



17

Hydraulische Berechnung

- 17.1 Allgemeines
- 17.2 Berechnung des Druckverlustes
- 17.3 Literatur

17 Hydraulische Berechnung

Berechnungsmethoden für Druckverluste in Rohrleitungen, Formstücken und Armaturen, Teilfüllung, Druckstöße.

17.1 Allgemeines

Für den Bereich der Wasserleitungen basieren die nachfolgenden Ausführungen auf der EN 545; für Abwasserkanäle und -leitungen gilt EN 598.

Die hydraulische Berechnung von Trinkwasserleitungen ist im DVGW-Arbeitsblatt GW 303-1 geregelt.

Das Arbeitsblatt DWA-A 110 ist für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen maßgebend; es ist in einer überarbeiteten Fassung mit Ausgabe August 2006 neu erschienen.

Für die Berechnung von Wasserrohrnetzen ist das DVGW-Arbeitsblatt GW 303-1 maßgebend.

Unter www.eadips.org kann im Kapitel „Rechentools“ ein Programm in Anlehnung an das DVGW-Arbeitsblatt GW 303-1 und dem Arbeitsblatt **DWA-A 110** zur hydraulischen Berechnung folgender Anwendungsfälle kostenlos heruntergeladen werden:

- Wasserleitungen im Bereich von DN 80 bis DN 2000 und
- Abwasserkanäle und Abwasserleitungen im Bereich von DN 100 bis DN 2000.

17.2 Berechnung des Druckverlustes

Der Volumenstrom (Abfluss, Durchfluss) Q in [m³/sec], der lichte Rohrdurchmesser d in [m] und die mittlere Fließgeschwindigkeit V in [m/s] sind durch die Beziehung

$$(17.1) Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V \text{ [m}^3 / \text{s]}$$

miteinander verknüpft. Mit einer für das Medium typischen Fließgeschwindigkeit wird, bei vorgegebenem Druckabfall, der lichte Rohrdurchmesser in erster Näherung ermittelt. Orientierungswerte für V sind in **Tabelle 17.1** zusammengefasst.

Tabelle 17.1:
Typische Fließgeschwindigkeiten
verschiedener Medien in Rohrleitungen

Art der Leitung	Fließgeschwindigkeit [m/s]
Trinkwasser- und Betriebswasserleitungen	1 bis 3
Abwasserleitungen	1 bis 15
Niederdruck-Gasleitungen (Versorgungsleitung)	1 bis 3
Gasleitungen (Hauptleitung)	3 bis 6
Hochdruck-Gasleitungen	10 bis 25

17.2.1 Druckverlust in geraden Rohren

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf kreisförmige Querschnitte sowie Leitungen für Wasser und Abwasser.

Bei Rohrströmungen entstehen durch Reibung an der Rohrwand, durch Verwirbelung des Mediums und durch Reibung der Flüssigkeitsteilchen untereinander Energieverluste, die sich durch einen Druckabfall äußern.

Der Druckabfall $p_1 - p_2$ errechnet sich für stationäre Strömungsverhältnisse zu

$$p_1 - p_2 = \lambda \cdot \gamma_w \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [\text{N/m}^2] \quad (17.2)$$

Hierin bedeuten:

$p_1 - p_2$ Druckabfall in $[\text{N/m}^2]$

l Leitungslänge in $[\text{m}]$

d lichter Rohrdurchmesser in $[\text{m}]$

V mittlere Fließgeschwindigkeit in $[\text{m/s}]$

g Erdbeschleunigung in $[\text{m/s}^2]$

γ_w Dichte des Wassers in $[\text{N/m}^3]$

λ Widerstandsbeiwert (Rohrreibungszahl).

Die Umformung von obiger Beziehung liefert

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma_w} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (17.3)$$

Der Ausdruck

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma_w} \quad (17.4)$$

stellt die Druckverlusthöhe h in $[\text{m}]$ dar, die nach Division durch die Leitungslänge l in das Energieliniengefälle J übergeht.

$$J = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m/km}] \quad (17.5)$$

Aus Gründen der Übersicht wird J als der auf 1 km Leitungslänge bezogene Druckabfall h in m Wassersäule ausgewiesen.

Der Faktor λ stellt die dimensionslose Rohrreibungszahl (Widerstandsbeiwert) dar, die von der Wandrauheit und der Reynoldszahl Re abhängt.

Die Reynoldszahl Re ist das Verhältnis der Massenträgheitskräfte und der inneren Reibungskräfte und errechnet sich zu

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (17.6)$$

Hier ist ν die kinematische Zähigkeit in $[m^2/s]$.

Tabelle 17.2 enthält die kinematischen Zähigkeiten des Wassers bei Temperaturen zwischen 0 °C und 100 °C bei Normaldruck. Üblicherweise sind Druckabfalltafeln auf Wassertemperaturen von 10 °C , d.h. auf eine kinematische Zähigkeit von $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/s$, bezogen.

Mit den in **Tabelle 17.2** angegebenen Werten für die Fließgeschwindigkeiten V ist die Strömung in den Rohren immer turbulent.

Tabelle 17.2:
Abhängigkeit der kinematischen Zähigkeit des Wassers von der Temperatur

Temperatur [°C]	Kinematische Zähigkeit ν [$10^6\text{ m}^2/s$]
0	1,790
10	1,310
20	1,010
40	0,658
60	0,478
80	0,366
100	0,295

In diesen Fällen gilt für den Widerstandsbeiwert λ die Beziehung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \quad (17.7)$$

(Nach Prandtl-Colebrook).

Die obere Grenze stellt die von Nikuradse für hydraulisch raue Rohre ermittelte Beziehung

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{d}{k} + 1,14 \right)^2} \quad (17.8)$$

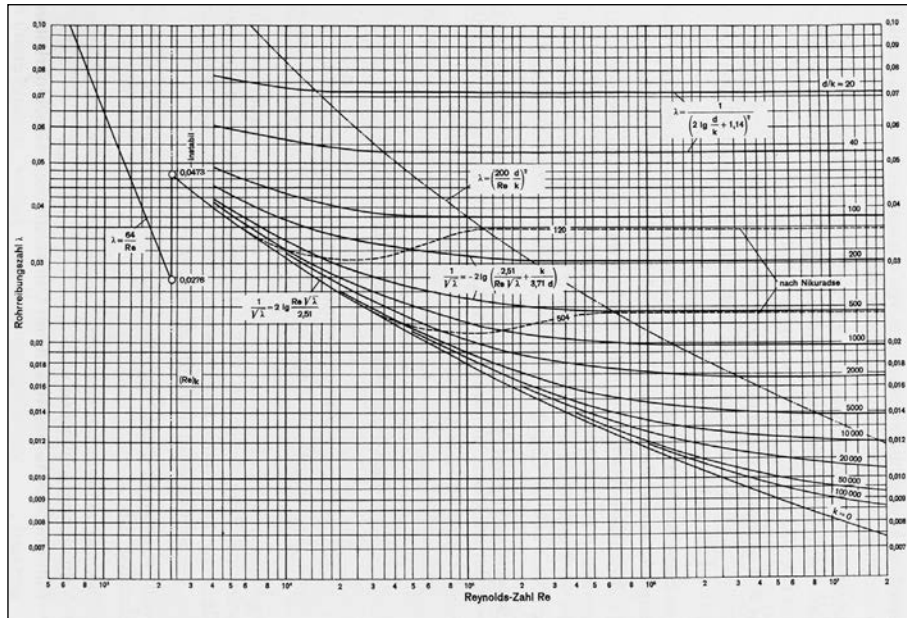
dar, während die untere Grenze ($K=0$) durch die von Karman-Prandtl für hydraulisch glatte Rohre angegebene Beziehung

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51} \quad (17.9)$$

gegeben ist.

Bild 17.1 zeigt die Abhängigkeit der Rohrreibungszahl λ von der Reynoldszahl Re ; Parameter ist das Verhältnis des lichten Rohrdurchmessers d und der absoluten Rauheit k . Es ist ersichtlich, dass der Bestimmung und Festlegung der absoluten Rauheit k eine besondere Bedeutung zufällt.

Bild 17.1
Abhängigkeit der Rohrreibungszahl λ von der Reynoldszahl Re



Für Trink- und Betriebswasserleitungen sind im DVGW-Arbeitsblatt W 302 nachstehende k_i -Werte festgelegt.

- $k_i = 0,1$ [mm]
Fern- und Zubringerleitungen mit gestreckter Leitungsführung
- $k_i = 0,4$ [mm]
Hauptleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung
- $k_i = 1,0$ [mm]
Neue Netze; durch den Übergang von $k_i = 0,4$ mm auf $k_i = 1,0$ mm wird der Einfluss starker Vermaschung näherungsweise berücksichtigt.

Schubert [17.1] hat diese Werte an einer rund 16 km langen Fernwasser-Versorgungsleitung aus zementmörtel ausgekleideten duktilen Gussrohren DN 400 und DN 500 bestätigt gefunden.

Für die Nachrechnung älterer Rohrleitungen und Rohrnetze ist es nicht möglich, Zahlenwerte für die Annahme von Rauheiten zu empfehlen. Die vorhandene Rauheit muss in der Regel durch Messungen bestimmt werden.

In den Messwerten sind die Verluste aller Formstücke und Armaturen enthalten, so dass man mit der Festlegung $k_1 = 0,1$ mm für Fernleitungen auf der sicheren Seite liegt.

Das ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 110 ist 2001 in einer überarbeiteten Fassung neu erschienen.

Wesentliche Änderungen im Vergleich zur Ausgabe August 1988 sind:

- Trennung der Vorgehensweise bei der Dimensionierung und beim Leistungsnachweis,
- neugefasste, erweiterte Darstellung der Strömungsverluste in Schächten mit und ohne Einstau,
- neuartige Behandlung der Strömung in Schachtbauwerken mit schießendem Abfluss bei gleichzeitiger Strömungsumlenkung,
- analytische Behandlung der Strömung in nicht kreisförmigen Profilen sowie bei Teilfüllungszuständen,
- Wegfall der Berücksichtigung von Formbeiwerten f ,

- Generalisierung der Behandlung der diskontinuierlichen Strömung durch Einführen des Faktors m ,
- erweiterte Neufassung der Behandlung von Flachstrecken und Ablagerungen,
- Berechnung der Energieumwandlung im Auslaufbereich von Steilstrecken,
- Überarbeitung der Berechnung für offene Gerinne mit gegliedertem Querschnitt.

Bei Berechnung von Spiegellinien ist der Übergang von Teilfüllung über Vollfüllung zum Druckabfluss (Einstau), auch unter Berücksichtigung des Einstaus der Schächte, lückenlos möglich. Vereinfachende Rechenmodelle bedürfen modellspezifischer Ansätze, die außerhalb des Geltungsbereiches von A 110 liegen würden.

Für Entwässerungskanäle und -leitungen sind die betrieblichen Rauheiten k_b in den Richtlinien des ATV-Arbeitsblattes A 110 festgelegt.

Für nicht genormte Rohre und Ortbetonkanäle ohne besonderen Nachweis der effektiven Wandrauheit ist $k_b = 1,5$ mm zu setzen. Der Pauschal-Ansatz für k_b -Werte enthält in der Regel die Einflüsse von

- Wandrauheit,
- Lageungenauigkeiten und -änderungen,
- Rohrstoßen,
- Zulauf-Formstücken und
- Schachtbauwerken.

Im Rahmen dieses Pauschal-Ansatzes ist die effektive Wandrauheit für genormte Rohre einheitlich mit $k = 0,1$ mm angesetzt. Darin sind auch die Auswirkungen des Kanalbetriebs auf die Wandrauheit gegenüber den Verhältnissen bei neuwertigen Rohren erfasst.

Nicht enthalten in dieser pauschalen Definition der k_b -Werte sind die Einflüsse von

- Unterschieden zwischen gerechneten und vorhandenen lichten Rohrdurchmessern,
- Vereinigungsbauwerken
- Ein- und Auslaufbauwerken von Drosselstrecken, Druckrohrleitungen
- Dükern
- Auswirkungen von Ein- und Überstau.

In diesen Fällen gelten folgende Prinzipien:

- Es ist grundsätzlich mit der effektiven mittleren Lichtweite zu rechnen oder mit den mittleren Lichtmaßen.
- Bei der Dimensionierung (Planung) sind Unterschreitungen im Rahmen von DIN 4263 zulässig und durch die Auslegung auf 0,9 Q_v abgedeckt.
- Wenn die effektive Lichtweite im Einzelfall nicht berücksichtigt wird, ist beim Leistungsnachweis (Nachrechnung) grundsätzlich mit 95 % der Nennweite zu rechnen, worin auch Querschnittsreduzierungen infolge normaler Ablagerungen erfasst sind.

- Die Verluste an Vereinigungsbauwerken sind im Einzelfall nachzuweisen. Auf den Nachweis kann verzichtet werden, wenn im Vereinigungsbauwerk ein Sohl sprung $\Delta Z \geq d/20$ vorgesehen oder vorhanden ist.

Auf den Nachweis kann ferner verzichtet werden, wenn die Auslastung des weiterführenden Kanals mit etwa 0,85 Q_v statt 0,9 Q_v begrenzt wird, sofern diese Kanäle rückstaufrei betrieben werden.

In **Tabelle 17.3** sind Pauschal-Werte für die betrieblichen Rauheiten in [mm] aufgeführt.

Tabelle 17.3:

Pauschalwerte der betrieblichen Rauheiten K_b

k_b [mm]	Anwendung	Bemerkung
0,25	Drosselstrecken ¹⁾ , Druckrohrleitungen ¹⁾²⁾ , Düker ¹⁾ , und Reliningstrecken ohne Schächte	alle DN
0,5	Transportkanäle mit Schächten	alle DN
0,75	Sammelkanäle und -leitungen mit Schächten	bis DN 1000
	dto. mit angeformten Schächten	alle DN
	Transportkanäle mit Sonderschächten bzw. angeformten Schächten	alle DN
1,5	Sammelkanäle und -leitungen mit Sonderschächten	alle DN
	Mauerwerkskanäle, Ortbetonkanäle, Kanäle aus nicht genormten Rohren, Rohre ohne besonderen Nachweis der Wandrauheit	alle DN

¹⁾ Ohne Einlauf-, Auslauf- und Krümmungsverluste

²⁾ Ohne Drucknetze

17.2.2 Teilfüllung

Bei der Ermittlung von Teilfüllungszuständen geht man davon aus, dass die Spiegellinie parallel zur Sohle verläuft (Normalabfluss).

Dann gilt für die Fließgeschwindigkeit V_T bei Teilfüllung

$$\frac{V_T}{V_V} = \left(\frac{r_{hy,T}}{r_{hy,V}} \right)^{0,625} \quad (17.10)$$

und für den Abfluss Q_T

$$\frac{Q_T}{Q_V} = \frac{A_T}{A_V} \cdot \left(\frac{r_{hy,T}}{r_{hy,V}} \right)^{0,625} \quad (17.11)$$

Die theoretischen Untersuchungen von Tiedt [17.2] haben die praktischen Versuche von Sauerbrey [17.3] dahingehend untermauert, dass der Einfluss der Luftreibung auf das Abflussverhalten teilgefüllter, geschlossener Profile vernachlässigt werden kann. Die Teilfüllkurven besitzen somit ein rückbiegendes Maximum bei Teilfüllungen, dem die höchstmögliche, stabile Normalwassertiefe zuzuordnen ist. Wegen der Problematik der Belüftung bzw. des Lufteinschlusses bei Kanalisationsleitungen, verbunden mit der daraus resultierenden Gefahr des „Zuschlagens“ der Leitungen, werden die Teilfüllkurven für Abflüsse bei

$$\frac{Q_T}{Q_V} = 1,0 \quad (17.12)$$

abgebrochen.

