

Die historische Entwicklung der Fließformel

Autor(en): **Hager, Willi H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **112 (1994)**

Heft 9

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78397>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die historische Entwicklung der Fliessformel

Die Experimente von Darcy und Bazin (1865) lösten eine umfassende Entwicklung der Fliessformel in Druckrohren und Kanälen aus. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit massgebenden Untersuchungen zwischen 1867 und 1897 und zeichnet insbesondere die Beiträge von Gauckler, Kutter, Frank und Bazin nach. Die amerikanischen Studien werden ebenfalls kritisch gewürdigt.

Rohrströmungen lassen sich hinsichtlich der Verlustberechnung heute genügend genau durch das Widerstands-

VON WILLI H. HAGER,
ZÜRICH

gesetz von Colebrook-White (1937) erfassen. Es ist das Verdienst dieser zwei Briten, vorerst zwischen sandrauhem und kommerziell rauhen Rohren unterschieden zu haben, dann letztere auf ein Rauheitsmass k_s nach Nikuradse – die sogenannte äquivalente Sandrauhigkeit – bezogen zu haben und schliesslich das universelle Fliessgesetz einzuführen (Colebrook 1938). Dieses verbindet den Widerstandsbeiwert λ in der Rohrreibungsformel

$$(1) \quad J_f = \lambda \frac{V^2}{2g} \frac{1}{4R_h}$$

mit dem Reibungsgefälle J_f bzw. dem Sohlgefälle J_s bei Normalabfluss in offenen Gerinnen, der Geschwindigkeitshöhe $V^2/(2g)$ und dem hydraulischen Radius R_h bzw. dem Rohrdurchmesser $D=4R_h$. Der Widerstandsbeiwert von Strömungen in kommerziell rauhen Rohren und in Kanälen hängt ab von der relativen Rauheit $\epsilon=k_s/D$ bzw. $\epsilon=k_s/(4R_h)$ und von der Reynoldszahl $R=VD/\nu$ mit ν als kinematische Viskosität. Das universelle Fliessgesetz

$$(2) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7} + \frac{2.51}{R\sqrt{\lambda}} \right]$$

verbindet in linearer Weise die von Prandtl-von Karman aufgestellte Beziehung für das turbulent glatte Regime mit dem von Nikuradse aufgestellten Gesetz für das turbulent rauhe Regime. Es gilt demnach asymptotisch sowohl für $2.51(R\sqrt{\lambda}) \gg \epsilon/3.7$ bei glattem Rohr als auch für den umgekehrten Fall bei rauher Strömung. Zudem beschreibt es den Übergang vom turbulent glatten zum turbulent rauhen Regime und wird deshalb heute als eine *universelle Beziehung* betrachtet.

Der Weg bis zu dieser heute verbindlichen und allgemein akzeptierten Gleichung war jedoch lang. Obwohl die erste Widerstandsgleichung

$$(3) \quad V = C \sqrt{JR_h}$$

bereits von Albert Brahms (1692–1758) im Jahre 1757 vorgeschlagen und durch Antoine de Chezy (1718–1798) im Jahre 1768 formuliert wurde (Forchheimer, 1914; Rouse und Ince, 1957), verstrichen vorerst rund 100 Jahre, bis die ersten seriösen Beziehungen aufgestellt wurden. Dieser Umstand ist hauptsächlich dem hydraulischen Versuchswesen zuzuschreiben. In der Tat wurden bis heute alle Widerstandsgleichungen empirisch unter Zuhilfenahme der Dimensionsanalyse und der Ähnlichkeitsgesetze aus physikalischen Messungen abgeleitet. Mit der Qualität der Messungen stand und fiel also auch die Qualität der Fliessgesetze. Messungen in Bächen oder Flüssen, welche hauptsächlich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden, waren wenig verlässlich. Zu ungenau liess sich der Durchfluss und das Gefälle messen, und zu ungenau war die Rohr- oder Kanalgeometrie definiert.

Auch führten die teils theoretischen, teils experimentellen Erkenntnisse von Reynolds (1883) nur langsam zu einer umfassenderen Kenntnis der Fliessvorgänge in Röhren und Kanälen der Praxis. Seine herausragenden Leistungen sind an anderer Stelle ausführlich gewürdigt (Allen 1970) und sollen deshalb hier nicht besprochen werden. Dasselbe gilt für die theoretischen Arbeiten von Boussinesq und Couette. Sie passen zudem schlecht in die damalige Welt der praktischen Rohrhydraulik und haben bis um 1910 keinen bedeutenden Widerhall gefunden.

Erste verlässliche Messungen

Es war die geniale Idee von Darcy (1803–1858), im Zuge der Sanierung der

Trinkwasserleitungen von Dijon auch Experimente in Druckrohren durchzuführen und damit die Strömungsverluste zu ermitteln (Darcy 1857, 1858). Daraus ergab sich als wichtigstes Resultat die Abhängigkeit des Druckverlustes vom Rohrmaterial und dessen Oberflächenzustand, also der Wandrauhigkeit. In der zweiten Arbeitsphase, bei der Henri Bazin (1829–1917) nach dem Tode von Darcy die Federführung übernahm, wurden offene Kanäle in einem speziell hergerichteten, freien Laborgelände untersucht und damit die ersten systematischen Modellversuche auf diesem Gebiet durchgeführt. Obwohl aus dieser Untersuchung auch die erste, später verbesserte Fliessformel nach Bazin hervorging, stellte die ausführliche Zusammenstellung von Hunderten von Versuchen, deren exakte Beschreibung und die Vielfalt der untersuchten Geometrien ein Meisterwerk der experimentellen Hydraulik dar (Darcy und Bazin 1865). Neben der erwähnten Fliessformel gelang Bazin auch die Aufstellung einer Beziehung für die Geschwindigkeitsverteilung in der Kanalachse.

