Nicht im Handel

Sonderabdruck aus Jahrgang 16, Heft 9/10, 1964

OESTERREICHISCHE WASSERWIRTSCHAFT

Schriftleiter: Professor Dipl.-Ing. Dr. J. Kar, Wien, XVIII., Gregor-Mendel-Straße 33 Springer-Verlag in Wien

Der Rohrleitungs-Rechenschieber der Wiener Wasserwerke und seine Anwendung auf die Formel von Prandtl-Colebrook

Von Dipl.-Ing. Heinrich Kühnel

Aus dem Institut für Kulturtechnik der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich
(Vorsteher Prof. DDr. H. Grubinger)

Mit 5 Textabbildungen

I. Einleitung

Von den zahlreichen Druckverlustformeln für die Bemessung von Rohrleitungen, welche bis 1930 entwickelt worden waren, konnte jede nur für einen bestimmten Rohrwerkstoff, Mengen- und Querschnittsbereich sowie Alterungszustand der Rohre angewendet werden. Man vergleiche hiezu die Zusammenstellung von Weyrauch-Strobel und Taute. Im Gebrauch waren diese Formeln unhandlich, Vergleichsrechnungen sehr zeitraubend und unsicher. In Wien wurden anläßlich der umfangreichen Netzberechnungen im Zusammenhang mit dem Bau der II. Wiener Hochquellenleitung von Bodenseher (1911) Meßreihen über Rohrreibungsverluste angestellt und nomographische Bemessungstafeln entworfen. Schließlich führten weitere Anpassungen zu der unter dem Namen „Wiener Formel" bekannten Druckverlustgleichung.

Die oben genannten Unzulänglichkeiten der diversen Formeln waren um 1930 Anlaß zu intensiven Untersuchungen im Rahmen des Deutschen Vereines von Gas- und Wasserfachmännern. Zahlreiche Autoren traten mit Versuchsergebnissen und theoretischen Arbeiten hervor. Es seien nur Strickler, Ludin, Ehrenberger und Götting genannt. Aus alledem kristallisierte der Gebrauch der Formeln von Strickler und Ludin. Die Wiener Formel, obschon 30 Jahre älter, stimmt mit diesen beiden sehr gut überein (Steinwender, 1941):

Strickler	$v = k_{St} \cdot R^{0,67} \cdot J^{0,50}$
Ludin	$v = k_L \cdot R^{0,65} \cdot J^{0,54}$
Wiener Formel	$v = k_W \cdot R^{0,66} \cdot J^{0,55}$

Der Wunsch, das Rohrnetzkalkül weiter zu beschleunigen, führte 1940 in Wien zu einem hydraulischen Rechenschieber, der auf der Wiener Reibungsverlustformel aufbaut (Steinwender, 1941).

$$I = 0{,}0017913 \cdot q^{1,8} \cdot d^{-4,8}.$$

Als besonderer Vorteil ist die dabei eingeführte „Stufenmarke" zu nennen, welche als veränderlicher Faktor die Anpassung an die verschiedenen Werkstoffrauhigkeiten ermöglicht. Darüber hinaus kann man durch Veränderung der Stufenmarken in meist engen Grenzen eine Korrektur für höhere Fließgeschwindigkeiten im gleichen Rohr erreichen.

Mit den Arbeiten von Prandtl, v. Kármán, Nikuradse usw. wurde ab 1935 die Kenntnis der Strömungszustände, ihre Kennzeichnung durch die Reynoldssche Zahl und der verschiedenen Arten von Wandrauhigkeit allgemein. Im Wasserleitungsfach herrscht die turbulente Strömung im sogenannten Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatt und hydraulisch rauh vor. Colebrook modifizierte die Prandtlschen Ansätze hiefür. Die Internationalen Wasserleitungskongresse 1952 in Paris und 1955 in London haben sodann beschlossen, die Druckabfallberechnung auf der wissenschaftlich fundierten Prandtl-Colebrookschen Formel aufzubauen und absolute Rauhigkeitswerte zu empfehlen. Der DVGW hat sodann 1957 entsprechende Druckabfalltafeln für Rohrquerschnitte 40 bis 2000 mm und k = 0,1 mm sowie k = 0,4 mm als Arbeitsblatt W 302 herausgegeben.

In Österreich ist seit 1946 auf Grund des Wasserbautenförderungsgesetzes und der zugehörigen Technischen Richtlinien des Bundesministeriums für Handel und Wiederaufbau die Verwendung des genannten hydraulischen Rechenschiebers obligatorisch, wenn es sich um Wasserversorgungsanlagen handelt, für welche eine Unterstützung aus Bundesmitteln beantragt wird. Damit ist die Frage aktuell, wie man mit dem Rechenschieber zu rechnen hätte, um der Colebrookschen Formel zu entsprechen. Durch die Anpassungsfähigkeit des Rechenschiebers ist dessen Anwendung auf die neue Fließformel möglich, was theoretisch nachgewiesen und an Rechenbeispielen vorgeführt werden soll.

II. Hydraulische Grundlagen

In der Grundgleichung von Bernoulli für die Strömung einer idealen Flüssigkeit

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{konstant}$$

wird der erste Ausdruck $\frac{v^2}{2g}$ als Geschwindigkeitshöhe bezeichnet. Der bei der Fließbewegung nicht idealer Flüssigkeiten auftretende Reibungsverlust wird durch einen Faktor k_1 mit dieser Geschwindigkeitshöhe in Beziehung gebracht (Kaufmann, 1931; Kozeny, 1953):

$$h_v = k_1 \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot L,$$

somit ist das Reibungsgefälle I

$$I = \frac{h_v}{L} = k_1 \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

In den obigen Gleichungen bedeuten:
v . . . . mittlere Strömungsgeschwindigkeit (m/s),
g . . . . Erdbeschleunigung (m/s²), für 45° Breite: $g = 9{,}81$ m/s²,
p . . . . hydrostatischer Druck (t/m²),
γ . . . . spezifisches Gewicht der Flüssigkeit (t/m³),
z . . . . topographische Höhe des betrachteten Flüssigkeitsteilchens (m),
L . . . . Länge der zurückgelegten Wegstrecke (m),
h_v . . . Reibungsverlusthöhe auf die Länge L (m).

Als Ursache für den Reibungsverlust wird nun die innere Flüssigkeitsreibung vernachlässigt und nur die Wandreibung herangezogen. Mit dieser Annahme ist der Widerstand und damit das Reibungsgefälle direkt proportional dem benetzten Umfang U und verkehrt proportional der durchflossenen Querschnittsfläche F. Für das Kreisrohr gilt:

$$k_1 = \frac{U}{F} \cdot k_2 = \frac{d\pi}{d^2 \frac{\pi}{4}} \cdot k_2 = \frac{4}{d} \cdot k_2,$$

somit ergibt sich für das Reibungsgefälle I im Kreisrohr mit der Vereinfachung

$$4\,k_2 = \lambda = d \,.\, k_1$$

$$I = \lambda \cdot \frac{v^2}{2g\,.\,d}. \qquad (1)$$

Der Wert λ ist dimensionslos und abhängig von der Strömungsform. Im laminaren Bereich ($Re < 2320$) gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

Für den praktisch weitaus bedeutenderen turbulenten Strömungsbereich gilt die Formel von Prandtl-Colebrook:

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

Es bedeutet:
I . . . . das Reibungsgefälle,
Re . . . die Reynoldssche Zahl: $Re = \frac{v\,.\,d}{\nu}$,
ν . . . . die kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums, für Wasser von 10° C: $\nu = 1{,}31\,.\,10^{-6}$ m²/s,
d . . . . lichter Rohrdurchmesser (m),
k . . . . mittlere wirksame Wandrauhigkeit (m),
$\frac{k}{d}$ . . . relative Rauhigkeit.

In Tab. 1 sind die vom 3. Internationalen Wasserkongreß London 1955 empfohlenen Rauhigkeitswerte für eine Reihe von Rohrmaterialien wiedergegeben. (Entnommen dem DVGW Arbeitsblatt W 302.)

Tabelle 1

Neuwertige Rohrarten	k in mm
Unisoliertes Gußrohr	0,25
Isoliertes Gußrohr	0,125
Isoliertes Schleudergußrohr	0,05
Verzinktes Stahlrohr	0,125
Schmiedeeisernes Stahlrohr	0,05
Isoliertes Stahlrohr	0,05
Unisoliertes Stahlrohr	0,04
Unisoliertes Asbestzementrohr	0,025
Isoliertes Asbestzementrohr	glatt
Geschleuderte Zementisolierung I	glatt
Geschleuderte Zementisolierung II	0,4
Geschleuderte Bitumenisolierung I	glatt
Geschleuderte Bitumenisolierung II	0,125
Glattes Rohr (Nichtmetallrohre, gezogen, Kunststoffrohre)	glatt
Spannbetonrohre (Freyssinet)	0,04
Spannbetonrohre (Bonna, Socoman)	0,25
Rohre mit Nachisolierung (Zement)	0,50

III. Der hydraulische Rechenschieber der Wiener Wasserwerke[1]

Die Wiener Reibungsverlustformel, auf welcher der Rechenschieber aufgebaut ist, wurde aus folgender allgemeiner Formel entwickelt:

$$I = \frac{\lambda^* \cdot q^2}{d^5}.$$

Es bedeutet:

λ^* . . . Beiwert, nicht identisch mit λ in den Gln. (1) bis (2),
q . . . Durchflußmenge (m^3/s).

Diese Formel entspricht im Aufbau der Gl. (1), was sofort deutlich sichtbar wird, wenn man die Durchflußmenge durch das Produkt von Geschwindigkeit mal Querschnittsfläche ersetzt:

$$q = v \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4}, \tag{3}$$

$$I = \frac{\lambda^* \cdot \pi^2}{16} \cdot \frac{v^2}{d}.$$

Dem Wert $\frac{\lambda}{2g}$ der Gl. (1) entspricht hier der Ausdruck $\frac{\lambda^* \cdot \pi^2}{16}$. Zur Ermittlung des Wertes λ^* wurden Messungen an gebrauchten Gußrohren angestellt. Man fand:

$$\lambda^* = \frac{a}{v^{0,2} \cdot d^{0,2}},$$

wobei a für gebrauchte Gußrohre konstant blieb: $a = 0{,}00188$. Nun konnte die Gleichung für I aufgestellt werden, man fand nach Umformung

$$I = \frac{a \cdot \pi^{0,2}}{4^{0,2}} \cdot \frac{q^{1,8}}{d^{4,8}}.$$

Weiter vereinfacht mit

$$\frac{a \cdot \pi^{0,2}}{4^{0,2}} = \alpha$$

lautet die Druckverlustgleichung nun

$$I = \alpha \cdot \frac{q^{1,8}}{d^{4,8}}. \tag{4}$$

Für $a = 0{,}00188$ (gebrauchte Gußrohre) ist $\alpha = 0{,}0017913 = \alpha_4$, weil es auf dem Rechenschieber der Stufenmarke 4 entspricht. Damit lautet die **Wiener Formel** nun so, wie sie schon vorweg angegeben wurde:

$$I = 0{,}0017913 \cdot q^{1,8} \cdot d^{-4,8}.$$

Die Gl. (4) eignet sich in logarithmierter Form für die Konstruktion des Rechenschiebers.

$$\lg I = \lg \alpha + 1{,}8 \lg q - 4{,}8 \lg d$$

Abb. 1 zeigt als Schema die Anordnung dieser 4 Logarithmenwerte auf den 4 Skalen des Rechenschiebers.

Wie oben gezeigt, wurde für gebrauchte Gußrohre $\alpha_4 = 0{,}0017913$ ermittelt und die entsprechende Stelle auf der Skala 3 des Rechenschiebers willkürlich mit „Stufenmarke 4" bezeichnet.

Bei späteren Messungen an Stahlrohren kleinerer Durchmesser wurde ein anderer Wert für α ermittelt: $\alpha_2 = 0{,}00119$. Die entsprechende Stelle

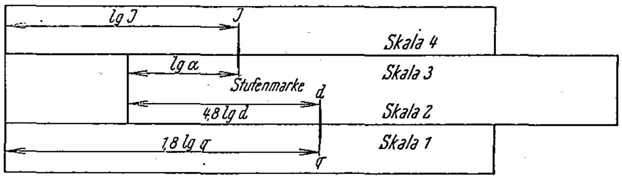


Abb. 1. Schemaskizze des hydraulischen Rechenschiebers

auf Skala 3 wurde mit „Stufenmarke 2" bezeichnet und die Stufenmarkenskala durch lineare Unterteilung und Verlängerung nach beiden Seiten vervollständigt.

IV. Die allgemeine Rechenschiebergleichung für die Stufenmarke m und ihre Anwendung auf die Prandtl-Colebrooksche Formel

Die lineare Einteilung der Stufenmarken auf der Skala 3 des Rechenschiebers hat zur Folge, daß die Stufenmarken dem Werte nach eine geometrische Reihe darstellen. Der Faktor dieser Reihe läßt sich bestimmen aus:

$$f = \sqrt{\frac{\alpha_4}{\alpha_2}} = \sqrt{\frac{0{,}0017913}{0{,}00119}} = \sqrt{1{,}505294} = 1{,}2269. \tag{5}$$

Damit ergibt sich das α_0 für die Stufenmarke 0:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_2}{f^2} = 0{,}0007905 = \frac{\alpha_4}{f^4}$$

und alle übrigen α_m für die Stufenmarke m nach

$$\alpha_m = \alpha_0 \cdot f^m.$$

Die allgemeine Rechenschiebergleichung für die Stufenmarke m lautet daher analog der Gl. (4):

$$I = \alpha_m \cdot \frac{q^{1,8}}{d^{4,8}} = \alpha_0 \cdot f^m \cdot \frac{q^{1,8}}{d^{4,8}}. \tag{6}$$

Nun kann man die Beziehung zur allgemeinen Gl. (1) herstellen. Zunächst ersetzt man q nach Gl. (3) durch v und d, alsdann setzt man die beiden Gleichungen identisch:

$$I = \frac{\alpha_0 \cdot \pi^{1,8}}{4^{1,8}} \cdot f^m \cdot \frac{v^{1,8}}{d^{1,2}}. \tag{7}$$

$$I = 0{,}0005118 \cdot f^m \cdot \frac{v^{1,8}}{d^{1,2}} \equiv \lambda \cdot \frac{v^2}{2gd}.$$

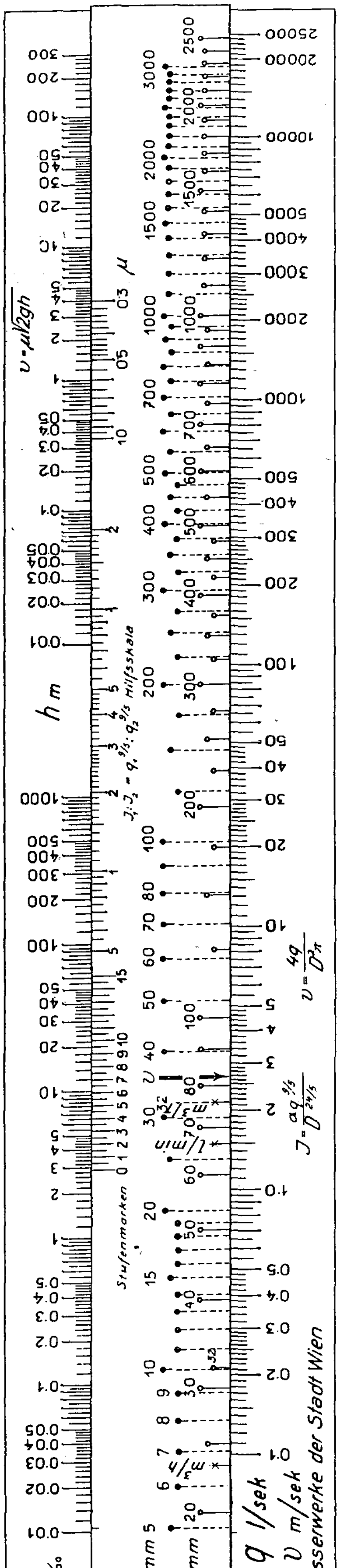
Nach kurzer Berechnung erhält man schließlich

$$m = 22{,}5 + 11{,}26 \cdot [\lg \lambda + 0{,}2 \lg (v \cdot d)], \tag{8}$$

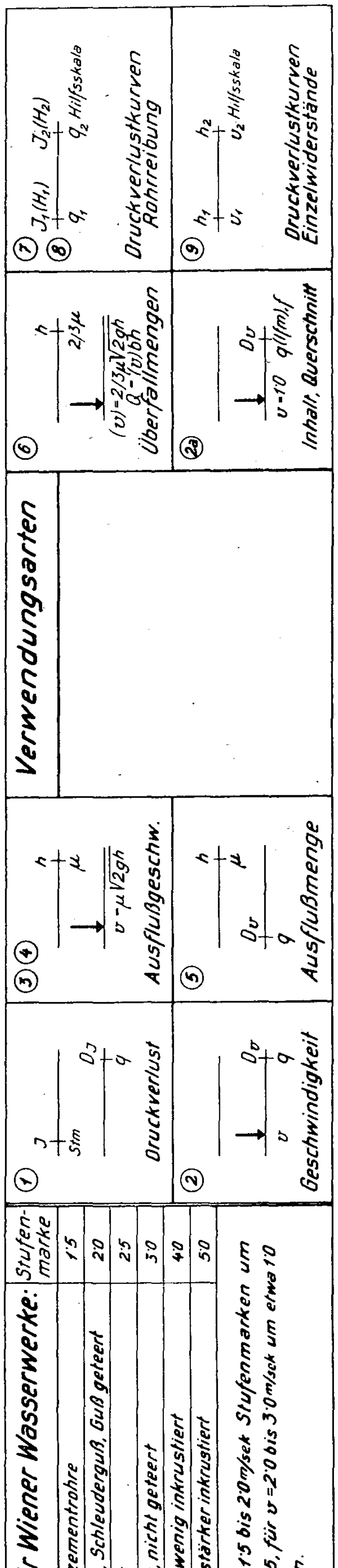
wobei für λ der Ansatz von **Prandtl-Colebrook**, Gl. (2), gilt.

Mit diesen beiden Gleichungen ist theoretisch die Aufgabe erfüllt und genau definiert, welche Stufen-

[1] Wasserwerke der Statdt Wien, Wien VI, Grabnergasse 6.



Vorderseite



Rückseite

Abb. 2. Der Rechenschieber der Wiener Wasserwerke[1] marke am hydraulischen Rechenschieber jeweils zur Berechnung nach Prandtl-Colebrook zu verwenden ist. Für eine möglichst einfache praktische

Für eine Reihe von λ-Werten wird nach Gl. (10) der Wert v.d ausgerechnet und das Ergebnis sofort in Gl. (8) weiterverwendet. Das Endergebnis,

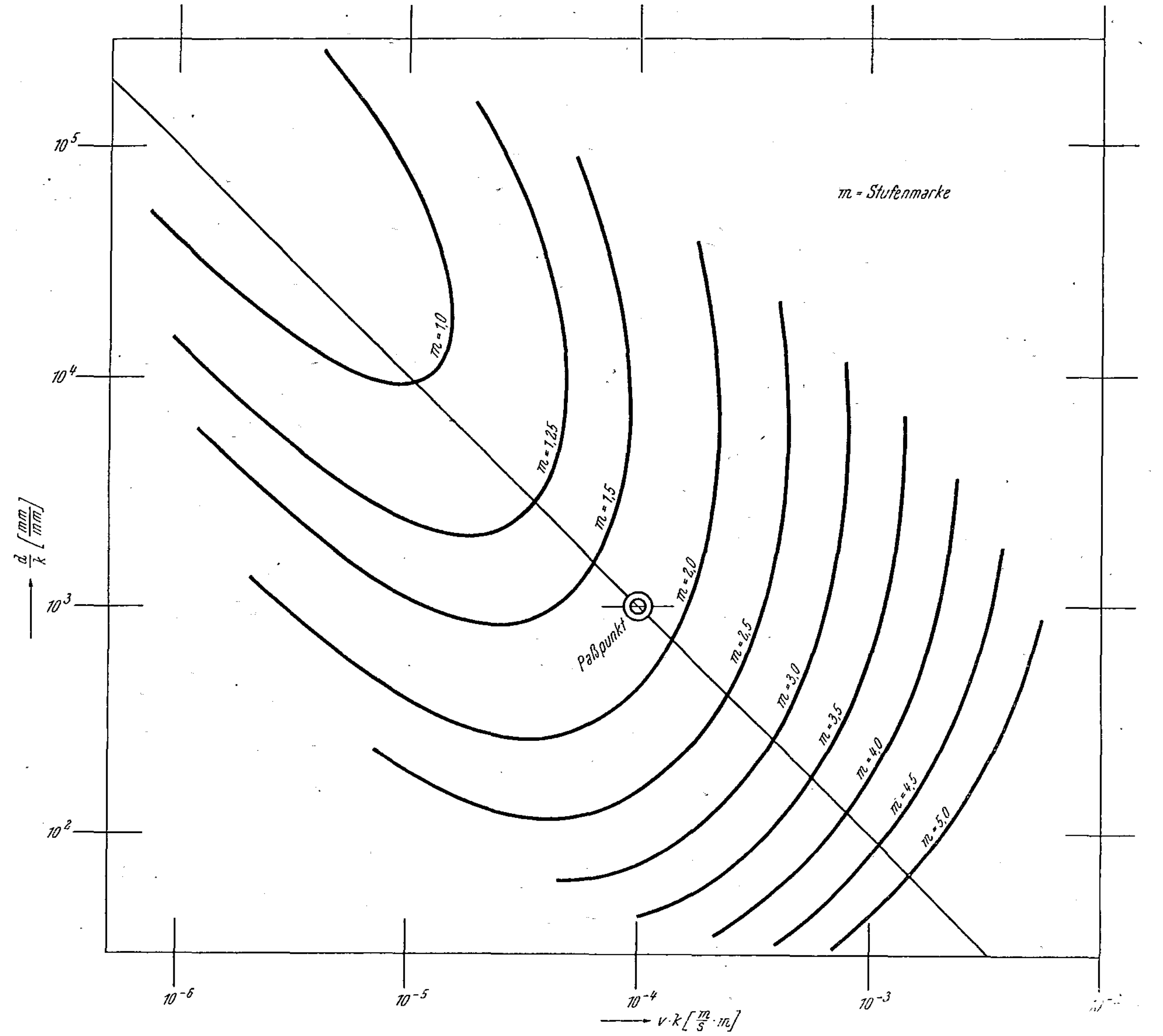


Abb. 3. Stufenmarke m im Übergangsbereich, abhängig von d/k und v.k (im Original auf Transparentpapier gezeichnet)

Handhabung wird eine Regel aufzustellen sein, deren Ableitung im folgenden noch gezeigt wird.

Glatter Bereich (k = 0): Hier entfällt das letzte Glied in Gl. (2) und es heißt dann:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{2,51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}. \tag{9}$$

Für Wasser von 10° C ist die Reynoldssche Zahl $\mathrm{Re} = \frac{v.d}{1,31.10^{-6}}$, es ergibt sich damit nach Umformen und Entlogarithmieren

$$10^{-\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} = \frac{3,288.10^{-6}}{v.d.\sqrt{\lambda}}.$$

Nun wird nach v.d aufgelöst

$$v.d_{(k=0)} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot 10^{\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}} .3,288.10^{-6} \tag{10}$$

die Stufenmarke m, ist also nur vom Produkt v.d abhängig. Man erhält zunächst unrunde Werte für m, die runden Werte von m ermittelt man daraus graphisch. Bei der Darstellung in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem mit v und d als Koordinaten erhält man diagonal verlaufende parallele Gerade. Das Produkt d.v = 0,24 m²/s liefert für m ein Minimum $m_{min} \doteq 0,855$ (mit der Genauigkeit der graphischen Ermittlung). Für größere und kleinere Produkte von d.v ist die Stufenmarke stets höher. Die Stufenmarke $m_{min} \doteq 0,855$ wird auch bei $k > 0$ nicht unterschritten. Der glatte Bereich ist ein Grenzfall von nicht allzu großer Bedeutung für die Praxis.

Übergangsbereich von glatt zu rauh ($k > 0$): Für die Praxis ist dieser Bereich von größter Bedeutung, weil er fast alle praktisch vorkommenden Fälle umfaßt. Die Berechnung ist hier umfangreicher, weil auch das k variiert werden muß. Um eine Kurvenschar von runden m-Werten zu erhalten, wählt man in der Gl. (8) λ und m und löst nach v.d auf:

$$v \cdot d = 10^{[(m-22,5)\cdot 0,0888 - \lg \lambda]\cdot 5} \tag{11}$$

v.d setzt man in die Gl. (2) ein und löst nach $\frac{k}{d}$ auf zufolge

$$\frac{k}{d} = \frac{3,71}{10^{\frac{1}{2\sqrt{\lambda}}}} - \frac{1,22 \cdot 10^{-5}}{v \cdot d \cdot \sqrt{\lambda}}. \tag{12}$$

Nun bildet man noch

$$v \cdot k = v \cdot d \cdot \frac{k}{d} \tag{13}$$

und

$$\frac{d}{k} = \frac{1}{\frac{k}{d}} \tag{14}$$

und ist damit am Ziel. Die beiden zuletzt gebildeten Werte werden auf einem doppelt logarithmischen Papier als Koordinaten aufgetragen. Sie enthalten beide den absoluten Rauhigkeitswert k und gestatten ein Anpassung an jeden Wert von k in einfachster Weise durch Koordinatenverschiebung.

V. Praktische Berechnung und Auswertung

Der Bereich, für den die Berechnung erfolgte, wurde nach Gesichtspunkten der Wasserleitungspraxis festgelegt:

v	von	0,1	bis	3,0 m/s,
d	von	40	bis	1500 mm,
k	von	0,025	bis	0,5 mm,

daher:

λ	von	0,01	bis	0,05
m	von	1,0	bis	5,0.

Nach Ausrechnung der Werte für den angegebenen Bereich nach den Gln. (11) bis (14) wurde für jede Stufe von m (Stufenmarke) eine Kurve in dem aus v.k und $\frac{d}{k}$ gebildeten doppeltlogarithmischen Koordinatensystem gezeichnet. Dies erfolgte auf durchsichtigem Papier, um die gewünschte Koordinatenverschiebung durchführen zu können

