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{\max}$$

Damit ergeben sich die Form der Bogenblende und die Kennwerte des Mischers nach *Tab. 2*. Ebenso werden die Turbulenzelemente und Dosierlanzen laut *Bild 5* angeordnet:

Durchmesser der Turbulenzelemente:	0,06 m / 0,05 m
Lichter Wandabstand in der Mitte:	0,18 m / 0,15 m
Abstand Blende – Dosierlanzen:	0,60 m / 0,50 m
Abstand der Dosierlanzen untereinander:	0,27 m / 0,225 m

**Tabelle 2.** Ermittelt Beispiel für die Dimensionierung eines Mischers.

Form der Bogenblende				
d = 0,60 m		d = 0,50 m		Gleichung
y in mm	b in mm	y in mm	b in mm	
0	168	0	140	(9)
30	165	25	138	(6)
90	160	75	133	(6)
150	153	125	128	(6)
210	145	175	121	(6)
270	131	225	110	(6)
Kennwerte des Mischers				
	d = 0,60 m	d = 0,50 m	Gleichung	
Durchfl. Querschnitt $A_c$ :	0,164 m <sup>2</sup>	0,115 m <sup>2</sup>	(7)	
Kennz. Länge $b_{\text{Ablösg.}}$ :	0,244 m	0,204 m	(3a)	
ReBl für $Q_{\min}$ :	48 000	57 000	(2a)	
ReBl für $Q_{\max}$ :	445 000	534 000	(2a)	
Verlustrhöhe bei $Q_{\min}$ :	0,0023 m	0,0048 m	(8)	
Verlustrhöhe bei $Q_{\max}$ :	0,20 m	0,42 m	(8)	
Pendelfrequenz b. $Q_{\min}$ :	0,28/s	0,48/s	(1a)	
Pendelfrequenz b. $Q_{\max}$ :	3,21/s	5,54/s	(1a)	

Die Ausbildung der Dosierlanzen muss bei der konstanten Zugabe von 0,1 l/s deionisiertem Wasser nach der maximalen Fließgeschwindigkeit in der Rohrleitung erfolgen:

$$v_{\max} = Q_{\max} / A = 0,389 / (\pi \cdot 0,60^2 / 4) = 1,37 \text{ m/s}$$

$$v_{\max} = 1,98 \text{ m/s}$$

Geplant sind zwei Lanzen mit einem Durchmesser von 20 mm und je 9 Öffnungen von 1,2 mm/1,0 mm Durchmesser (nach Gleichung 10):

$$v_{\text{Dos, erf}} = 1,3 \cdot 1,37 \cdot (20/1,0)^{1/3} = 4,83 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Dos, erf}} = 1,3 \cdot 1,98 \cdot (20/1,0)^{1/3} = 6,99 \text{ m/s}$$

Bei  $Q_{\max} = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$  entsprechend  $0,389 \text{ m}^3/\text{s}$  werden an Dosierflüssigkeit 100 ml deionisiertes Wasser und ca. 8 ml Natronlauge pro Sekunde zugegeben. Damit ergibt sich für 29 Bohrungen von 0,12 cm/0,10 cm Durchmesser (in cm und  $\text{cm}^3/\text{s}$  gerechnet):

$$A_{\text{Dos, gesamt}} = 18 \cdot 0,12^2 / 4 \cdot \pi = 0,204 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{Dos, gesamt}} = 18 \cdot 0,10^2 / 4 \cdot \pi = 0,141 \text{ cm}^2$$

$$v_{\text{Dos, vorh}} = Q/A = 108/0,204 = 530 \text{ cm/s} =$$

$$5,30 \text{ m/s} > 4,83 \text{ m/s} = v_{\text{Dos, erf}}!$$

$$v_{\text{Dos, vorh}} = Q/A = 108/0,141 = 763 \text{ cm/s} =$$

$$7,63 \text{ m/s} > 6,99 \text{ m/s} = v_{\text{Dos, erf}}!$$

Die Lanzen erhalten in einem Abstand von 120 mm/100 mm fünf Bohrungen von 1,2 mm/1,0 mm Durchmesser zur Mitte hin und „auf Lücke“ vier Bohrungen nach außen.

Da sich die relativen Fließwege  $x/d$  linear mit dem Durchmesser ändern und die Geschwindigkeiten mit der zweiten Potenz des Durchmessers, benötigt der Mischer mit  $d=0,60 \text{ m}$  zur Erzielung der gleichen Mischgüte die  $0,6^3/0,5^3 = 1,73$ -fache Zeit gegenüber der Alternativlösung.

Die geplante Dosier- und Mischeinrichtung ist somit vollständig beschrieben.

