

Korrekte Ermittlung von Zeta-Werten

einwandfreie Dimensionierung von trinkwasser-installationen

Calcul correct des valeurs zêta

les valeurs zêta sont essentielles pour le dimensionnement des réseaux de distribution d'eau. Dans le cas des raccords et pièces formées, une valeur zêta élevée entraîne des diamètres de conduite plus grands, augmentant en même temps le volume d'eau retenu. à l'inverse, si l'on améliore l'hydrodynamique des composants, les valeurs zêta diminuent, de même que les diamètres des conduites. il existe donc une relation directe entre les valeurs zêta, la sécurité et la rentabilité d'une part, et l'optimisation des pertes de charge des réseaux d'eau d'autre part. le présent article illustre comment déterminer correctement les valeurs zêta. un exemple illustre ces calculs et démontre la bonne concordance entre les valeurs calculées et celles mesurées sur le réseau.

Correct Determination of Zeta Values

Zeta values are an important factor in fluid mechanics and a decisive parameter for the dimensioning of supply networks. Higher zeta values in shaped pieces and connectors lead to larger pipe diameters and water content in distribution systems. By contrast, parts that are favourable to flow, or low zeta values, make it possible to use smaller pipe sizes. thus there is a close relationship between zeta values, reliability and efficiency on the one hand, and potable water installations optimised in terms of pressure loss, on the other. the following article shows how zeta values are correctly determined. using a practical example, it will demonstrate how the calculated values agree with the values actually measured in a system.

patrik Zeiter



Zeta-Werte sind eine wichtige Grösse in der Strömungslehre und ein massgebender Parameter für die Dimensionierung von Leitungsnetzen. Höhere Zeta-Werte bei Form- und Verbindungsstücken führen zu grösseren Rohrdurchmessern und Wasserinhalten in Verteilsystemen. Dagegen ermöglichen strömungsgünstige Bauteile beziehungsweise niedrige Zeta-Werte den Einsatz kleinerer Rohrdimensionen. Somit besteht eine enge Interaktion zwischen Zeta-Werten, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit einerseits und druckverlustoptimierten Trinkwasserinstallationen andererseits. Der nachfolgende Artikel zeigt, wie die Zeta-Werte korrekt ermittelt werden. Anhand eines Praxisbeispiels wird zudem der Nachweis erbracht, dass die berechneten Werte mit den gemessenen Werten einer Anlage übereinstimmen.

1 Grundlagen

Um konsistent rechnen und Messungen vergleichen zu können, müssen *Grundeinheiten* definiert werden. Das in Europa gebräuchliche Mass-System ist das *SI-System*¹ in der Variante des *MKS-Systems*². Diese Einheiten müssen bei Arbeiten mit Zeta-Werten kohärent angewendet werden. Somit darf in Gleichungen nicht mit [bar] gerechnet werden, sondern mit der vom SI-System abgeleiteten Einheit *Pascal* [Pa]. $1 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [N/m}^2\text{]} = 1 \text{ [kg/(m}\cdot\text{s}^2\text{)]}$. 1 [bar] entspricht $100\,000 \text{ [Pa]}$. Oft wird die Wasserdichte mit 1 angegeben; im SI-System ist sie jedoch annähernd $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

¹ SI = Système International d'Unités

² MKS = Meter-Kilometer-Sekunde

Volumenstrom V [l/s]

Unter einem Volumenstrom versteht man den *Inhalt* eines Mediums, der sich innerhalb einer *Zeiteinheit* durch einen Querschnitt bewegt. In einem geschlossenen System (ohne Volumendifferenzen durch Zu- oder Abflüsse) ist der Volumenstrom konstant. Dieser Wert ist mit gebräuchlichen Labormessinstrumenten exakt bestimmbar. Steht kein Messgerät zur Verfügung, kann man die Durchflussmenge auch *auslitern*, indem das Medium während einer bestimmten Zeit in einem Gefäß aufgefangen und danach der Zufluss in Liter pro Sekunde ermittelt wird, was der Durchflussmenge beziehungsweise der Leistung des Systems entspricht.

Fliessgeschwindigkeit ω [m/s]

Die Fliessgeschwindigkeit ist vom *Querschnitt* abhängig und kann aus dem Volumenstrom abgeleitet werden. Bei einem konstanten Volumenstrom steigt oder sinkt die Fliessgeschwindigkeit, wenn die Querschnittsfläche (A in $[m^2]$) verkleinert beziehungsweise vergrößert wird.

$$\omega = \frac{V}{A}$$

Mit der Definition der Fliessgeschwindigkeit auf der Basis des Volumenstroms erübrigt sich die Diskussion um die Form des Geschwindigkeitsprofils in einem Rohr. Der Volumenstrom wird gemessen, anschliessend durch den Querschnitt geteilt, was die Fliessgeschwindigkeit ergibt.

Druck p [Pa]

Der Druck in strömenden Medien setzt sich aus einer statischen und einer dynamischen Komponente zusammen. Beide Teile hängen von

der Dichte ab. Sie unterscheiden sich dadurch, dass der (hydro)statische Druck für Fluide mit konstanter Dichte linear mit der Höhe der Fluidsäule steigt, während der dynamische Druckanteil quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids wächst. *Abbildung 1* verdeutlicht die Konstanz der Summe aus dynamischem und statischem Anteil in einer reibungsfreien Strömung. Dies als Konsequenz der Energieerhaltung in Strömungen.

Der *hydrostatische Druck* p_{stat} übt auf jede Fläche, die mit dem Fluid in Verbindung steht, eine Kraft aus, die zur Grösse der Fläche proportional ist. Je grösser die Fläche, desto grösser die darauf wirkende Kraft.

Der *hydrodynamische Druck* p_{dyn} resultiert aus der kinetischen Energie einer strömenden Flüssigkeit an der Oberfläche eines Körpers in dieser Strömung. Er nimmt entsprechend der Geschwindigkeit des Fluids zu und ab. Die Geschwindigkeit kann von grösseren zu kleineren Querschnitten nur zunehmen, wenn der hydrostatische Druck in den kleineren Querschnitten niedriger ist. Umgekehrt liegen die Verhältnisse von kleineren zu grösseren Querschnitten. Durch die Strömung entsteht also in kleineren Querschnitten eine hydrodynamische

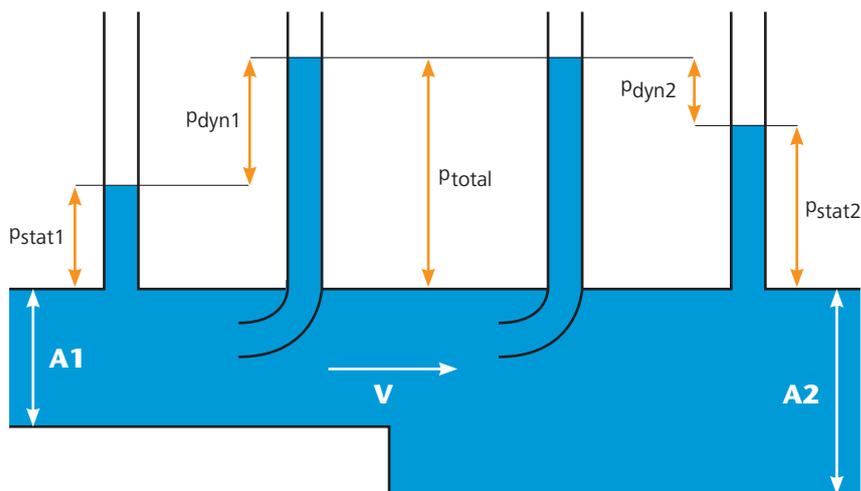


Abb. 1 Dynamischer und statischer Anteil in einer reibungsfreien Strömung.

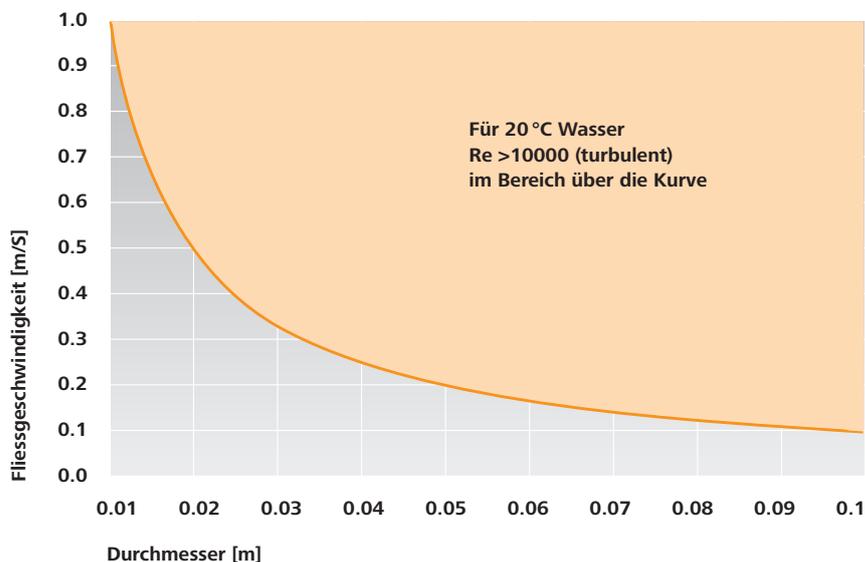


Abb. 2 Anwendung der Formel zur Ermittlung der Reynoldszahl für Rohrleitungen.

sche Verringerung des hydrostatischen Druckes, in grösseren eine Erhöhung.

Reynoldszahl Re [-]

Die Reynoldszahl ist eine in der Strömungslehre verwendete *dimensionslose Kennzahl*. Sie stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften (*Reibungskräften*) dar. Daraus ergibt sich, dass das Turbulenzverhalten geometrisch ähnlicher Körper bei gleicher Reynoldszahl annähernd gleich ist. Bei Rohrströmungen werden als charakteristische Grössen üblicherweise der Innendurchmesser d , der Betrag der über den Querschnitt gemittelten Geschwindigkeit ω und die kinematische Viskosität des Fluids ν (dynamische Viskosität η geteilt durch die Dichte des Fluids ρ) verwendet. Für Wasser beträgt die kinematische Viskosität 10^{-6} [m² s⁻¹] (bei 20 °C). Die Dichte des Wassers ist abhängig von der Temperatur. Sie beträgt bei 20 ° Celsius 998 [kg/m³].

Formel zur Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$$

Wie die Formel für *Rohrleitungen* angewandt wird, ist in *Abbildung 2* ersichtlich.

In *turbulenten Strömungen* ($Re > 10000$) verläuft das Geschwindigkeitsprofil beinahe flach (*blau gestrichelte Linie Abb. 3*). Aus der Darstellung geht hervor, dass das Wasser in üblichen Trinkwasserleitungen in der Regel turbulent ist.

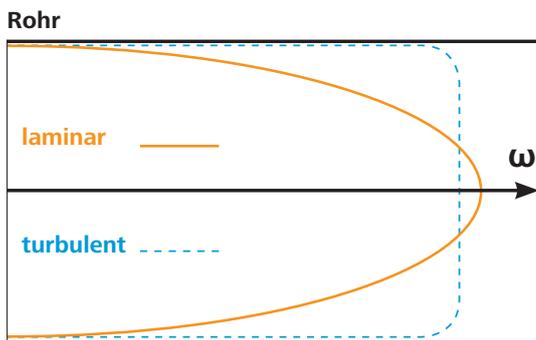


Abb. 3 unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile je nach Strömung.

2 Satz von Bernoulli

Die *Bernoullische Energiegleichung*, auch Satz von *Bernoulli* genannt, ist eine wichtige Gleichung in der Strömungslehre, die nach *Daniel Bernoulli* benannt ist. Mit dem Hauptwerk: «*Hydrodynamica sive de viribus et moti-*

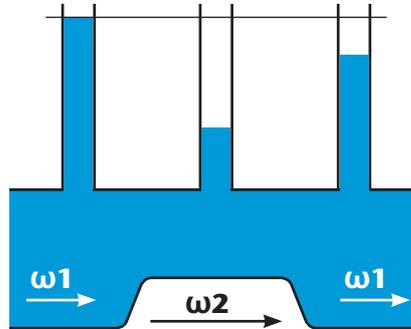


Abb. 4 Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse bei Rohrverengungen.

bus fluidorum commentarii» (1738) wurde der Schweizer zum Begründer der *Hydrodynamik*.

Energie- als Druckgleichung

Nach dem Kontinuitätsgesetz für inkompressible Fluide tritt dieselbe Fluidmenge aus jedem beliebigen Rohrabschnitt aus, die in ihn eingeführt wurde. Das Fluid muss eine Verengung also mit dem gleichen Durchfluss (Menge/Zeit) passieren wie den Rest des Rohres. Deshalb muss sich die Geschwindigkeit des Fluids zwingend erhöhen. Daraus ergeben sich folgende *zwei Fragen*:

- Ein Fluid, das durch ein Rohr mit einem wechselnden Querschnitt strömt, wird beschleunigt (oder verzögert). Woher stammt die dafür benötigte Kraft?
- Ein Fluid hat in der Verengung des Rohres eine grössere kinetische Energie als im Bereich des grösseren Querschnitts. Woher kommt die Energie unter Einbezug des Prinzips der Energieerhaltung (*Abb. 4*)?

Die Antworten hierzu führen zu *Bernoulli*: Er entdeckte die Beziehung zwischen der Fliessgeschwindigkeit eines Fluides und dessen Druck. Er fand heraus, dass in einem strömenden Fluid (Gas oder Flüssigkeit) ein Geschwindigkeitsanstieg von einem Druckabfall begleitet ist.

Die *Bernoulli-Gleichung* ist einer der wichtigsten und am häufigsten angewandten Sätze der Strömungslehre und drückt zugleich den *Energiesatz für Flüssigkeiten* aus:

$$\frac{\omega^2}{2} + U + P = C$$

In Worten:

Die Summe aus kinetischer Energie ($\frac{\omega^2}{2}$), potenzieller Energie (U) und Druckenergie (P) ergibt die Gesamtenergie (C).

C ist, spezifisch für die jeweilige Stromlinie, eine *Konstante*. Ist die Strömung wirbelfrei, so hat C für den ganzen Flüssigkeitsraum denselben Wert.

