Hölzerne Röhren für Wasserleitungen, fassartig aus Dauben gebaut, hat der Fabrikant Herzog in Logelbuch mit bestem Erfolg ausgeführt; neueste Leitung 1,8 m weit, 1800 m lang.

Röhren aus asphaltirtem Papier sind nur mässig verwendbar; sie vertragen nicht die Sonnenhitze.

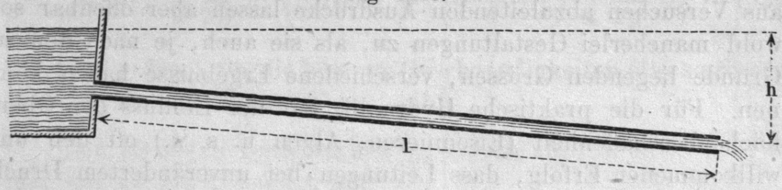
§. 340.

Leitungswiderstände in Röhren.

Die Widerstände, welche sich der Bewegung von Flüssigkeiten in Maschinen entgegensetzen, entstehen entweder durch Wechsel in der Bewegungsrichtung, oder durch Wechsel in der Schnelle, oder durch Reibung. Hier kann nur auf wenige Fälle eingegangen, und auch nur soweit von ihnen gehandelt werden, als sie in Röhren vorkommen.

Reibungswiderstand. Wenn Wasser aus einem flachwandigen Gefäss, Fig. 1053, durch ein cylindrisches Ansatzrohr

Fig. 1053.



heraustritt und sein Gefälle vom Wasserspiegel bis zur Mitte der Mündung am Ausfluss $= h$ ist, so hat man, wenn noch l die Länge des Rohres, d dessen Weite in m und v die Ausflussschnelle ist, mit Weisbach:

$$h = \left(1 + \zeta_0 + \zeta \frac{l}{d}\right) \frac{v^2}{2g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (326)$$

und die sekundliche Ausflussmenge

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (327)$$

Dabei bezeichnet ζ_0 den Widerstands- oder Reibungskoëffizienten für die Einlaufstelle, ζ denjenigen des Rohres.

Der Koëffizient ζ_0 ist, wenn die Röhre scharfkantig ansetzt, beträchtlich, nämlich $= 0{,}505$, kann aber, wenn die Einlaufskanten sorgfältig abgerundet sind, der Einlauf „eingetrichtert“

ist, auf 0,08 herabgezogen werden. Im letzteren Falle kann man bei langen Röhren ζ_0 vernachlässigen*).

Für den Reibungskoëffizienten ζ gelten verschiedene Annahmen. Die Bewegung einer Flüssigkeit im Leitungsrohr geschieht nämlich unter sehr verwickelten Umständen. Im cylindrischen Rohr bewegen sich die Flüssigkeitstheilchen so, dass die in der Achse befindlichen sich am schnellsten, und jede folgende ringförmige Schicht sich langsamer bewegt, die äusserste, an der Rohrwand anliegende still steht, oder mit anderen Worten, dass die Schnelle der ringförmigen Schichten an der Wand von Null ab beginnend, als Funktion des Wandabstandes bis zu dem grössten Werth in der Rohrachse steigt. Bei gasförmigen Flüssigkeiten nähert sich die Schnelle der einzelnen Schichten viel rascher dem erwähnten grössten Werth, als bei tropfbaren. In beiden Fällen aber ist die Reibung der Flüssigkeit die Summe der Reibungen der ringförmigen Schichten aneinander. In praktischen Ausführungen kommen die Abweichungen von der Cylinderform des Rohres, die Rauhigkeiten der Wand u. s. w. noch als Reibung verursachend hinzu. Der mathematische Ausdruck selbst für den reinen Vorgang kann hiernach niemals einfach sein. Die aus Versuchen abzuleitenden Ausdrücke lassen aber offenbar sowohl mancherlei Gestaltungen zu, als sie auch, je nach den zu Grunde liegenden Grössen, verschiedene Ergebnisse haben können. Für die praktische Hydraulik hat der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit (Eisennieren, Algen u. s. w.) oft den unwillkommenen Erfolg, dass Leitungen bei unverändertem Druck nach und nach weniger Wasser liefern. Dies hat sowohl dahin gedrängt, auf eine haltbare Glätte der inneren Rohrwände besondere Aufmerksamkeit zu richten, als auch sich Gewissheit zu verschaffen, welcher von den vorgeschlagenen Berechnungsweisen von ζ der Vorzug zuzuerkennen sei.