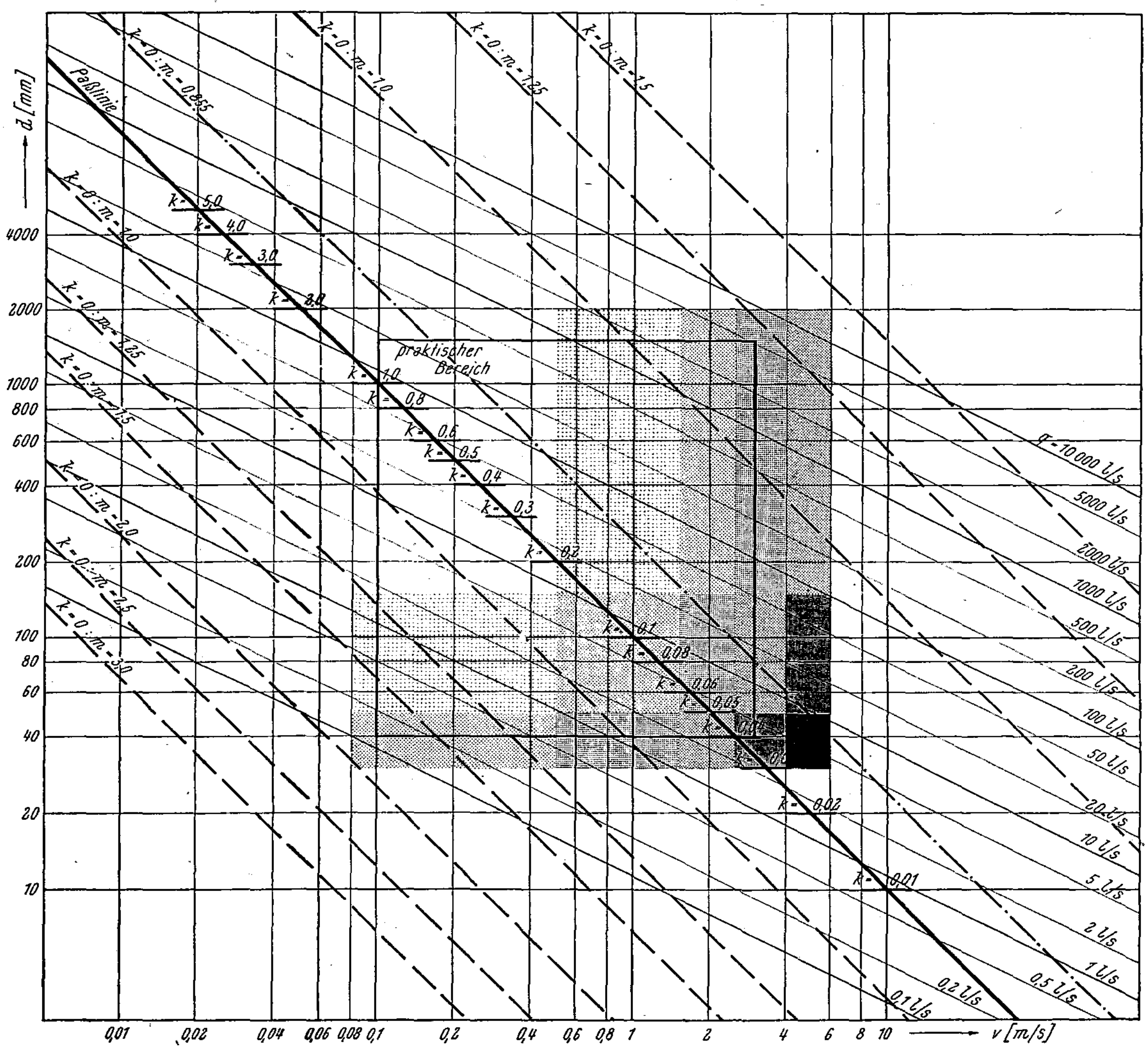


Abb. 4. **Koordinatenblatt** für die Bestimmung der Stufenmarke mit Hilfe von Diagramm Abb. 3

(wiedergegeben in Abb. 3). Auf einem Blatt mit doppeltlogarithmischer Teilung von gleicher Einheitsgröße wurden die Koordinatenachsen mit v und d beschriftet (Abb. 4) und für zwei verschiedene Werte von k die beiden Blätter übereinanderzuerst die Geschwindigkeit v ausrechnen zu müssen, wurde auf dem Koordinatenblatt das Netz für q ergänzt.

Auf dem Koordinatenblatt kann auch für glatte Rohre (k = 0) die Linienschar der Stufenmar-

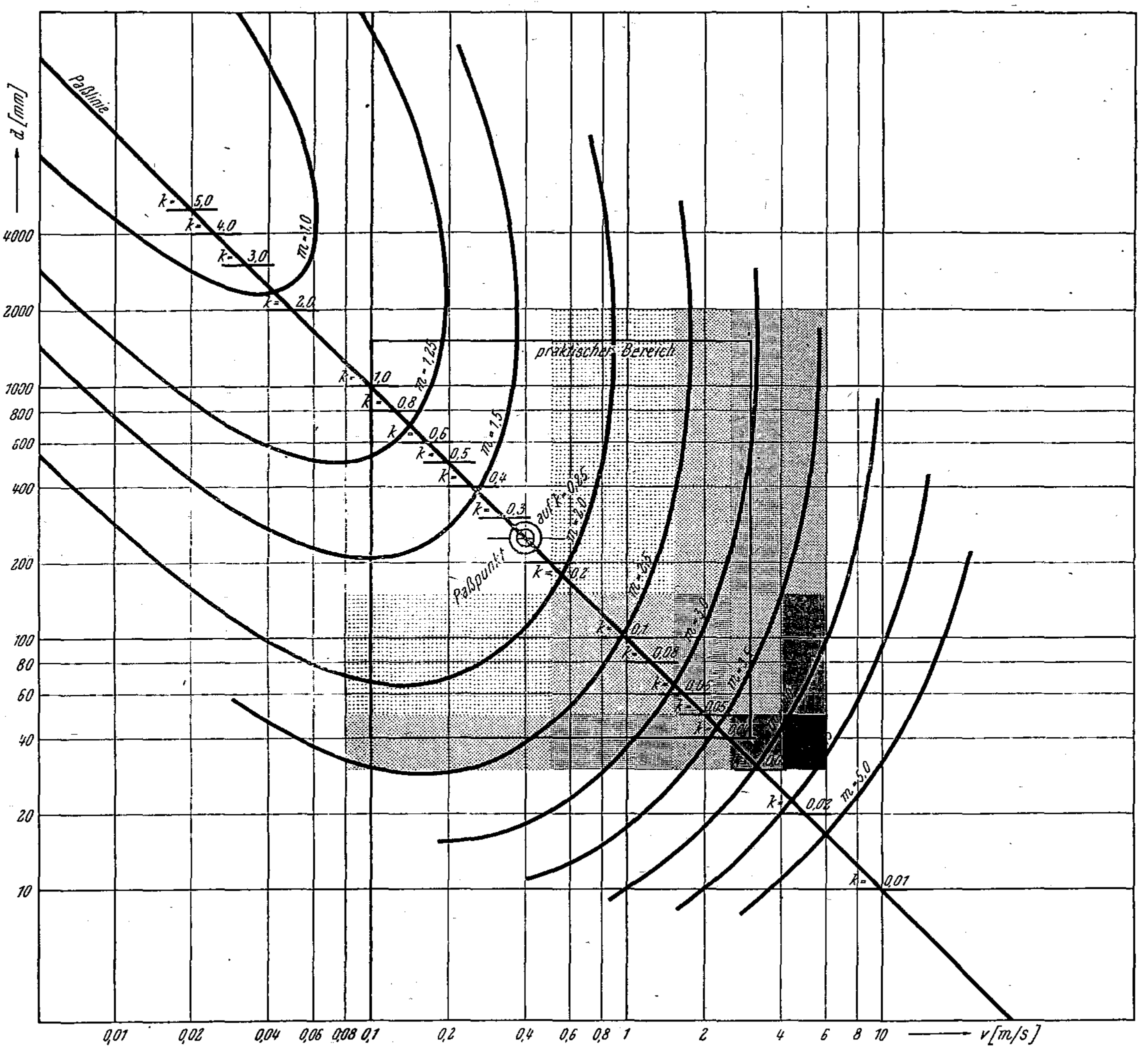


Abb. 5. Beispiel für die Bestimmung der Stufenmarke bei k = 0,25 (die Linien für q und für m bei k = 0 wurden zwecks besserer Übersicht hier weggelassen)