Multiplizierte man die *Bernoulli-Gleichung* mit der Dichte ρ , erhält man als Spezialfall für inkompressible homogene Flüssigkeiten ($\rho = \text{konstant}$, $P = p/\rho$) und der Schwere als alleinige äussere Kraft ($U = g \cdot z$):

$$\rho \cdot \frac{\omega^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z + p = cte$$

Die Gleichung wird auch *Bernoullische Druckgleichung* genannt. Daraus abgeleitet ergibt sich (für $z = \text{const}$) die *Bernoulli-Gleichung (I)*:

$$\rho \cdot \frac{\omega^2}{2} + p = cte$$

In Worten:

hydrodynamischer Druck + hydrostatischer Druck = Gesamtdruck

$$p_{dyn} = \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}$$

In Worten:

Ist die Fliessgeschwindigkeit gleich null, ist auch p_{dyn} gleich null.

Erweiterte Energiegleichung

Die erweiterte Bernoullische Energiegleichung steht in affiner Beziehung zu zähen Flüssigkeiten. Dabei werden die Reibungsverluste (Δp) berücksichtigt. Ein *Verlustbeiwert* ζ (Zeta) wird mit folgender Funktion berechnet:

$$\rho \cdot \frac{\omega^2}{2} + p + \Delta p = cte$$

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2} = \zeta \cdot p_{dyn}$$

In Worten:

Zeta ist ein *Proportionalitätsfaktor* zwischen dynamischem Druck und dem Druckverlust.

Diese Annahme basiert auf der empirischen Beobachtung, dass der Druckverlust in Rohrleitungen bei turbulenter Strömung mit dem Quadrat der Fliessgeschwindigkeit steigt. Die Verlustbeiwerte (Zeta-Werte) oder die Summe der Verlustbeiwerte in einem Gesamtsystem setzen sich folgendermassen zusammen:

- Einzelverluste wie Zu- und Auslaufverluste
- Einbautenverluste (z.B. Krümmer, Einengungen, Schieber)
- Verluste aus der Rohrreibung

Mit dieser Gleichung können bei Kenntnis der Verlustbeiwerte die üblichen Fragen der Bemessung von Rohrleitungssystemen mit turbulenter Strömung gelöst werden. Für die Berechnung der Energieverluste wäre zwischen Einzelverlusten und Verlusten in geraden Rohren zu unterscheiden.

Zeta-Wert

Der *Widerstandsbeiwert* ζ für durchströmte Körper ist folgendermassen definiert:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\omega^2 \cdot \rho}$$

Dabei ist Δp der Druckverlust in dem Teilstück (z. B. Ventil oder Verbinder) und ω die mittlere Geschwindigkeit in einem frei definierbaren Bezugsquerschnitt.

Der für Einzelkomponenten angegebene Widerstandsbeiwert bezieht sich in der Regel auf den Einbau einer Komponente in einen Kanal oder in ein Rohrstück und bezeichnet den zusätzlichen Druckverlust, der sich durch das Einfügen dieser Komponente ergibt.

Der Zeta-Wert ist auf eine Nachkommastelle zu runden.

Einfluss von Reduktionen und Aufweitungen

Die Angabe des Zeta-Werts ist immer nur zusammen mit der Definition des Bezugsquerschnitts sinnvoll. Zeta-Werte von hintereinander geschalteten Komponenten können addiert werden, sofern sie sich auf den gleichen Bezugsquerschnitt beziehen. Bei Reduktionen ist die Addition der Zeta-Werte vor der Rohrverengung mit denjenigen nach der Rohrverengung nicht zulässig.

Übertragen auf die Bernoulli-Gleichung vor (p_1 und ω_1) und nach (p_2 und ω_2) einer Reduktion ergeben sich folgende Verhältnisse:

$$\rho \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + p_1 = \rho \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + p_2 + \Delta p$$

Bei Reduktionen basiert der Zeta-Wert auf dem Austrittsdurchmesser. In der Gleichung wird die *Austrittsgeschwindigkeit* verwendet, weil bei der Rohrweitenbestimmung die jeweilige Teilstrecke immer mit dem Formstück beginnt:

$$\zeta_2 = \frac{2 \cdot \Delta p}{\omega_2^2 \cdot \rho}$$

Wird Δp aus der Bernoulli-Gleichung in die ζ_2 -Gleichung eingesetzt, erhält man:

$$\zeta_2 = \frac{2}{\omega_2^2 \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2) + p_1 - p_2 \right)$$

$$\zeta_2 = \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\omega_2^2 \cdot \rho} + \left(\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2} \right)$$

$$\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\omega_2^2 \cdot \rho} = \zeta_2 - \left(\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_2^2} \right) = \zeta_{2 \text{ Dyn}}$$

In der *Praxis* wird Zeta wie folgt gemessen:

$$\zeta = \frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\omega_2^2 \cdot \rho}$$

Diese Werte entsprechen den gemessenen Zeta-Werten $\zeta_{2 \text{ Dyn}}$. Somit sind die publizierten Zeta-Werte dynamischen Charakters und sollen deshalb ohne Korrekturfaktoren für die Berechnung von Druckveränderungen in der Anlage ($p_1 - p_2$) herangezogen werden. Δp hingegen berücksichtigt keinen Reduktionseffekt. Nur wenn $\omega_1 = \omega_2$, dann ist $\Delta p = (p_1 - p_2)$. Diese Argumentation gilt auch bei T-Stücken mit Stromteilung $\omega_1 \neq \omega_2$. Der austretende Teilvolumenstrom ist ungleich dem Eingangsvolumenstrom. Deshalb ist die Fliessgeschwindigkeit in T-Stücken auch bei konstantem Durchmesser nicht gleich.

Wichtig ist vor allem der *Austrittsdurchmesser*. Die Ausgangsgrösse gilt als Referenz für die Ableitung der Austrittsflussgeschwindigkeit $\omega_2 = V/A_2$ ab gemessenem Volumenstrom.

Die Hersteller von Fittings sollten daher Zeta-Werte angeben, die auf dem Austrittsdurchmesser basieren. Auf diese Weise können die Druckverluste für die Dimensionierung einer Anlage korrekt berechnet werden.

Quadratische Natur der Abhängigkeit zwischen Δp und ω

Bei kleiner Geschwindigkeit, meist mit einer Reynoldszahl < 10000 , ist die Strömung *laminar*, somit wären die Zeta-Werte nicht exakt. Aus der *Abbildung 5* ist eine gute Korrelation zur parabelförmigen Kurve ab 1 m/s herauszulesen. In diesem Fall ist die Reynoldszahl > 10000 und die Strömung somit *turbulent*. Für die Praxis ist diese Ungenauigkeit nicht sehr relevant, da im Normalfall die Fliessgeschwindigkeiten gross genug sind. Die Verwendung von Zeta-Werten führen bei kleinen Reynoldszahlen zu leicht geringeren Druckverlusten, als diese in der Praxis gemessen werden.

