

9 Rohrreibungsverluste

1. Die Reynoldssche Zahl

Die Reynoldssche Zahl R_e ist eine dimensionslose Strömungszahl. Bei der Umströmung geometrisch ähnlicher Körper oder Durchströmung geometrisch ähnlicher geschlossener Kanäle ergeben sich bei gleicher R_e -Zahl auch ähnliche Strömungsbilder. Für Rohre mit Kreisquerschnitt ist

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (24)$$

In dieser Gleichung bedeuten: v die mittlere Geschwindigkeit der Strömung $v = Q/A$ in m/s, d der Innendurchmesser des Rohres in m und ν die kinematische Viskosität in m^2/s .

2. Der Druckhöhenverlust in Rohren

Die Fortleitung einer Flüssigkeit durch eine Rohrleitung hat erfahrungsgemäß einen Druckhöhenverlust zur Folge, der bei Rohren mit Kreisquerschnitt mit folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$HV = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (25)$$

Hierin ist λ eine dimensionslose Kennzahl der Rohrreibung, l die Länge des Rohres mit gleichbleibendem Durchmesser in m, d der innere Durchmesser des Rohres in m und v die mittlere Geschwindigkeit der Strömung.

3. Strömungsarten in Rohren

a) Laminare Strömung. Strömt eine Flüssigkeit mit sehr geringer Geschwindigkeit durch eine Rohrleitung, so bewegen sich alle Flüssigkeitsteilchen in geordneten zur Rohrachse parallelen Bahnen. In zur Rohrachse konzentrischen, zylindrischen Schichten herrschen gleiche Geschwindigkeiten, deshalb der Name laminare Strömung = Schichtströmung.

Bei dieser Strömungsform entstehende Druckhöhenverluste sind nur bedingt durch die innere Reibung, also dem Widerstand den benachbarte Flüssigkeitsschichten einer gegenseitigen Verschiebung entgegensetzen. Die Rohrrauigkeiten haben keinen Einfluß, da sie in der an den Wandungen haftenden Schicht eingebettet sind.

Bei laminarer Strömung wächst der Rohrreibungsverlust linear mit der Strömungsgeschwindigkeit und ist nur abhängig von der Viskosität der Flüssigkeit

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad (26)$$

Laminare Strömungen sind in der Praxis nur selten anzutreffen, da sie mit Sicherheit nur bei Reynoldsschen Zahlungen $R_e \cdot 2320$ auftreten. Bei günstiger Zuströmung und sehr glatten Rohren kann sich noch bei $R_e = 50000$ eine laminare Strömung einstellen, im Allgemeinen ist das jedoch nicht der Fall. Bei Wasserförderung wird beispielsweise in einer DN 100 Leitung nur dann eine laminare Strömung eintreten, wenn die Strömungsgeschwindigkeit auf $v \cdot 0,03$ m/s sinkt. Anders dagegen bei zähen Flüssigkeiten: In engeren Rohren ist dann schon bei üblichen Strömungsgeschwindigkeiten mit einer laminaren Strömung zu rechnen. In Bild (19) ist die Verlustkurve für laminare Strömung mit a bezeichnet.

b) Turbulente Strömung. Wird die kritische R_e -Zahl $R_e = 2320$ überschritten, überlagert sich der geordneten Schichtströmung eine unregelmäßige wirbelnde Nebenbewegung. Es entstehen Geschwindigkeitsschwankungen und Querbewegungen. Flüssigkeitsteilchen aus der Rohrmitte gelangen in die Nähe der Wandung und umgekehrt.

Wie in Bild (19) dargestellt, unterscheidet man bei einer turbulenten Rohrströmung die Bereiche A und B. Im Bereich A ist der Rohrreibungsverlust sowohl von der Reynoldszahl als auch von der Wandrauhigkeit k abhängig. Die Rauigkeit ist ausgedrückt durch den Quotienten d/k , wobei d der lichte Rohrdurchmesser ist. Die untere Grenzkurve b gilt für eine hydraulisch glatte Wandung, bei der die Unebenheiten ganz in der sehr dünnen laminaren Unterschicht verschwinden. Dennoch besteht keine Ähnlichkeit mit der laminaren Strömung, denn die Verluste steigen nicht linear, sondern ungefähr mit der zweiten Potenz. Oberhalb der Grenzkurve c ist der Rohrreibungsverlust nicht mehr von der Reynoldsschen Zahl, sondern nur noch von der Wandrauhigkeit abhängig.

4. Die praktische Berechnung von Rohrreibungsverlusten

a) Wasserförderung. Handelt es sich um die Förderung von Wasser, können die Druckhöhenverluste aus dem Diagramm im EDUR-Arbeitsblatt „Rohrreibungsverluste“ entnommen werden. Eine gewisse Unsicherheit liegt allerdings in der Abschätzung der Rohrrauigkeit.

Grundlagen für die Projektierung und den Betrieb von EDUR-Kreiselpumpenanlagen



Bei der Erstellung des Diagramms wurde eine Rohrrauigkeit von $k = 0,1$ zugrundegelegt. Bei der Berechnung von Leitungen bestehend aus nahtlosen Stahlrohren ist es vertretbar, die Diagrammwerte unverändert in die Berechnung zu übernehmen. Neue Stahlrohre besitzen zwar eine Rauigkeit von nur k ca. $0,04$ aber nach einer gewissen Betriebszeit wird sich die Rauigkeit erhöhen, die Pumpe jedoch immer noch eine ausreichende Förderleistung aufweisen. Es erhebt sich nun die Frage, ob bei der Pumpenauslegung nicht auch eine Inkrustierung der Rohre zu berücksichtigen ist: Wird Kaltwasser in Trinkwasserqualität gefördert, ist auch nach jahrelangem Betrieb mit keiner Erhöhung der Rohrverluste um mehr als etwa 4% zu rechnen. Bei schlechter Wasserqualität oder in Warm- und Heißwasseranlagen ist eine Wasseraufbereitung unerlässlich, weil bereits eine geringfügige Inkrustierung zu einer erheblichen Erhöhung der Verluste führt. Der Druckverlust kann durchaus auf das 4-fache ansteigen, was bei Anlagen mit ausschließlich dynamischer Förderhöhe gleichbedeutend mit einer Vervierfachung der Energiekosten ist. Doch selbst ein Zuschlag in dieser Größenordnung bietet noch keine absolute Sicherheit, weil bei entsprechender Wasserbeschaffenheit die Rohre allmählich ganz zuwachsen.

Kunststoffrohre sind als technisch glatt anzusehen, ebenso wie gezogene Kupferrohre oder Nirostahlrohre. Bei guter Wasserqualität kommt es auch nach längerer Benutzung zu keiner nennenswerten Erhöhung der Rauigkeit. Die Werte aus dem Rohrreibungs-Diagramm können in solchen Fällen mit $0,7$ multipliziert werden.

b) Förderung zäher Flüssigkeiten. Das Arbeitsblatt „Rohrreibungsverluste“ gilt nicht für zähe Flüssigkeiten. Sind solche vorhanden, kann die Widerstandszahl λ mit Hilfe der Formel von Colebrook errechnet werden, dessen Lösung bei Anwendung programmierbarer Rechner kein Problem mehr darstellt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \quad (27)$$

Selbstverständlich läßt sich λ auch aus dem Diagramm Bild 19 entnehmen, welches mit Hilfe obiger Gleichung angefertigt wurde.

Bei den üblicherweise vorkommenden zähen Flüssigkeiten wie Dieselkraftstoff, Heizöl oder Kühltölen sind keine nennenswerten Ablagerungen zu erwarten. Sicherheitszuschläge sind deshalb nicht erforderlich.

Man kann mit folgenden Rauigkeitswerten rechnen:

Technisch glatte Rohre:	$k = 0,0014$
Nahtlose Stahlrohre:	$k = 0,04$
Verzinkte Stahlrohre:	$k = 0,1$
Gußrohre:	$k = 0,3$

Nachdem die Widerstandszahl λ bestimmt ist, kann man die Verlusthöhe mit Gleichung (25) errechnen.

c) Druckhöhenverlust durch Einzelwiderstände. Die Verluste in Armaturen und Formstücken sind auf der Rückseite des Arbeitsblattes „Rohrreibungsverluste“ in Form gleichwertiger Rohrlängen angegeben. Hier-nach hat beispielsweise ein voll geöffneter Schieber in DN 50 den gleichen Druckhöhenverlust wie ein DN 50 Rohr von $0,7$ m Länge. Dieser gleichwertigen Rohrlängen sind bei der Berechnung des gesamten Druckhöhenverlustes einer Anlage der gestreckten Länge der Rohrleitung hinzuzurechnen.

Diese Methode hat gegenüber der ebenfalls üblichen Berechnung über die Widerstandsbeiwerte ζ den Vorteil, daß die Berechnung auch bei zähen Flüssigkeiten möglich ist, wofür Widerstandsbeiwerte nicht zur Verfügung stehen.