## 10. Schlussfolgerung und Ausblick

Statische Mischer mit meist wendelförmigen Einbauten oder „Strömungsschikanen“ im Mischweg werden in der Verfahrenstechnik sowohl zum Mischen von hochviskosen Stoffen wie Pasten als auch zum Mischen dünnflüssiger Medien, wie Flüssigkeiten und Gasen, seit längerem eingesetzt. Gegenüber diesen Konstruktionen unterscheidet sich der beschriebene Mischer dadurch, dass die zur Mischung benutzte „Pendelströmung“ oberstrom der Dosierstelle erzeugt wird, so dass der eigentliche Mischweg frei von allen Einbauten bleibt. In Verbindung mit entsprechend dimensionierten Dosierlanzen werden dadurch für das Dosiermittel Stagnationszonen mit ihren Nachteilen sicher vermieden.

In den Untersuchungen zeigte sich, dass bei der Bogenblende der relative Fließweg  $x/d$  der entscheidende Faktor sowohl für die Durchmischung als auch für den Abbau der Konzentrationsspitzen ist. Da speziell für die Natronlauge-Dosieran-

lage der schnelle Abbau der Konzentrationsspitzen vorrangig ist, sollte erwogen werden, ob anstelle von Leitungen mit großen Durchmessern und üblichen Geschwindigkeiten nicht kleinere Leitungen mit entsprechend höheren Geschwindigkeiten und kurzen Mischzeiten einzusetzen sind (siehe Abschnitt 7). Wenn eine ausreichende Vermischung nach einem relativen Fließweg  $x/d$  erreicht wird, so ist der absolute Fließweg  $x$  bei einem kleineren Rohrdurchmesser  $d$  entsprechend kleiner; die Fließzeit von der Dosierstelle bis zu diesem Punkt ist dann infolge der höheren Geschwindigkeit und der kürzeren Fließstrecke verringert und damit die Reaktionszeit für die Carbonatbildung kürzer. Zu beachten ist hierbei, dass mit höheren Fließgeschwindigkeiten die Druckverluste in der Mischeinrichtung ansteigen (s. Berechnungsbeispiel!).

Mit der Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge kann die Anwendung des Mischers auf andere niedrigviskose Flüssigkeiten (und Gase) ausgeweitet werden; ebenso ist das Mischprinzip nicht auf eine vollgefüllte Rohrleitung mit kreisförmigem Querschnitt beschränkt, sondern kann in Leitungen beliebigen Querschnittes und in offenen Gerinnen mit kompaktem Querschnitt angewendet werden.

Für Aussagen bezüglich der Mischgüte und des Konzentrationsabbaus in solchen Gerinneformen sind jedoch weitere Messungen erforderlich.

### Zusammenstellung der verwendeten Zeichen

A	= Unverbauter Fließquerschnitt, z. B. Rohrqerschnitt in $\text{m}^2$
Ac	= eingeschnürter Fließquerschnitt seitlich der Ablösungszone in $\text{m}^2$
$b_{\text{Ablösg}}$	= Breite der Ablösung hinter der Blende in m
$b_{\text{Ablösg,max}}$	= Breite der Ablösung hinter der Bogenblende in Rohrmitte in m
$b_{\text{Bl}}$	= Breite der rechteckigen Blende in m
$b_{\text{Bl,max}}$	= Breite der Bogenblende in Rohrmitte in m
$b_{\text{Ri}}$	= Breite der Rinne in m
C	= gemessene Konzentration
$C_c$	= Konzentrationsverhältnis $C/C_m$
$C_m$	= Konzentration bei völliger Durchmischung
$C_{10}$	= arithmetisches Mittel aus den 10% höchsten Konzentrationsverhältnissen in der ungünstigsten Position in einer Messebene
d	= innerer Rohrdurchmesser
$d_{\text{Dos}}$	= Durchmesser der Bohrungen in der Dosierlanze in m
$d_{\text{Lanze}}$	= Durchmesser der Dosierlanze in m
f	= Frequenz der Pendelbewegung in 1/s
h	= Wassertiefe oder Höhe eines rechteckigen Kanals in m
$l_{\text{char}}$	= charakteristische Länge in m
$n_{\text{cm}}$	= Anteil der Messungen in Prozent mit $0,67 < c_c < 1,5$
Q	= Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$
r	= voller Radius des Rohres in m
Re	= Reynold-Zahl: $Re = l_{\text{char}} v_{\text{char}} / \nu$
$Re_{\text{Bl}}$	= Reynolds-Zahl bezogen auf die Blende, Gl. (2) bzw. (2a)
Sr	= Strouhal-Zahl, Gl. (1) bzw. (1a)
$v_c$	= Geschwindigkeit im eingeschnürten Fließquerschnitt in m/s für Kreisquerschnitte: $v_c = Q/A_c = Q/[A \cdot (1 - b_{\text{Ablösg,max}}/d)]$ für Rechteckquerschnitte: $v_c = Q/[h \cdot (b - b_{\text{Ablösg}})]$
$v_{\text{Dos}}$	= Austrittsgeschwindigkeit der Dosierflüssigkeit aus der Lanze in m/s
x	= Fließweg ab Dosierstelle in m
z	= horizontaler Abstand vom Mittelpunkt des Rohres in m
$\nu$	= kinematische Viskosität in $\text{m}^2/\text{s}$
z	= Verlustbeiwert der Bogenblende bezogen auf die Rohwasserströmung