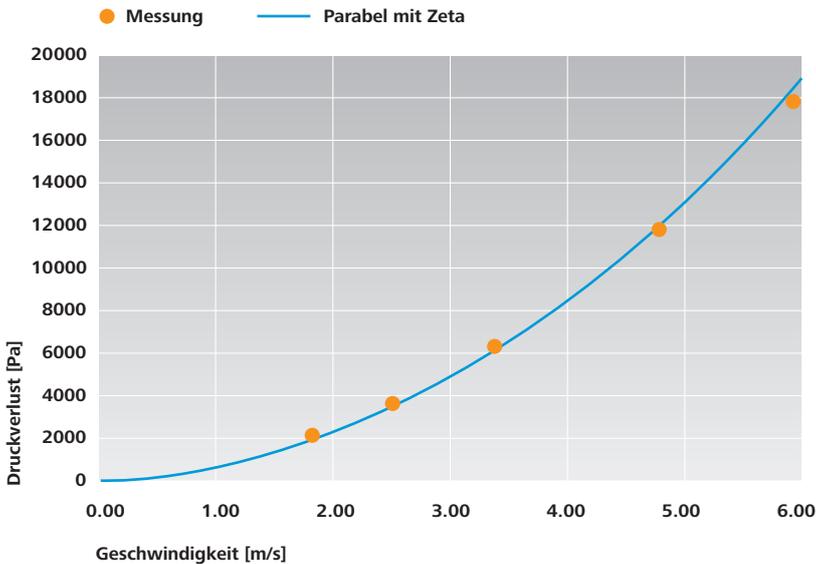


Abb. 5 Volumenstrom und korrespondierende Druckverluste.

Bei Druckverlustberechnungen in Teilstrecken mit geringer Geschwindigkeit müssten eigentlich höhere Zeta-Werte berücksichtigt werden. Der Einfachheit halber wird jedoch darauf verzichtet und mit konstanten Zeta-Werten gerechnet. Folglich fällt der berechnete Druckverlust in Teilstrecken mit geringer Geschwindigkeit tiefer aus als bei Nachmessungen in der Praxis. Weil in Teilstrecken mit geringer Geschwindigkeit die Druckverluste generell tiefer liegen, können die Differenzen vernachlässigt werden. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass der Planer sich aus Hygienegründen eher an den maximalen Geschwindigkeiten von 2 m/s bzw. 4 m/s orientiert, wie sie in den SVGW-Leitsätzen W3 [1] definiert sind.

3 Ermittlung von Zeta-Werten

Druckverlustmessung

Mit dem Differenzdrucksensor kann die Differenz zweier Absolutdrücke, der sogenannte *Differenzdruck*, gemessen werden. Das Messinstrument besteht aus *zwei Kammern*, die durch eine Membran hermetisch voneinander getrennt sind. Die Auslenkung der Membran gilt als Mass für die Grösse des Differenzdruckes. Die Subtraktion von zwei Absolutmessungen einzelner Drücke wäre zu ungenau. Sodann ist der Einfluss bei unterschiedlicher Höhe der Mess-Sensoren in Rechnung zu stellen. Deshalb ist wichtig, dass beide *Druckmess-Schellen* auf gleicher Höhe ange-

bracht sind, da sonst die relative Höhe berücksichtigt werden müsste (geostatische Energie).

Druckmess-Schelle

Um die Geschwindigkeitseinflüsse zu beseitigen, ist in der Mess-Schelle ein *Ringspalt* ausgespart. Im Spalt herrschen stationäre Bedingungen, wodurch die Messung des Gesamtdrucks möglich ist. Um Höheneinflüsse zu eliminieren, hat der Innendurchmesser des Messspalts exakt dem Innendurchmesser des Referenz-Durchmessers zu entsprechen (ID des Rohres).

	Variante 1	Variante 2
0	0,0	0,0
6	2,0	1,0
12	4,0	3,0
18	6,5	5,0
24	9,5	8,0
60	45,5	44,0
120	156,0	154,0

Tab. 1 Messergebnisse unterschiedlicher Varianten von Messanschlüssen für die Druckabnahme.

In der *Armaturennorm* SN/EN1267 [2] ist eine Messmethode für die Bestimmung der Zeta-Werte beschrieben. Sie wurde in der Vergangenheit kaum für die Druckverlustmessung von Fittings herangezogen, weshalb unterschiedliche Zeta-Werte resultierten. Messmethodisch handelt es sich um eine Differenzdruckmessung mit Messumformer für den Differenzdruck und selbstüberwachender Keramikmesszelle. Die Messunsicherheit ist besser als 0,1% der maximalen Messspanne ($\pm 0,5$ mbar).

Es gibt zwei Varianten von *Messanschlüssen* für die Druckabnahme. Die Prototypen sind für Rohre in der Dimension 22 ausgelegt worden (Abb. 6, Tab. 1).

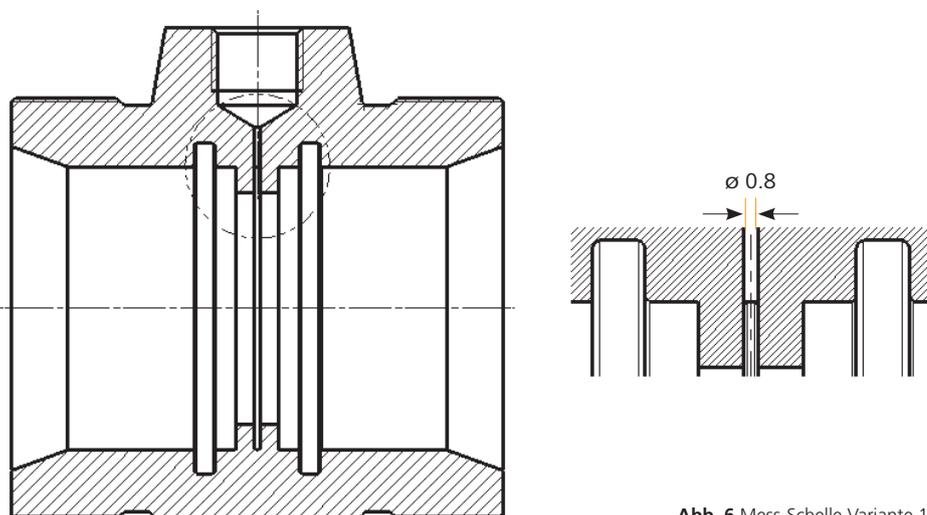


Abb. 6 Mess-Schelle Variante 1.

– Variante 1

Druckabnahme im Gehäuse über einen Anschluss an den Ringspalt.

– Variante 2

Druckabnahme über vier Bohrungen, die miteinander verbunden sind.

Die Messungen erfolgen mit 4 bar Eingangsdruck.

Die Messergebnisse zeigen, dass beide Mess-Schellen ähnliche Resultate liefern (Tab. 1). Auf Grund der einfachen Konfiguration wurde Variante 1 gewählt. Details können der Skizze (Abb. 6) entnommen werden.

Rohrwiderstand und Beruhigungsstrecke

Die Mess-Strecke für die Bestimmung des Rohrwiderstandes beträgt 1 m (Referenzgrösse). Bei einer Prüfkörpermessung (Fittings, Armaturen usw.) müssen die ermittelten Druckverlustwerte des Rohres abgezogen werden (Abb. 7). Bei der Bestimmung von Einzelwiderständen ist der Einfluss der Beruhigungsstrecke vor und nach der Mess-Strecke von grosser Bedeutung. Für die Messung sollen die Einlauf- und Auslaufstrecken mindestens das Zehnfache des Innendurchmessers des Rohres ($10 \times d_i$) betragen.



Abb. 7 Mess-Strecke für die Bestimmung des Rohrwiderstandes.

Einzelwiderstände

Die Druckmessungen werden gleichzeitig im Verbindungsstück und im dazugehörigen Prüfrohr durchgeführt (Abb. 8). Im Fall von Reduktionen müssen unterschiedliche Rohrdurchmesser bei der Berechnung der Druckverluste berücksichtigt werden.

Bei T-Stücken in der Stellung Verteilung werden sehr hohe Zeta-Werte ermittelt. Sie rühren daher, weil die Annahme getroffen wird, dass sich der Durchfluss in zwei identische Teilströme von je 50% aufteilt. Unter diesen und nur unter diesen Bedingungen stimmen die errechneten Werte mit den tatsächlichen Verhältnissen überein. Fliesst zum Beispiel alles Wasser in die gleiche Richtung, muss bei der Druckverlustberechnung eine nachträgliche Korrektur der Zeta-Werte vorgenommen werden, wie sie im Labor ermittelt wurden. Wie sich die Teilströme in der Praxis am Ende aufteilen, kann nicht vorausgesagt werden. T-Formstücke sind in Stellung Durchgang, Abgang und Verteilung deshalb immer bei 100% Volumenstrom zu messen.

Bei Anschlusswinkeln ist der Innendurchmesser d_i am Ausgang entscheidend. Mit d_i Eingang = d_i Ausgang ergeben sich keine Reduktionseffekte (Abb. 9).



Abb. 8 Druckmessungen werden gleichzeitig im Verbindungsstück und im dazugehörigen prüfrohr durchgeführt.

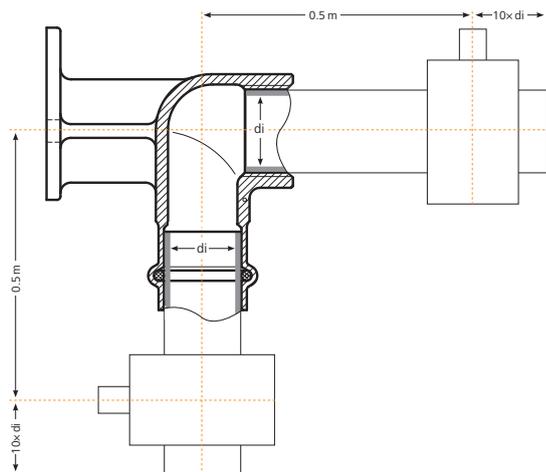


Abb. 9 Bei Anschlusswinkeln ist der Innendurchmesser d_i am Ausgang entscheidend.

In der Tabelle 2 sind als Beispiel die Abweichungen zur Interpolation bei einem T-Stück in Stellung Verteilung aufgeführt. Basierend auf den Messwerten können Volumenstrom und korrespondierende Druckverluste dargestellt werden. Die quadratische Natur der Abhängigkeit ist (Abb. 5) sichtbar. Messpunkte repräsentieren gängige Belastungswerte für Trinkwasserinstallationen.

Messwert Druckverlust versus Volumenstrom

Gemessen wird der Druckverlust in Funktion des Volumenstroms. Die Fließgeschwindigkeit kann unter Berücksichtigung des Querschnitts (Innendurchmesser am Rohrausgang) abgeleitet werden.



«c» kann mit dem Zeta-Wert in Verbindung gebracht werden:

$$\zeta = \frac{2 \cdot c}{\rho} \quad \zeta = \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}$$

Anders verhält es sich bei der Bestimmung der einzelnen Zeta-Werte pro Fließgeschwindigkeit und der anschließenden Bildung eines Mittelwerts:

$$\zeta = \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}$$

Vergleich von Mittelwert und einzelnen Zeta-Werten

Fallbeispiel mit Inox-Pressverbinder DN 20. Parabel-Koeffizient $c = 259,5$ (Tab. 2).

Mit dem Parabel-Koeffizienten c trifft man den bestmöglichen Wert, explizit mit einem Messwert bei einer Fließgeschwindigkeit ω von 2 m/s.

Berücksichtigung der Messstrecke

Falls Eingangsdurchmesser und Ausgangsdurchmesser identisch sind, kann der Zeta-Wert des Rohrstücks abgezogen werden. Bei unterschiedlichen Durchmessern (Reduktionen) können die Zeta-Werte

In der bilogarithmischen Darstellungsform (Abb. 10) ist der Zeta-Wert direkt sichtbar. Je höher die interpolierte Linie, desto höher ist der Zeta-Wert:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \frac{\omega^2}{2}$$

Parabel-Koeffizient $\Delta p = c \cdot \omega^2$

Somit ist der Zeta-Wert definiert:

$$\zeta = \frac{2 \cdot c}{\rho}$$

Die Bestimmung von c erfolgt bei einer Minimierung des Abstands zwischen der interpolierten Parabel und dem Messpunkt. Diese Minimierung erfolgt, wenn

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{n} = c \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}{n}$$

das heisst:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}$$

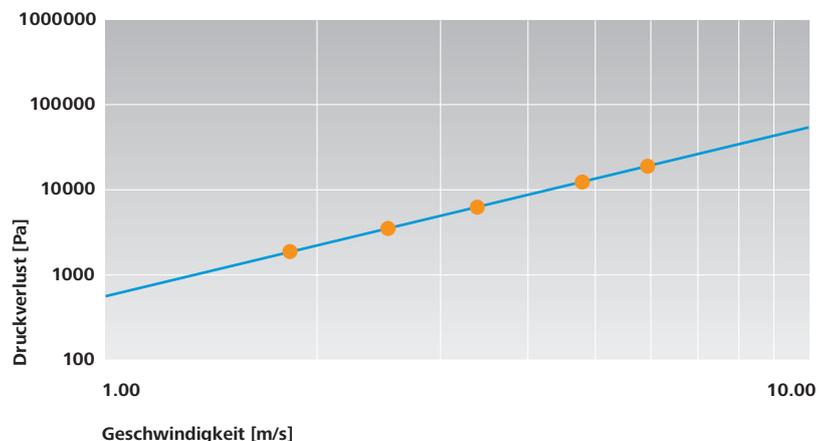


Abb. 10 Bilogarithmische Darstellungsform.

V l/min	ω m/s	p [pa]	ζ pro Fließgeschwindigkeit	Abweichung zur Interpolation	
				$\zeta = 0,52$ aus parabel-koeffizient c	$\zeta = 0,60$ (ζ -Mittelwert)
15,0	0,82	300	0,90	-127,22	-99,38
30,6	1,66	800	0,57	-80,95	34,89
40,4	2,20	1300	0,53	-46,63	155,29
50,2	2,73	1900	0,51	35,19	346,95
67,7	3,68	3300	0,48	219,61	786,61
			Mittelwert = 0,60		
			Summe der Abweichungen	0,00	1224,35

Tab. 2 t-Stück in der Stellung Verteilung.

Dim. Inox Eingang	Verteiler-Grösse	Abgangsdimension, Verteileranschluss	Zeta beim ersten Abgang	Zeta beim fünften Abgang
28	DN 25	pex-16, mit Stützkörper	4,5	4,5
		pex-16, ohne Stützkörper	1,2	1,2
		pex-20, mit Stützkörper	2,2	2,8
		pex-20, ohne Stützkörper	1,4	1,3
22	DN 20	pex-16, mit Stützkörper	4,5	4,5
		pex-16, ohne Stützkörper	0,6	0,6
		pex-20, mit Stützkörper	3,0	2,8
		pex-20, ohne Stützkörper	1,4	1,2

Tab. 3 Fallbeispiel Verteiler.

nicht einfach addiert werden. Die Druckverluste der Mess-Strecke vor und nach dem Prüfstück müssen ermittelt und entsprechend abgezogen werden.

Fallbeispiel eines Verteilers

Im Fallbeispiel eines Verteilers (Tab. 3) befindet sich die Reduktion am Übergang zwischen Edelstahl- und PEX-Rohren (Leitung). Die ermittelten Zeta-Werte bestätigen, dass die Abgangsposition eine untergeordnete Rolle spielt. Die Unterschiede zwischen Verbinder mit Stützkörpern und ohne Stützkörper sind jedoch enorm.

Äquivalente Rohrlänge

Die äquivalente Rohrlänge ist das Verhältnis zwischen dem Druckverlust eines Formstückes oder einer Armatur und dem Druckverlust eines ein Meter langen Rohres. Bei einem zunehmenden Durchfluss nimmt der Druckverlust im Rohr und Formstück zu. Deshalb bleibt das Verhältnis unverändert:

$$\text{äquivalente Rohrlänge} = \Delta p \text{ Formstück} / \Delta p \text{ 1 m Rohr}$$

Die äquivalente Rohrlänge eines Formstückes kann auch durch die Bildung des Verhältnisses zwischen

dem Zeta-Wert des Formstückes und dem Zeta-Wert eines ein Meter langen Rohres berechnet werden:

$$\text{äquivalente Rohrlänge} = \zeta \text{ Formstück} / \zeta \text{ 1 m Rohr}$$

Der Gesamtdruckverlust in einer Teilstrecke ist das Ergebnis aus Gesamtlänge der Teilstrecke addiert mit der Summe aller äquivalenten Rohrlängen (Formstücke und Armaturen) sowie multipliziert mit dem Druckverlust pro Meter, welcher unter Berücksichtigung des entsprechenden Durchflusses dem Druckverlustdiagramm entnommen werden kann.

Es muss beachtet werden, dass die Addition von äquivalenten Rohrlängen nur möglich ist, wenn die Rohrquerschnitte gleich sind. Bei Reduktionen können nur die Druckverluste addiert werden. Diese werden pro Teilstrecke mittels Zeta-Werten berechnet.

Tabelle 4 zeigt die äquivalente Rohrlänge; in Tabelle 5 sind die dazugehörigen Zeta-Werte aufgeführt.

4 Praxisbeispiel

Dimensionierung mit Zeta-Werten

Mit Zeta-Werten kann die gesamte Installation gerechnet und verifiziert werden. In einer Versuchsanordnung, die der Realität in der Praxis entspricht (Abb. 11), soll nachgeprüft werden, ob die aus Druckverlustberechnungen resultierenden Werte (Herstellerangaben) mit den tatsächlich gemessenen Werten (Abb. 12) übereinstimmen. Und zwar sowohl für ein

Äquivalente Rohrlänge	Übergang 20 3/4"	Bogen 20	T-Stück 20/16/20	T-Stück 20/16/16	T-Stück 16/16/16	Bogen 16	Anschluss-Winkel 16
mit Stützkörper mit kanten	0,8 m	4,7 m	1,3 m	1,9 m	2,3 m	6,7 m	2,8 m
ohne Stützkörper ohne kanten	~ 0 m	0,3 m	0,2 m	0,4 m	0,2 m	0,3 m	0,7 m

Tab. 4 Äquivalente Rohrlängen.

Zeta-Werte	Übergang 20 3/4"	Bogen 20	T-Stück 20/16/20	T-Stück 20/16/16	T-Stück 16/16/16	Bogen 16	Anschluss-Winkel 16
Zeta-Verbinder mit Stützkörper mit kanten	1,2	7,5	2,1	3,9	4,5	13,4	5,5
Zeta-Verbinder ohne Stützkörper ohne kanten	0,1	0,5	0,3	0,8	0,4	0,6	1,4
anschluss BW gemäss W3	-	-	WC 1 BW	Waschtisch 1 BW	Waschtisch 1 BW	-	Badewanne 4 BW
BW pro teilstrecke Volumenstrom gemäss Gleichzeitigkeit W3	7 0,48 [l/s]		6 0,46 [l/s]		5 0,43 [l/s]	4 0,4 [l/s]	

Tab. 5 Zeta-Werte gemäss Herstellerangaben zu äquivalenten Rohrlängen (Tab. 4).

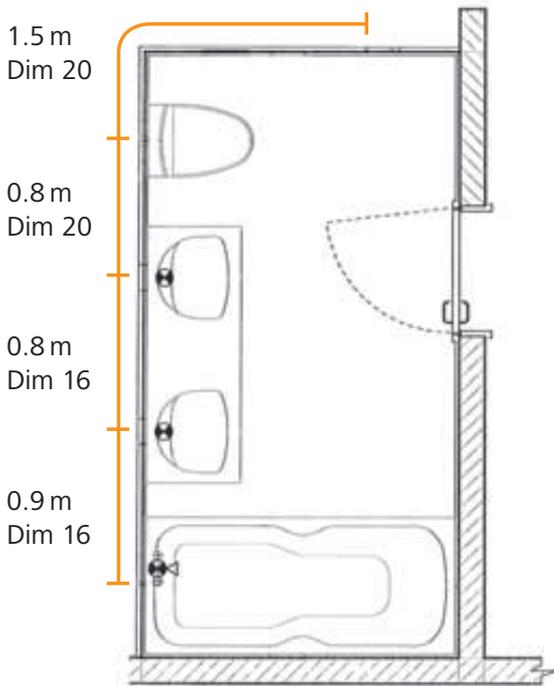


Abb. 11 Schema installation einer Nasszelle.

Einzelzapfstellensystem als auch für eine T-Stück-Installation.

Einzelzapfstellensystem

Eine Anlage ist konform zur geltenden *Richtlinie W3* dimensioniert worden. Neben WC, zwei Waschtischen wird eine Badewanne mit 4 BW (Belastungswert) angeschlossen. Gemäss Tabelle 4b der SVGW-Richtlinien W3 beträgt die empfohlene Rohrlänge 4 m.

Die Zeta-Werte gemäss Herstellerangaben sind in *Tabelle 6* aufgeführt. Der Zeta-Wert für ein Rohr der Länge 1 m / Dimension 16 ist 2,0. Im Beispiel wurden 4 m Rohr verlegt. Somit beträgt der Zeta-Wert 8,0.

Ob manuell oder mit der Software *www.fhf.ch* ausgeführt, die Druckverlustberechnung für den gemäss W3 geforderten Volumenstrom von 4 BW (24 l/min/Badewanne) sind identisch mit den gemessenen Werten (*Tab. 7*). Je nach Veränderung des Vorderdrucks (p_1) variiert der Volumenstrom, dementsprechend ergibt sich ein Druckverlust (*Abb. 13*). Daraus kann gefolgert werden, dass eine Dimensionierung gemäss W3 mit strömungsgünstigen Systemen (Verbinder ohne Stützkörper und ohne Kanten) zielführend ist. Ein Druckverlust unter den geforderten 1 bar kann problemlos erreicht werden. Die Korrelation zwischen berechneten (gemäss Herstellerangaben) und gemessenen Werten ist exakt. Der maximale Volumenstrom variiert je nach Sys-

Abb. 12 Druckmesssensor: Gemessen werden Volumenstrom und temperatur.

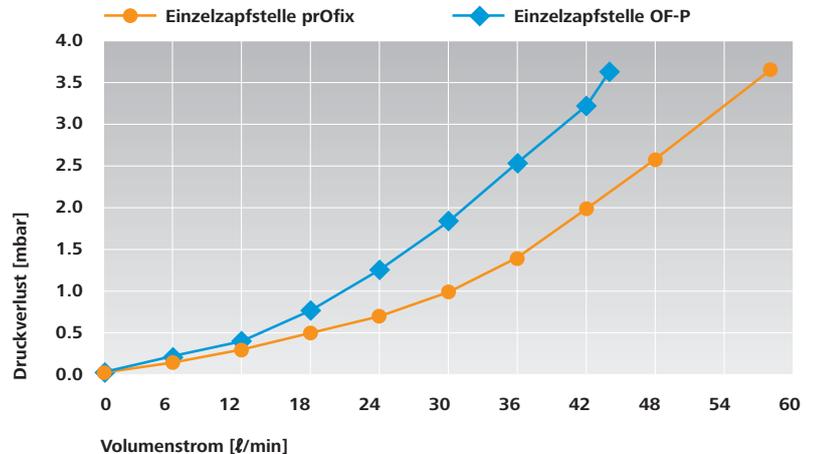
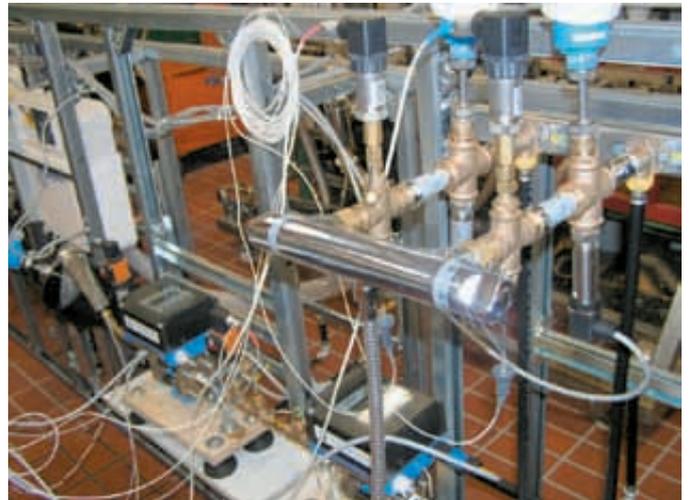


Abb. 13 Verhältnis Druckverlust zu Volumenstrom im einzelzapfstellensystem.

Verbindertyp	Verteiler inkl. Anschluss	Anschluss-Dose
mit Stützkörper	4,5	5,6
ohne Stützkörper	1,0	1,4

Tab. 6 Zeta-Werte gemäss Herstellerangaben.

Fittingtyp	Mit Zeta-Werten berechnet	Gemessen	
	Druckverlust bei 4 BW	Druckverlust bei 4 BW	Max. mögl. Volumenstrom, bei 4 bar Vordruck ohne Drosselung
mit Stützkörper ohne kanten	1,3	1,3	44 l/min
ohne Stützkörper ohne kanten	0,7	0,7	58 l/min

Tab. 7 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Zeta-Werten des einzelzapfstellensystems.

tem stark. Er beeinflusst Funktionalität und Komfort einer Anlage massgeblich.

T-Stück-Installation

Eine T-Stück-Installation ist nach W3 dimensioniert worden. Die Ausgangslage ist analog zu derjenigen mit Einzelzapfstellensystem. Wegen des Totals der Belastungswerte muss die erste Strecke mit einem

Rohr der Dimension 20 ausgelegt werden. Gemäss Tabelle W3-2d können maximal 5 BW angeschlossen werden. Darüber hinaus und bis 8 BW ist Dimension 20 vorgeschrieben.

Die Zeta-Werte gemäss Herstellerangaben sind in Tabelle 5 aufgeführt. Zeta-Wert für ein Rohr der Länge 1 m/Dimension 16 ist 2,0; Zeta-Wert für ein Rohr der Länge

1 m/Dimension 20 ist 1,6. Im Beispiel wurden 0,8 m + 0,9 m Rohr/Dimension 16 und 1,5 m + 0,8 m Rohr/Dimension 20 verlegt.

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, sind unter Berücksichtigung des gemäss W3 geforderten Volumenstroms von 4 BW (24 l/min/Badewanne) die berechneten und gemessenen Zeta-Werte nahezu identisch. Aufschlussreich ist die Erkenntnis in Bezug auf den maximalen Volumenstrom, kann doch mit strömungsoptimierten Fittings fast die doppelte Menge Wasser gezapft werden als mit Fittings mit Stützkörpern und Kanten. Das Verhältnis von Druckverlust zu Volumenstrom in der T-Stück-Installation kann der Abbildung 14 entnommen werden. Je nach Veränderung des Vorderdrucks (p₁) variiert der Volumenstrom, dementsprechend ergibt sich ein Druckverlust.

Für die T-Stück-Installation lassen sich analoge Schlussfolgerungen wie beim Einzelzapfstellensystem ziehen. Auch bezüglich Korrelation und Komfort. Die Dimensionierung gemäss W3 ist mit strömungsgünstigen Systemen (Verbinder ohne Stützkörper und ohne Kanten) zielführend, und ein Druckverlust, der kleiner ist als die geforderten 1 bar, kann problemlos erreicht werden. Bei Verbindern mit Stützkörpern und/oder Kanten ist dieser Wert bei weitem nicht erreichbar.

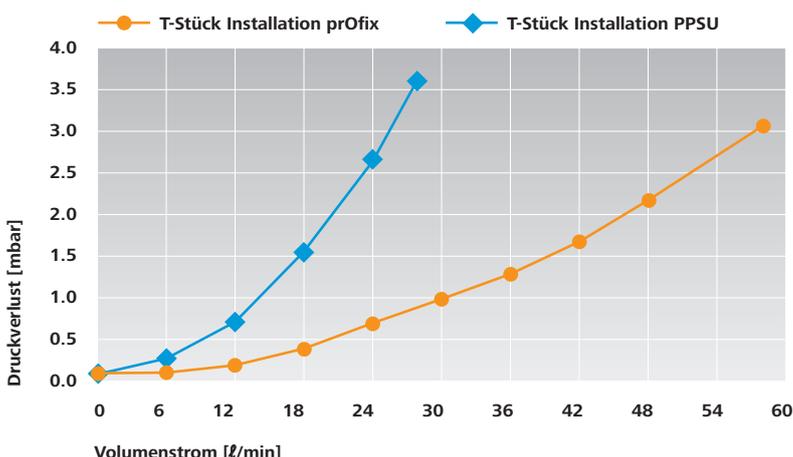


Abb. 14 Verhältnis Druckverlust zu Volumenstrom in der t-Stück-Installation.