Die Messwerte von Darcy und Bazin (1865) gaben nun Anlass zu einer umfangreichen Datenanalyse, gefolgt von einer Anzahl von Fliessformeln. Die erste stammte von Gauckler (1867) und wurde später durch Manning (1889) wiederum propagiert. 1923 dann konnte Strickler anhand eines reichen Datenmaterials die ursprünglich von Gauckler aufgestellte Beziehung definitiv empfehlen. Bekanntlich stellt diese Gauckler-Manning-Strickler-Formel (GMS-Formel) einen Spezialfall der Gln.(1) und (2) dar, nämlich für Abflüsse in turbulent rauhem Regime bei mittleren relativen Rauigkeiten $5 \cdot 10^{-4} < \epsilon < 5 \cdot 10^{-2}$ (Hager 1988). Es ist das Ziel dieser Arbeit, den Zeitraum von Gaucklers Fliessformel 1867 bis zu Bazins «neuer» Formel von 1897 zu beleuchten, also die ersten 30 Jahre der auf verlässlichen Messungen basierenden Fliessformeln historisch nachzuzeichnen.

Dies geschieht in spezieller Hinsicht auf die Wiederbelebung der GMS-Formel in den achtziger Jahren, insbesondere im Zusammenhang mit Strömungen in Flüssen. Ein wichtiger Beitrag dazu wurde 1989 geleistet anlässlich der Jahrhundertfeier zur Manning- und zur Kuichling-Formel an der Universität von Virginia. Bis heute ist die Zeitperiode 1867–97 nur schlecht abgedeckt, beispielsweise durch Rouse und Ince (1957), Leliavsky (1951), Biswas (1970)



Darcy (1803–1858)

Henri-Philibert-Gaspard Darcy wurde am 10. Juni 1803 in Dijon geboren. Er verlor bereits mit 14 Jahren seinen Vater. 1821 wurde er an die Ecole Polytechnique und 1823 an die Ecole des Ponts et Chaussées in Paris zugelassen. Nach dem Diplom schickte man ihn als Ingenieur vorerst in den Jura, aber bereits ein Jahr später kehrte er zurück nach Dijon. Als Kreisingenieur beschäftigte er sich mit dem Strassenbau, Kanalbauten und dem Erstellen von Brücken.

Ganz ausserordentlich zog ihn jedoch die Trinkwasserversorgung von Dijon an, die seit Jahren trotz verschiedener Lösungsvorschläge ungenügend war. Darcy versuchte die Verbindung zu einem grossen, aber 12 km von Dijon entfernten Wasserreservoir durch eine Rohrleitung herzustellen. 1834 wurde sein Projekt angenommen, 1838 begonnen und bereits Ende 1840 vollendet. Die Leitung lieferte nun rund 8000 Liter Trinkwasser pro Minute, welches aber noch in der Stadt verteilt werden musste. Dazu erstellte Darcy ein wahrhaft einzigartiges System von Rohren und Reservoirs, von Brunnen und sogar einem Springbrunnen. Als Lohn wollte er lediglich eine Medaille von der Stadt für seine Mutter, seinen Bruder und sich selbst sowie eine Gratisversorgung von Trinkwasser in seinem Haus. Die Stadt Brüssel war so fasziniert von der Trinkwasserversorgung in Dijon, dass sie Darcy bat, auch dort ein Projekt zu begutachten. Der ausserordentlich zufriedenstellende Bericht von Darcy trug ihm den König-Leopold-Orden ein.

Neben dem Wasser beschäftigte die Eisenbahn ganz Europa jener Zeit. In Dijon ging es um den Durchgang der wichtigen Strecke Paris-Lyon. Da andere Linienführungen vorgeschlagen wurden, setzte sich Darcy energisch an die Studie, und schliesslich wurde sein Vorschlag ausgeführt. Dadurch nahm die Popularität von Darcy in Dijon noch mehr zu. 1848 erreichte die Revolution aber auch diesen Landesteil von Frankreich, und Darcy wurde infolge seiner Beziehungen zur Stadtverwaltung als Landesverräter betrachtet. Er verliess in der Folge «seine» Stadt, der er während mehr als zwanzig Jah-

ren gedient hatte, und begab sich nach Bourges, um den Kanal von Berry auszuführen. Dort konnte er nun seiner wahren Passion frönen, die ihn in Dijon bereits gepackt hatte, nämlich der Untersuchung des Abflusses von Wasser in Rohren.

Daneben reiste er beispielsweise 1850 auch nach London, um sich mit der «Macadamisage», dem Beschottern von Strassen, auseinanderzusetzen. Nun begannen sich aber physische Beschwerden in der Form von nervösen Leiden einzustellen, an denen er bereits seit 1842 litt. Er konnte den Verpflichtungen eines Generalinspektors der Administration nur noch mangelhaft folgen und wurde deshalb 1855 für vier Monate beurlaubt. