

## Basiswissen

## Strömung in Rohrleitungen und Armaturen

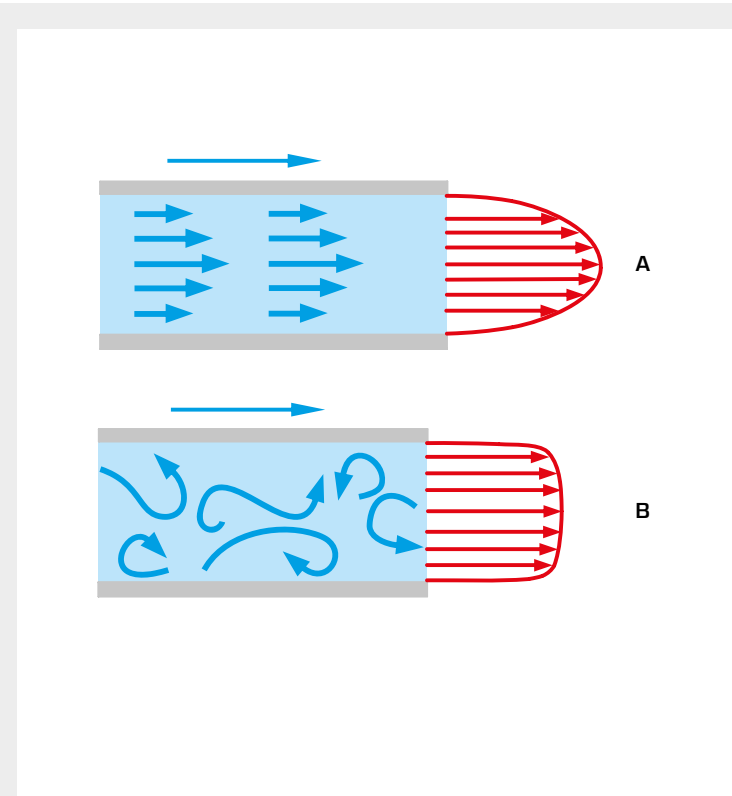
Rohrleitungssysteme dienen im Allgemeinen dem Transport von Fluiden. Beim Durchströmen einer Rohrleitung nimmt infolge von Reibung die Druckenergie des Fluids ab und die innere Energie des Fluids nimmt zu. Die Abnahme der inneren Energie wird allgemein als Strömungsverlust bezeichnet, der sich als Druckverlust im Fluid bemerkbar macht.

Bei den auftretenden Verlusten wird zwischen der inneren Reibung im Fluid und der Reibung zwischen Fluid und Wand bzw. Widerstand unterschieden.

Im Zusammenhang mit den Verlusten werden folgende allgemeine Begriffe der Strömungsmechanik diskutiert:

- laminare und turbulente Strömung
- Rohrreibung durch unterschiedliche Materialien und Oberflächen
- Druckverluste in Rohrleitungen und Formstücken
- Druckverlust in Ventilen und Armaturen

## Laminare und turbulente Strömung in Rohrleitungen



Bei einer laminaren Strömung **A** in Rohrleitungen bewegen sich Fluidteilchen parallel in Schichten, ohne sich miteinander zu vermischen. Die Geschwindigkeitsverteilung des Fluids im Rohr ist ungleichmäßig. In der Randzone wird das Fluid infolge der Rohrreibung abgebremst und bewegt sich langsamer als in der Rohrmitte. Der Druckverlust ist proportional zur mittleren Fluidgeschwindigkeit. In der Praxis ist eine voll ausgeprägte laminare Strömung selten anzutreffen.

Bei turbulenter Strömung **B** verwirbeln die einzelnen Fluidschichten und tauschen Energie aus. Die sich bildende Strömungsform ist durch dreidimensionale, unberechenbare und instationäre Bewegungen der Fluidteilchen geprägt. Nur im Randbereich des Rohres bleibt teilweise eine laminar ausgeprägte Grenzschicht bestehen. Die Geschwindigkeitsverteilung ist über weite Bereiche des Rohrquerschnitts nahezu konstant. Anders als bei der laminaren Strömung, ist der Druckverlust proportional zum Quadrat der mittleren Fluidgeschwindigkeit.

In durchströmten Rohren lässt sich die Reynoldszahl **Re** aus dem Innendurchmesser des Rohres **d**, der mittleren Fluidgeschwindigkeit **v** und der kinematischen Viskosität **ν** errechnen.

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

turbulente Strömung  $Re \geq 2300$

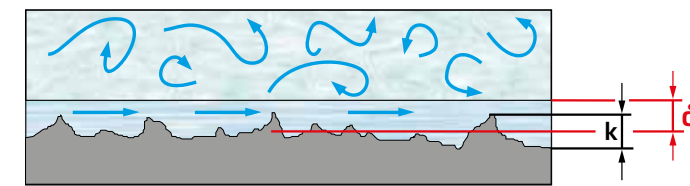
Die Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung kann mit Hilfe der Reynoldszahl **Re** ermittelt werden. Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Kennzahl. Bis zu einer Reynoldszahl von etwa 2300 spricht man von laminarer Strömung. Ab einer Reynoldszahl von 2300 spricht man von turbulenter Strömung. Strömungen gleicher Reynoldszahl sind in ihrem Verhalten vergleichbar.

## Rohrreibung an verschiedenen Materialien und Oberflächen

In der Praxis sind die Flächen von Rohrwänden immer mit einer gewissen Rauigkeit behaftet. Die Oberflächenrauigkeit entsteht zum einen beim Produktionsprozess und zum anderen durch betriebsbedingte Ablagerungen bzw. Korrosion. Das Material des Rohres hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Rauigkeit.

Bei laminarer Strömung hat die Rauigkeit des Rohres einen sehr geringen Einfluss auf den Druckverlust, weil die Fluide im Bereich der Randschicht sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten besitzen oder teilweise nicht bewegt werden.

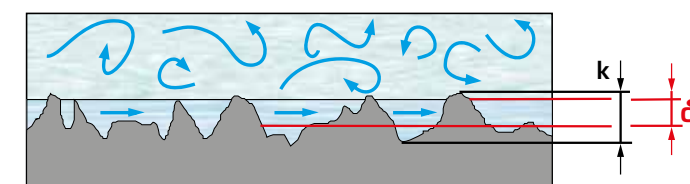
Bei turbulenter Strömung hingegen ist entscheidend, ob die Dicke  $\delta$  der laminaren Grenzschicht über die Unebenheiten der Rohroberfläche **k** hinaus ragt und diese verdeckt. In diesem Fall spricht man von **hydraulisch glatten Rohren** und die Rauigkeit hat keinen Einfluss auf den Druckverlust. Wenn die Rauigkeiten der Rohroberfläche weit über die laminare Grenzschicht hinaus ragen, geht der gleitende Effekt der Grenzschicht verloren. In diesem Fall ist von **hydraulisch rauen Rohren** die Rede und die Rauigkeit hat einen starken Einfluss auf den Druckverlust.



$\delta$  Dicke der laminaren Grenzschicht  
**k** Höhe der Unebenheiten

## Hydraulisch glatte Rohre

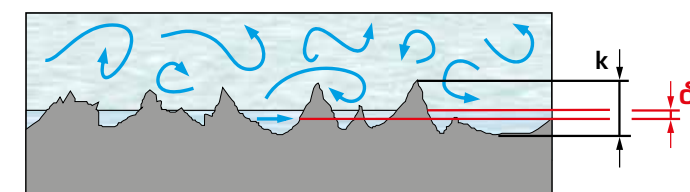
Die laminare Grenzschicht ist stark genug ausgeprägt, um die Unebenheiten der Rohroberfläche zu verdecken. Die turbulente Rohrströmung kann ungehindert fließen.



$\delta$  Dicke der laminaren Grenzschicht  
**k** Dicke der laminaren Grenzschicht

## Rohre im Übergangsbereich

Je nach Strömungszustand und der Rohrbeschaffenheit, treten in der Praxis Mischformen auf. Wenn die laminare Grenzschicht zwar deutlich ausgeprägt ist, die Unebenheiten aber nicht vollständig verdeckt, spricht von Rohren im Übergangsbereich.



$\delta$  Dicke der laminaren Grenzschicht  
**k** Dicke der laminaren Grenzschicht

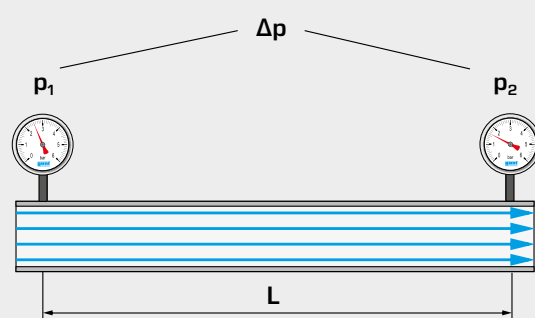
## Hydraulisch raue Rohre

Die laminare Grenzschicht ist ungenügend ausgeprägt, um die Unebenheiten der Rohroberfläche zu verdecken.

# Basiswissen Strömung in Rohrleitungen und Armaturen

## Druckverlust in Rohrleitungen, Rohrformstücken und Armaturen

### Druckverlust im geraden Rohrleitungselement

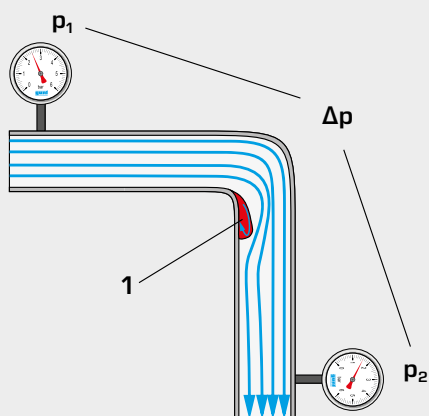


p Druck, Δp Druckdifferenz, L Rohrlänge

Rohrleitungssysteme werden aus verschiedenen Rohrleitungselementen mit jeweils spezifischen Eigenschaften zusammengesetzt. Bei der Bestimmung der Strömungsverluste wird zwischen den reinen Reibungsverlusten in geraden Rohrleitungselementen und den zusätzlichen Verlusten in sogenannten Rohrformstücken und anderen Einbauten wie z.B. Ventilen unterschieden. Anders als in geraden Rohrleitungselementen entstehen in Rohrformstücken neben den Reibungsverlusten durch die Oberflächenrauigkeit weitere Verluste durch Strömungsablösung bzw. Sekundärströmung.

Der Druckverlust in einem Rohrformstück ist von der Art der Umlenkungen abhängig und wird als Widerstandsbeiwert  $\zeta$  bezeichnet. Widerstandsbeiwerte werden experimentell über eine Druckmessung von Eintritt  $p_1$  zu Austritt  $p_2$  des Rohrformstückes ermittelt und lassen sich als Richtwerte in Tabellen finden. Der Widerstandsbeiwert gibt an, welcher Druckunterschied zwischen Ein- und Austritt vorliegen muss, um einen bestimmten Durchfluss durch ein Rohrleitungselement aufrecht zu erhalten.

### Druckverlust im Rohrknie

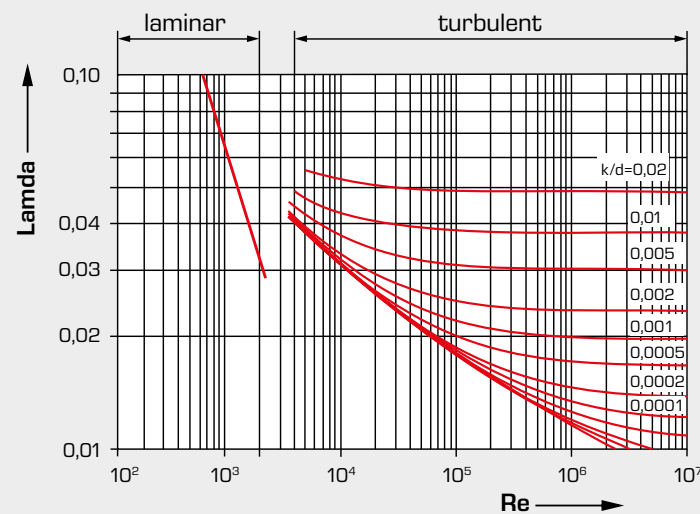


p Druck, Δp Druckdifferenz, 1 Sekundärströmung

### Druckdifferenz bei geraden Rohrleitungselementen

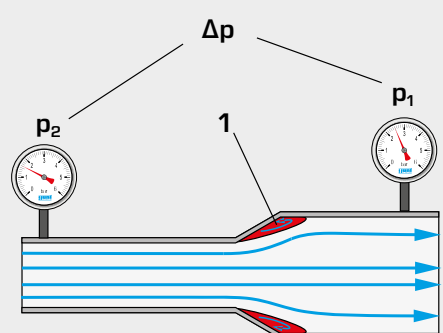
Die Druckdifferenz  $\Delta p$  von Ein- zu Austritt eines geraden Rohrleitungselementes ergibt sich aus der Rohrreibungszahl  $\lambda$ , der Rohrlänge  $L$ , der Dichte des Fluids  $\rho$  und dem Quadrat der mittleren Fluidgeschwindigkeit  $v$  geteilt durch den inneren Rohrdurchmesser  $d_i$ .

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}{d_i \cdot 2}$$



Das Rohrreibungsdiagramm zeigt die Abhängigkeit der Rohrreibungszahl  $\lambda$  von der Reynoldszahl  $Re$  und der Rauigkeit  $k$

### Druckverlust in einer Rohrerweiterung

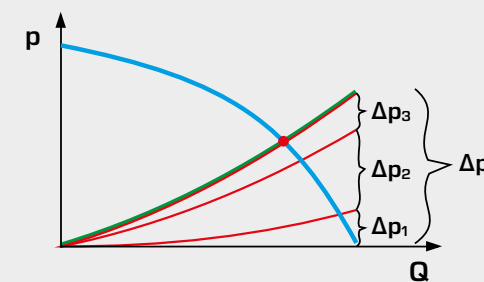


p Druck, Δp Druckdifferenz, 1 Strömungsablösung

### Druckdifferenz bei Rohrformstücken

Die Druckdifferenz  $\Delta p$  von Ein- zu Austritt eines Rohrformstückes ergibt sich aus dem Widerstandsbeiwert  $\zeta$ , der Dichte des Fluides  $\rho$  und dem Quadrat der mittleren Fluidgeschwindigkeit  $v$ .

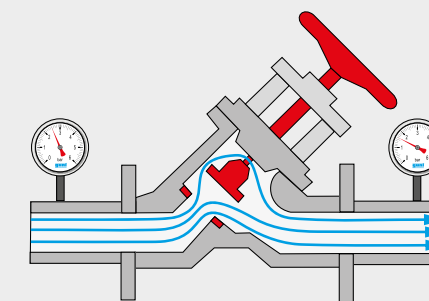
$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$



■ Einzelwiderstände  $\Delta p_{1-3}$  einer Anlage,  
■ Gesamtwiderstand  $\Delta p$  der Anlage,  
■ Pumpenkennlinie;  
 $\Delta p$  Druckdifferenz, p Druck, Q Durchfluss

Durch Addition aller Druckverluste in den verschiedenen Rohrleitungselementen ergibt sich die Anlagenkennlinie des Rohrleitungssystems. Über die Anlagenkennlinie ergibt sich die nötige Förderhöhe der Pumpe in Abhängigkeit vom Durchfluss.

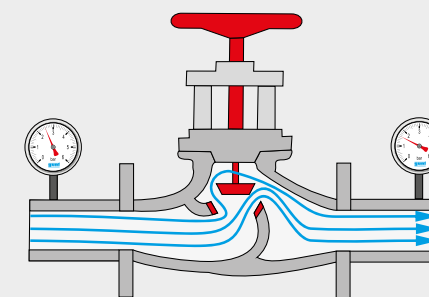
## Druckverluste in Absperrarmaturen



Absperrarmaturen werden als Bauteile zur Absperrung des Durchflusses in Rohrleitungssystemen eingesetzt. Als Absperrarmaturen dienen in erster Linie Ventile, Hähne und Schieber. Je nach Bauart der Armatur wird das Schließen auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt. Bei Durchströmung der verschiedenen Armaturen treten je nach Geometrie und Öffnungszustand unterschiedliche Druckverluste auf.

Auch im voll geöffneten Zustand treten Druckverluste auf, infolge der oft starken Umlenkung der Strömung innerhalb der Armatur. Die Druckdifferenz kann auch hier durch den Widerstandsbeiwert  $\zeta$  für den geöffneten Zustand ausgedrückt werden.

## Druckverluste in Regelarmaturen



Bei Regelarmaturen kann der Durchfluss aufgrund der Bauweise eingestellt werden und wird deshalb zum Regeln des Durchflusses verwendet. Der Durchfluss bei jeweiligem Öffnungszustand wird durch die sogenannte Ventilkennlinie charakterisiert.

Zur Auswahl von Ventilen wird von den Armaturenherstellern der Durchflusskoeffizient  $K_{vs}$  bei 100% Öffnungsgrad der Armatur angegeben. Dieser Durchflusskoeffizient ist ein Maß für den maximal möglichen Durchsatz eines Fluids durch eine Armatur. Bei kleineren Öffnungen des Ventils als 100% wird der Durchflusskoeffizient  $K_v$  genannt. Der Durchflusskoeffizient  $K_v$  liegt zwischen 0 und  $K_{vs}$ .

Der Durchflusskoeffizient  $K_v$  für Armaturen wird für verschiedene Öffnungszustände über den Durchfluss  $Q$  und die Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen Ein- und Austritt der Armatur bestimmt.

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{\Delta p}}$$