dergepaßt. Nun war es leicht, auf dem Koordinatenblatt in der Richtung der Koordinatenverschiebung (diagonal) eine Paßlinie zu zeichnen und ihr auf dem Deckblatt einen Paßpunkt zuzuordnen. Vorteilhafterweise wurde er so gewählt, daß die Skalenteilung für d in Metern, auf die Paßlinie projiziert, dort mit der Einteilung für das k in mm zusammenfällt. Für einen beliebigen gewünschten k-Wert wird das Deckblatt mit dem Paßpunkt über den entsprechenden Wert der k-Teilung auf der Paßlinie gebracht (in Abb. 5 für k = 0,25 dargestellt). Man kann nun für jeden Rohrdurchmesser und jede Geschwindigkeit diejenige Stufenmarke ablesen, welche auf dem hydraulischen Rechenschieber das Reibungsgefälle nach der Formel von **Prandtl-Colebrook** liefert. Um bei gegebener Durchflußmenge q nicht ken eingezeichnet werden. Man sieht dann, daß sich diese zu denen des rauhen Bereiches wie Asymptoten verhalten.

Der Vorzug dieser Methode liegt darin, daß man für jeden beliebigen Wert von k ohne großen Aufwand den Druckverlust berechnen kann, während verschiedene Nomogramme und Netztafeln immer nur für einen einzigen Rauhigkeitswert gelten.

Für das schnelle Rechnen in der Praxis, das nicht immer ganz genau sein muß, sondern gerne Reserven in die Rechnung hineinnimmt, wird das Verfahren entscheidend vereinfacht, indem man für einzelne Rauhigkeitsbereiche eine Grund-Stufenmarke festsetzt und diese für steigende Geschwindigkeiten und abnehmende Rohrdurchmesser stufenweise erhöht. Die **Grund-Stufenmar-**

ken und deren Erhöhungen sind in den Tab. 2 und 3 übersichtlich zusammengestellt. Diese könnten dann auch auf der Rückseite des Rechenschiebers angebracht werden, wo sie die bisherige Anweisung für die Wahl der Stufenmarken ersetzen würden. In den Abb. 4 und 5 sind die Erhöhungsstufen durch Grautöne ebenfalls angedeutet und man kann in Abb. 5 gut verfolgen, mit welcher Genauigkeit die Schar der m-Kurven durch die Anweisung umschrieben wird.

Tabelle 2. Grund-Stufenmarken und Erhöhungsbeträge für Rauhigkeitsbereiche

k in mm	Rohrmaterial (nach DVGW Arbeitsblatt W 302)	Grund-Stufenmarke*	Erhöhungsbetrag**
bis 0,03	Glattes Rohr, geschleuderte Zement- oder Bitumenisolierung I, Asbestzementrohr...	1,0	+0,25
bis 0,06	Stahl: isoliert, unisoliert, schmiedeeisern, Spannbeton (Freyssinet), isolierter Schleuderguß..................	1,25	+0,25
bis 0,13	Isoliertes Gußrohr, verzinktes Stahlrohr, geschleuderte Bitumenisolierung II	1,5	+0,5
bis 0,25	Unisoliertes Gußrohr, Spannbetonrohre (Bonna, Socoman)	2,0	+0,5
bis 0,4	Geschleuderte Zementisolierung II	2,5	+0,5
bis 0,6	Rohre mit Nachisolierung (Zement)	3,0	+0,5
bis 0,8		3,0	+1,0
bis 1,5		4,0	+1,0

* Die Grund-Stufenmarke ohne Erhöhung ist auf den Bereich $v < 0{,}5$ m/s und $d > 150$ mm beschränkt.

** Die Angabe, wie oft der Erhöhungsbetrag zur Grund-Stufenmarke hinzuaddiert wird, findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3. Anzahl der Erhöhungen der Grund-Stufenmarken um den Erhöhungsbetrag in Abhängigkeit von Geschwindigkeit v und Rohrdurchmesser d

v (m/s)	d (mm) > 150	150 – 50	50 >
	0 mal	1 mal	2 mal
0,5			
	1 mal	2 mal	3 mal
1,5			
	2 mal	3 mal	4 mal
2,5			
	3 mal	4 mal	5 mal
4,0			
	4 mal	5 mal	6 mal

Berechnungsbeispiel:

Unisoliertes Gußrohr, $d = 70$ mm, $q = 8{,}4$ l/s; daher $v = 2{,}2$ m/s
$k = 0{,}25$ mm, daher Grund-Stufenmarke 2,0

Erhöhung wegen $v \begin{matrix} >1{,}5 \text{ m/s} \\ <2{,}5 \text{ m/s} \end{matrix}$ und $d \begin{matrix} <150 \text{ mm} \\ > 50 \text{ mm} \end{matrix}$: $+0{,}5 \cdot 3 = \underline{+1{,}5}$

daher Stufenmarke .... $\underline{\underline{3{,}5}}$

Reibungsverlust mit hydraulischem Rechenschieber:
$I = 100\,‰ = 10\,\%$

VI. Genauigkeit

Abgesehen von Fehlern beim Einstellen und Ablesen des Rechenschiebers treten Ungenauigkeiten zufolge der abgestuften, tabellarisch aufgestellten Benützungsanweisung auf. Im folgenden sei nun für drei verschiedene Rohrmaterialien eine kurze Gegenüberstellung der Fehlbereiche gegeben, welche bei Benützung des hydraulischen Rechenschiebers nach der bisherigen und nach der oben angegebenen Anweisung entstehen. Die Angabe des Fehlers erfolgt in Tab. 4 zunächst als Fehler in der Stufenmarke Δm und jeweils darunter umgerechnet in Prozent. Die Umrechnung erfolgt nach:

$$\text{Fehler in } \% = 100 \cdot (f^{\Delta m} - 1),$$

Tabelle 4. Gegenüberstellung der Fehler, die bei Berechnung des Druckverlustes mit dem hydraulischen Rechenschieber nach der bisherigen Anweisung und nach der hier abgeleiteten Anweisung auftreten
Es wurde jeweils für drei verschiedene Rohrwerkstoffe die untere und obere Fehlergrenze erfaßt, die nach den Anweisungen vorkommen kann. Außerdem wurde der durchschnittliche Fehler geschätzt.