Fittingtyp	Mit Zeta-Werten berechnet		Gemessen
	Druckverlust bei 4 BW	Druckverlust bei 4 BW	Max. mögl. Volumenstrom, bei 4 bar Vordruck ohne Drosselung
mit Stützkörper ohne kanten	2,9	2,7	28 l/min
ohne Stützkörper ohne kanten	0,7	0,7	61 l/min

Tab. 8 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Zeta-Werten der t-Stück-Installation.

Fittingtyp	A	B, C und D
Installation		
Keller, Steigeleitung, T-Stück-Installation	Dimensionierung mit W3	r rechnen mittels Zeta-Wert
Einzelzapfstelle	Dimensionierung mit W3	Dimensionierung mit W3 äquivalente r ohrlänge der Verbinder mitberücksichtigen!

Tab. 9 Entscheidungshilfe für die Dimensionierung von Hausinstallationen.

5 Schlussfolgerung

Verursacht durch unterschiedliche Fittingkonstruktionen können in Trinkwasser-Verteilssystemen übermässige Druckverluste auftreten, die zu Druck- und Temperaturschwankungen führen. Die Dimensionierung erfolgt grundsätzlich nach den aktuellen SVGW-Richtlinien W3 [1] und dem SVGW-Zirkular 2009/14d [3].

Mit dem Zirkular 2009/14d hat der SVGW die Dimensionierungsgrundlagen für die Auslegung von Trinkwasser-Verteilssystemen präzisiert. Neu spielt die Fittingkonstruktion eine wesentliche Rolle (Abb. 15). Zur rechtlichen Verbindlichkeit informierte die suissetec-info 1/09 [4]. Wie die Empfehlungen des SVGW einfach und konsistent in die Praxis umgesetzt werden können, geht aus der Publikation «Umsetzung des SVGW-Zirkulars 2009/14d in die Praxis» hervor [5].

Mit druckverlustoptimierten Trinkwasser-Verteilssystemen sind Druckverluste kein Thema. Die Fittings in solchen Systemen sind frei von inneren Kanten und Stützkörpern. Pressver-

Konstruktionstypen (Druck bei 24 Liter/Min.)

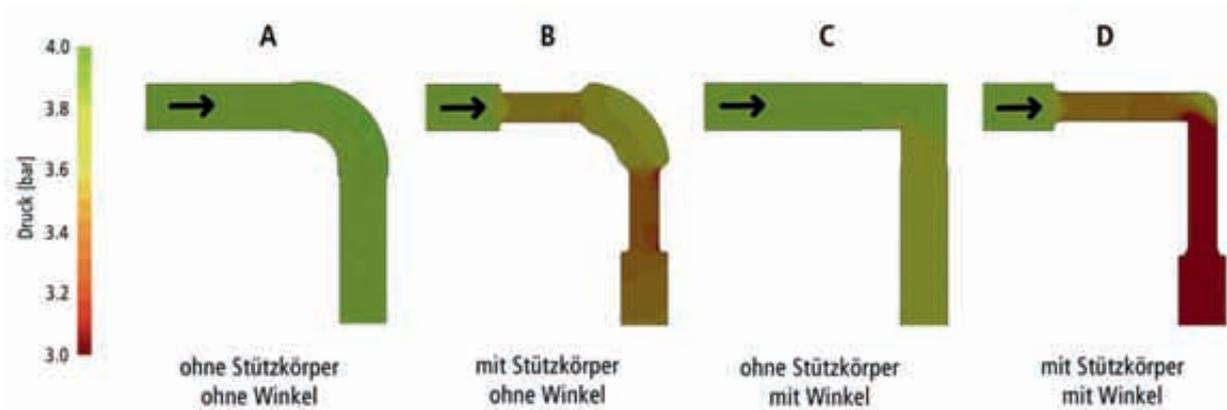


Abb. 15 unterschiedliche Fittingkonstruktionen in trinkwasserverteilsystemen.

binder für Edelstahlrohre können dafür als Beispiel angeführt werden. Neuerdings gibt es auch für PEX-Rohre Fittings ohne Stützkörper und Kanten (Tab. 9).

In der Trinkwasser-Installation kommen Form- und Verbindungsstücke aus verschiedenen Materialien und unterschiedlicher Geometrie im Inneren zur Anwendung. Diese können gegenüber dem Innendurchmesser des Rohres einen stark eingeschnürten Querschnitt aufweisen. Die durch Einzelwiderstände verursachten Druckverluste haben Einfluss auf die Dimensionierung der Leitungsnetze. Strömungsgünstige Bauteile ermöglichen kleinere Dimensionen und tragen zu einer wirtschaftlichen und hygienischen Installation bei.

Deshalb ist die korrekte Ermittlung der Zeta-Werte von zentraler Bedeutung. In diesem Fachbeitrag wurde Schritt für Schritt gezeigt, wie eine Messung durchgeführt werden soll. Die korrekt ermittelten Werte ermöglichen eine exakte Berechnung des Druckverlusts in der gesamten Anlage. Besonders wichtig ist eine korrekte Handhabung des Referenzdurchmessers, insbesondere bei Reduktionen. Gemäss SVGW-Zirkular 2008/17d [6] sollen die Hersteller eine Druckverlustmessung und Zeta-Wert-Bestimmung gemäss der Norm SN

EN 1267 durchführen und die korrekten Zeta-Werte messen und veröffentlichen. Damit ist garantiert, dass bei einwandfreier Planung die Anlagen dauernd und uneingeschränkt funktionieren.

In Deutschland wird im Rahmen der neuen DIN 1988-300 und des DVGW-Arbeitsblattes W 534 eine Methodik für die Ermittlung von Zeta-Werten festgelegt, um eine einheitliche Prüfgrundlage für unterschiedliche Verbindungstechniken zu schaffen.

In der Schweiz werden gegenwärtig die Richtlinien W3 aktualisiert. Die Arbeiten werden nicht vor Ende 2010 abgeschlossen sein. Welche Auswirkungen sie haben, muss sich erst noch zeigen. Bis es soweit ist, können auf der Grundlage dieses Beitrags die Zeta-Werte korrekt ermittelt werden. Die richtige Dimensionierung von Trinkwasser-Installationssystemen erfolgt grundsätzlich nach den aktuellen SVGW-Leitsätzen W3 und dem SVGW-Zirkular 2009/14d.

Literaturverzeichnis

- [1] SVGW: W3, Zürich
- [2] Schweizerische Normen-Vereinigung: SN/EN 1267, Armaturen-Messung des Strömungswiderstandes mit Wasser als Prüfmedium.
- [3] SVGW (2009): Zirkular 2009/14d, Zürich.
- [4] suissetec (2009): info 1/09, Zürich.
- [5] Haag, J. (2009): Umsetzung des SVGW-Zirkulars 2009/14d in die Praxis, «Sanitär+Installateur».
- [6] SVGW (2008): Zirkular 2008/17d, Zürich.
- [7] Meschede, D.: Gerthsen Physik, Springer, Berlin.

Keywords

trinkwasser-installationen – Zeta-Wert – Druckverlust – Dimensionierung

Autor

patrik Zeiter, dipl. ing. et H/Sia
 leiter Grundlagen, Werkstoffe,
 Schutzrechte
 r. Nussbaum a G
 Martin-Disteli-Strasse 26
 CH-4601 Olten
 tel. +41 (0)62 286 81 11
 patrik.zeiter@nussbaum.ch