17.2.3 Druckverluste in Formstücken und Armaturen

Die Druckverlusthöhe h' in Formstücken und Armaturen errechnet sich nach der Formel

$$h' = \xi_i \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (17.13)$$

wobei ξ_i die Widerstandszahl ist.

Eine andere Möglichkeit zur Definition der Druckverluste ist die Festlegung einer äquivalenten Verlustlänge L' , die sich aus der Formel zu

$$L' = \xi_i \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (17.14)$$

errechnet.

Die Druckverluste werden durch die äquivalente Verlustlänge L' einer Leitung der gleichen Nennweite ersetzt. Die Ergebnisse sind für Bögen in **Bild 17.2**, für Abzweige in **Bild 17.3** und **Bild 17.4** enthalten. Sie gelten für eine Strömungsgeschwindigkeit V von 1 m/s und der kinematischen Zähigkeit ν bei 10 °C Wassertemperatur.

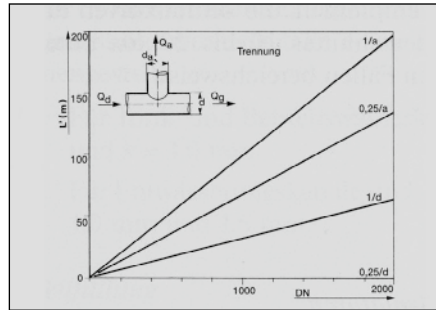


Bild 17.3:
Äquivalente Verlustlänge L' bei Abzweigen (Trennung)

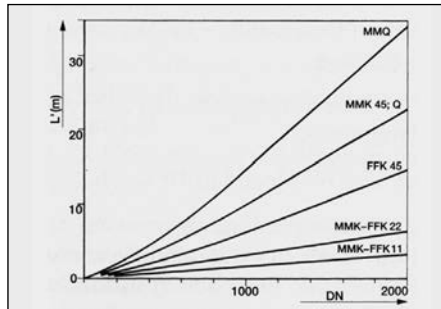


Bild 17.2:
Äquivalente Verlustlänge L' bei Bögen

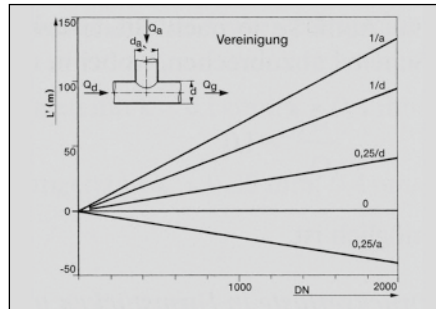


Bild 17.4:
Äquivalente Verlustlänge L' bei Abzweigen (Vereinigung)

17.2.4 Druckstöße in Rohrleitungen

Gegenstand der Berechnung sind jene instationären Strömungsvorgänge in Leitungen, die im Wesentlichen durch die Massenträgheit der Flüssigkeit verursacht wird. Zusätzlich ist der Einfluss der Kompressibilität des Mediums und die Elastizität des Rohrwerkstoffes zu berücksichtigen.

Die dabei auftretenden Druckschwankungen sind allgemein unter dem Begriff Druckstöße – bei Wasserleitungsnetzen auch als Wasserschläge – bekannt.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 303 enthält Planungshinweise und Berechnungsverfahren.

17.3 Literatur

- [17.1] Schubert, J.:
Druckverlustmessungen an duktilen
Gussrohren mit Zementmörtel-
Auskleidung,
FGR-Informationen 11
(1976) S. 14/18
- [17.2] Tiedt, W.:
Hydrodynamische Untersuchungen
des Teilfüllungsproblems
(Gesetzmäßigkeiten des
Abflusses in technisch rauen
Kreisgerinnen bei laminarer
und turbulenter Strömung)
Techn. Berichte aus dem Institut für
Hydraulik und Hydrologie der Tech-
nischen Hochschule Darmstadt, Nr. 7
1971
- [17.3] Sauerbrey, M.:
Abfluß in Entwässerungsleitungen
unter besonderer Berücksichtigung
der Fließvorgänge in
teilgefüllten Rohren.
Erich Schmidt Verlag, Bielefeld
1969