Rohrwerkstoff	Nach bisheriger Anweisung					Nach neuer Anweisung				
	Grund-Stufenmarke	Δ m / %	untere Fehlergrenze	durchschnittlicher Fehler	obere Fehlergrenze	Grund-Stufenmarke	Δ m / %	untere Fehlergrenze	durchschnittlicher Fehler	obere Fehlergrenze
Asbestzementrohr k = 0,025 mm	1,5	Δ m	+ 0,2	+ 0,7	+ 1,25	1,0	Δ m	− 0,25	+ 0,25	+ 0,75
		%	+ 4 %	+ 15 %	+ 29 %		%	− 5 %	+ 5 %	+ 17 %
Stahlrohr, neu k = 0,05 mm	2,0	Δ m	+ 0,75	+ 0,9	+ 1,45	1,25	Δ m	− 0,1	+ 0,25	+ 0,6
		%	+ 17 %	+ 20 %	+ 35 %		%	− 2 %	+ 5 %	+ 13 %
Gußrohr, neu, nicht geteert, k = 0,25 mm	3,0	Δ m	− 0,2	+ 0,95	+ 1,75	2,0	Δ m	− 0,2	+ 0,45	+ 1,05
		%	− 4 %	+ 21 %	+ 43 %		%	− 4 %	+ 10 %	+ 24 %

weil die Hinaufsetzung der Stufenmarke um 1,0 der Multiplikation mit dem Faktor f = 1,2269 gleichkommt [Kapitel IV, Gl. (5)]. Die Verschiebung um eine halbe Stufe entspricht 10,8 %, um eine ganze Stufe 22,7 %, um zwei Stufen 50,5 %.

Für alte, inkrustierte Gußrohre ist es besonders schwierig, eine Anleitung aufzustellen, weil durch die Inkrustierung nicht nur eine Vergrößerung der Wandrauhigkeit eintritt, sondern auch eine Abnahme der durchströmten Querschnittsflächen und damit bei gleichbleibendem Durchfluß eine Geschwindigkeitserhöhung. Diese bewirkt aber sofort eine erhebliche Vergrößerung des Druckverlustes. Wenn man also mit inkrustierten Rohren zu tun hat, wird man zunächst durch (Geschwindigkeits- und Mengen-) Messungen das Ausmaß der Flächenverkleinerung feststellen müssen. Dann erst kann man unter Zugrundelegung verkleinerter Rohrdurchmesser durch weitere Versuche für einige Fälle die auftretenden Druckverluste bestimmen und daraus die anzuwendende Stufenmarke oder den durchschnittlichen Wert der Wandrauhigkeit ermitteln. Die auf der Rückseite des Rechenschiebers angegebenen Stufenmarken für „Guß alt, wenig inkrustiert“ m = 4,0 und „Guß alt, stärker inkrustiert“ m = 5,0 können wohl nur für recht überschlägige Berechnungen herangezogen werden, wie auch die mit zunehmender Stufenmarke immer breiter werdende Fehlerstreuung in Tab. 4 erkennen läßt.

Literatur

Bodarwé, H.: Ein Beitrag zur Planungsmethodik von Wasserversorgungsnetzen unter Berücksichtigung neuerer naturwissenschaftlich-technischer Erkenntnisse. Aachen: TH Diss. 1960. — Bodenseher, E.: Ein graphisches Verfahren zur Berechnung der Wasserleitungsrohrnetze. Z. Öst. Ing. u. Arch. Ver., 63, 113/118, 129/135, 353/356, 371/379. 1911. — DVGW-Arbeitsblatt W 302: Druckabfalltafeln für Rohrdurchmesser von 40—2000 mm. 1957. — Götting, H.: Rohrschutz und Bemessung von Trinkwasserleitungen. GWF, 84, 196/203, 1941. — Helmich-Weidemann, K.: Der neue Rechenschieber der Wiener Wasserwerke. Gas-Wasser-Wärme, 1. Bd., 5. Heft, S. 87/97, 1947. (Ebenso dem Rechenschieber beigegebene Gebrauchsanleitung; 2. Aufl. Wasserwerke der Stadt Wien, Wien VI, Grabnergasse 6). — Hünerberg, K.: Das Asbestzement-Druckrohr. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1963. — Kaufmann, W.: Hydromechanik, 2 Bände, I: 89. Berlin: Springer-Verlag 1931, 1934. — Kozeny, J.: Hydraulik. S. 101. Wien: Springer-Verlag 1953. — Richter, H.: Rohrhydraulik. 4. Aufl. Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag 1962. — Steinwender, A.: Der Rechenschieber der Wiener Wasserwerke. GWF, 84, 312/316, 1941. — Taute, R.: Über die Berechnung des Druckverlustes von Wasserrohrleitungen. GWF, 80, 268/272, 285/290, 1937. — Trüeb, E.: Druckverlustberechnung mit Hilfe der Formel von Prandtl-Colebrook. Schweiz. Zeitschrift f. Verm., Kulturtechnik und Photogrammetrie, 59, 142/170, 1961. — Weyrauch-Strobel: Hydraulisches Rechnen. 6. Aufl. Stuttgart: Wittwer, 1930. — Wierz, M.: Berechnungstafeln für Rohrnetze. Berlin: VEB Verlag Technik, 1959.

Printed in Austria