Der Verband der Deutschen Architekten- und Ingenieurvereine hat auf Grund neuerer Versuche verschiedener seiner

---

*) Tritt das Rohr, statt aus einem flachwandigen Gefäss, aus einem anderen Rohr heraus, so ist der Widerstandskoëffizient weit grösser als angegeben; mit besonderer Sorgfalt muss also dann der Einlauf eingetrichtert werden, um ζ_0 klein zu halten. Interessante Versuche hierüber hat Roux angestellt, siehe den lehrreichen Vortrag von Hertel: „Die Verzweigung der Blutgefässe, eine vollkommenste Rohrleitung,“ Zeitschr. D. Ingenieure 1885 (Bd. XXX., S. 660), auch W. Roux, Ueber die Verzweigung der Blutgefässe, Jenaische Zeitschr. f. Naturwissenschaften 1878, Bd. XII.

Mitglieder eine Vergleichung der gebräuchlichsten Formeln für ζ für Wasser veranlasst. Das Ergebniss dieser Vergleichung liegt in einer verdienstlichen Arbeit vor*), es geht dahin, dass eine ganz feste Grundlage noch nicht vorhanden sei, die Versuche deshalb noch fortgesetzt werden möchten. Wir sind daher auf Benutzung der vorhandenen Formeln angewiesen. Unter denselben haben sich nach wie vor die von Weisbach und von Darcy als besonders brauchbar gezeigt. Trennt man von der obigen Gefällhöhe h diejenige für die Reibung mit dem Werthe h_1 ab, so kann man nach Weisbach setzen für Wasser:

$$h_1 = \zeta \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \left(0{,}01439 + \frac{0{,}0094711}{\sqrt{v}}\right) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \cdot \quad (328)^{**})$$

wobei alle Abmessungen in m. Man erhält hieraus für:

$v =$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2	3	4	5	6
$\zeta = 0{,}0$	446	456	317	264	278	266	257	250	244	239	211	198	191	186	182

Nach Darcy hat man***) ebenfalls für Wasser:

$$h_1 = \zeta \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \left(0{,}01989 + \frac{0{,}0005078}{d}\right) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \cdot \quad \cdot \quad (329)$$

welcher Ausdruck für die höheren Geschwindigkeiten etwas grössere Werthe, als der Weisbach'sche, gibt.

Den kleinsten Gefällverlust gibt nach Iben a. a. O. die Formel von de Saint Venant mit:

$$h_1 = (0{,}023197\, v^{-2/7}) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (330)$$

*) Druckhöhenverlust in geschlossenen eisernen Rohrleitungen, Denkschrift des Verbandes D. Arch.- u. Ing.-Vereine, im Auftrage bearbeitet von Otto Iben, Hamburg, Meissner, 1880. Für eine allfällige neue Auflage wäre eine vergleichende Durchrechnung zu empfehlen, da einzelne Ungenauigkeiten der Beachtung bei der Drucklegung entgangen sind.

**) Diese und die folgenden beiden Formeln werden auch gebraucht, wenn zur Druckhöhe h_1 noch eine weitere Höhe h_1' hinzukommt, welcher durch Verengung des Auslaufes das Gleichgewicht gehalten wird. Ob letztere Höhe h_1', wenn sie bedeutend ist, wie in den Hochdruckwassertrieben (vergl. S. 879), nicht den Reibungskoëffizienten steigert, steht dahin. Versuche sind wünschenswerth.

***) Siehe Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyeaux, Paris, Mallet-Bachelier, 1857.

Für $l = 100$, $d = 0,1$ erhält man, wenn die Schnelle $v = 0,5$ bis $3,0\,m$:

$v =$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Nach Weisbach $h_1 =$	0,354	1,217	2,537	4,302	6,496	9,115
„ Darcy „	0,318	1,273	2,865	5,093	7,958	11,460
„ St. Venant „	0,355	1,182	2,369	3,877	5,687	7,774

Setzt man den Werth für v aus der Gleichung $h_1 = \zeta (l : D)$ $(v^2 : 2g)$ in den obigen (327) für Q ein, so erhält man

$$Q^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 d^4 h_1 \frac{d}{l} \frac{2g}{\zeta} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \frac{2g}{\zeta} d^5 \frac{h_1}{l} = \frac{12{,}102596}{\zeta} d^5 \frac{h_1}{l}.$$

Wird nun für überschlägliche Rechnungen, wie Dupuit empfiehlt*), ζ konstant gesetzt, so ergibt sich hieraus:

$$Q^2 = C d^5 \frac{h_1}{l}.$$

Dupuit setzt $C = 400$, d. i $\zeta = 0{,}03025649$, womit man bekommt:

$$d^5 = \frac{l}{h_1}\left(\frac{Q}{20}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (331)$$

und hieraus angenähert**):

$$Q = \sqrt{\frac{h_1}{l}\left(\frac{d}{0{,}3}\right)^5} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (332)$$

Diese Formeln kann man so anwenden, dass man zuerst bei bekanntem Q und l und der verfügbaren Gefällshöhe h_1 die Rohrweite D so bestimmt, als solle h_1 ganz für die Reibung aufgehen, dann für D einen etwas grösseren Werth wählt, als die Reibung ergeben hat und darauf nach Weisbach oder Darcy u. s. w. den wirklichen Gefällsverlust für die Reibung bestimmt. Es mögen nun einige Beispiele folgen.

1. Beispiel. Bei dem grossen Düker aus §. 337, Fig. 1049 ist $D = 10{,}432$, $l = 353{,}8$ und $Q = 0{,}896$; daher berechnet sich v, wenn das Rohr voll läuft, zu $0{,}896 : 0{,}785 \,.\, 0{,}432^2 = 0{,}896 : 0{,}1466 = 6{,}11\,m$. Dies entspricht nach Weisbach einem Koëffizienten $\zeta = 0{,}01439 + 0{,}0094711 : 2{,}472 = 0{,}0182$. Damit kommt aus (328) $h_1 = 0{,}0182\ (1353{,}8 : 0{,}432)$

---

*) Siehe Dupuit, Traité théorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux etc., Paris, Dunod, 1me éd. 1854, 2me éd. 1865.

**) $1 : 0{,}3^5$ gibt statt 400 den Werth 412; die Annäherung ist aber statthaft; Dupuit zieht die Form (332) der leichter scheinenden $Q = 20\sqrt{(h_1 : l)\, d^5}$ vor, weil die Konstante 0,3 dem Koëffizienten ζ direkt proportional ist.

$(6{,}11^2 : 2 \, . \, 9{,}81) = 108{,}56$ m. Thatsächlich vorhanden ist aber bloss eine Gefällhöhe von 92,56 m. Der Weisbach'sche Koëffizient, der noch niedriger ist, als der Darcy'sche, ist also hier noch zu hoch. Bestimmt man ζ aus der vorhandenen Höhe $h_1' = 92{,}56$, so erhält man $\zeta = 0{,}0155$; der wirkliche Koëffizient müsste also noch etwas kleiner sein. — Die Formel von Saint Venant, $h_1 = 0{,}023197 \, . \, (1353{,}8 : 0{,}432 \, . \, 9{,}81) \, . \, 6{,}1^{1-2/7}$, ergibt $h_1 = 88{,}4$, ein Werth, welcher etwas unter dem wirklichen Werth h_1' bleibt, aber demselben doch recht nahe kommt.

2. Beispiel. Die vorhin angeführte Schrift von Iben gibt S. 76 für eine dem Versuch unterworfene Leitung in Stuttgart $l = 1102$, $D = 0{,}101$, $v = 0{,}629$. Damit erhält man nach Weisbach $\zeta = 0{,}0263$ und daraus $h_1 = 11{,}02 \, . \, 0{,}526 = 5{,}7965$. Der Versuch aber lieferte $h_1 = 7{,}08$, und daraus $\zeta = 0{,}0322$. Der Unterschied ist wahrscheinlich den Einbauten, zwei Absperrschiebern und sechs Abzweigstutzen zuzuschreiben.

3. Beispiel. Ein anderer der in Stuttgart angestellten Versuche (Iben, S. 77) liefert aus $l = 92{,}0$, $D = 0{,}0257$, $v = 1{,}798$ den beobachteten Höhenverlust zu 25,271 m auf $l = 100$ m Rohrlänge. Nach Darcy erhielte man dafür $h_2 = 25{,}466$ m, was sehr nahe mit dem Versuchsergebniss zusammentrifft, wie überhaupt bei mehreren Versuchen aus derselben Reihe geschieht; bei anderen Versuchen weicht indessen die Darcy'sche Formel wieder stark ab.

Wenn Luft statt Wasser die Röhre durchströmt, so verliert dieselbe nach Weisbach durch die Reibung eine Pressung, welche der Höhe h_1 einer Wassersäule von folgender Grösse entspricht:

$$h_1 = \zeta_1 \frac{l}{d} \, \frac{v^2}{2g\varepsilon} = 0{,}025 \, \frac{l}{d} \, \frac{v^2}{2g\varepsilon} \quad . \; . \; . \; . \quad (333)$$

wobei ε das Verhältniss der Dichtigkeit der Rohrfüllung zu derjenigen der äusseren Luft bezeichnet. Da ε, wenn gepresste Luft im Rohre ist, stets grösser als 1 ist, fällt h_1 kleiner als bei Wasser aus, namentlich wenn die Luftspannung hoch ist. An den Druckluftleitungen des Gotthardtunnels sind werthvolle Versuche durch Ingenieur Stockalper angestellt worden*). Dieser gelangte dazu, dass die Darcy'sche Formel (329) ganz gut die Verhältnisse für Luft gebe, wenn man ihre Ergebnisse mit dem Verhältniss der Dichtigkeit der Luft zu der des Wassers multiplicirt. Sehr werthvolle Mittheilungen hat auch Professor Unwin über Luftreibung gemacht, in welchen unter anderen der starke Einfluss von D auf ζ aus Versuchen nachgewiesen wird**).

---

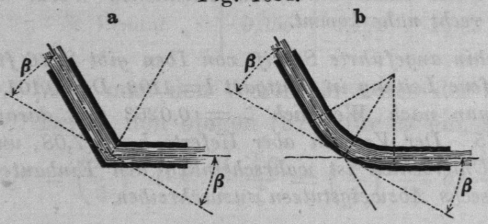
*) Stockalper, Expériences, faites au Tunnel de Saint Gotthard, sur l'écoulement de l'air comprimé, Genève 1879.

**) The coefficient of friction of air flowing in long pipes, Excerpt of the Proceedings of the Inst. of Civ. Engineers, London 1880.

4. Beispiel. Beim Bau des Hoosac-Tunnels in Massachusets betrug in einer rund 36 000 m langen Druckluftleitung die Luftspannung bei den Luftpressen 821, im Tunnel vor Ort 801 Pfd. auf den Quadratzoll.

Widerstand in Knierohren und Krümmern. In einem Kniérohr, Fig. 1054 a, erfährt Wasser beim Durchgang einen bedeutenden Verlust an Druckhöhe, welcher sich nach Weisbach bei dem sogenannten Bricol- oder Abprallwinkel β durch folgende Formel ermitteln lässt:

Fig. 1054.



$$h_2 = \zeta_2 \frac{v^2}{2g} = (0{,}9457 \sin \beta^2 + 2{,}047 \sin \beta^4) \frac{v^2}{2g} \quad \cdot \quad (334)$$

woraus folgt bei:

$\beta^0 =$	10	20	30	40	45	50	60	70
$\zeta_2 =$	0,046	0,139	0,364	0,740	0,985	1,260	1,861	2,431

5. Beispiel. Das rechtwinklige Knie, bei dem also $\delta = 45^0$ ist, bedingt hiernach einen Druckverlust, welcher beinahe = dem Werthe $v^2 : 2g$ ist.

Im Krümmer, Fig. 1054 b, stellt sich der Verlust geringer, obwohl immer nicht vernachlässigbar klein, indem nämlich hier ist:

$$h_2 = \zeta_2 \frac{\beta}{90} \frac{v^2}{2g} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (335)$$

Dabei hängt ζ_2 von dem Verhältniss der Rohrweite d zum Krümmungshalbmesser r der Rohrmittellinie in folgender Weise ab.

$\frac{0{,}5\,D}{r} =$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\zeta_2 =$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978

6. Beispiel. Für einen rechtwinkligen Krümmer, bei welchem $r = D$, hat man hiernach $h_2 = 0{,}294 \,.\, (45 : 90)\,(v^2 : 2g) = 0{,}147\,(v^2 : 2g)$, also ungefähr nur $^1/_7$ des Verlustes beim scharfen Knie von demselben Winkel.

Widerstände wegen plötzlicher Querschnittswechsel. Wenn Wasser in einer Röhrenleitung aus der Schnelle v_1 plötzlich in die Schnelle v übergehen muss, wie bei einer Leitung nach Fig. 1055 a, so verliert es einen Druck, welcher nach Weisbach gemessen wird durch die Höhe

$$h_3 = \frac{v_1^2 - v^2}{2g} = \left(\frac{F}{F_1} - 1\right)^2 \frac{v^2}{2g} = \zeta_3 \frac{v^2}{2g} \quad \cdot \cdot \quad (336)$$

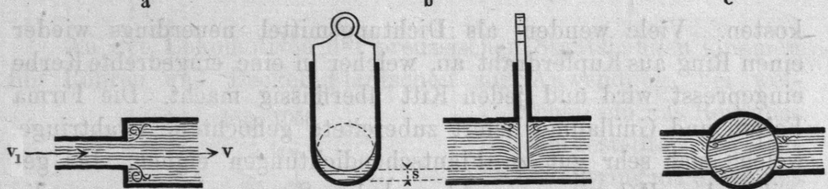
wenn die Querschnitte F und F_1 sind, also $Fv = F_1 v_1$. Verdoppelung des Querschnittes führt also schon einen Druckhöhenverlust $= v^2 : 2g$ herbei. Bei Schiebern in cylindrischen Röhren, Fig. 1055 *b*, Hähnen in ebensolchen Röhren, Fig. 1055 *e*, kommen auch Kontraktionswirkungen hinzu. Man soll setzen nach Weisbach für die genannten Schieber bei der:

Stellhöhe	$s =$	$^7/_8$	$^3/_4$	$^5/_8$	$^1/_2$	$^3/_8$	$^1/_4$	$^1/_8$
wobei	$F_1 : F =$	0,948	0,856	0,740	0,609	0,466	0,315	0,159
	$\zeta_3 =$	0,07	0,26	0,81	2,06	5,52	17,00	97,80

und beim Hahn, wenn der

Stellwinkel	$=$	10^0	20^0	30^0	40^0	50^0	60^0	65^0	$82^1/_8{}^0$
wo $F_1 : F$	$=$	0,850	0,692	0,535	0,385	0,250	0,137	0,091	0
ζ_3	$=$	0,29	1,56	5,47	17,3	52,6	206	486	∞.

Fig. 1055.



Aus diesen Zahlen geht hervor, von welchem bedeutenden Einfluss die Schieberkasten, Schlammfänge und ähnliche, eine Unstetigkeit verursachende Einbauten in Röhrenleitungen für die Wasserbewegung sind. Stets wird man suchen müssen, die Plötzlichkeit der Uebergänge zu mildern, durch eingeschaltete Kurven im Profil abzuschwächen, indem dadurch ein grosser Theil der Verluste vermieden werden kann. Für gasförmige Flüssigkeiten fallen die Verluste wegen der geringeren Massendichtigkeit beträchtlich geringer aus, verdienen aber immerhin Beachtung. Wegen anderweitiger Leitungswiderstände, so auch derjenigen, welche das Wasser in Kanälen und Flüssen erfährt, muss auf die Lehrbücher der Hydromechanik verwiesen werden.

§. 341.

Verbindungen für gusseiserne Röhren.

Eine sehr viel gebrauchte Verbindung gusseiserner Röhren ist die Flantschenverbindung Fig. 1056 (a. f. S.). Die anzuwendenden Verhältnisse sind in der Figur angegeben. Früher liess man zwischen den Schraubenlöchern und dem inneren Rande gewöhnlich eine Arbeitsleiste stehen; jetzt wird dieselbe meistens weg-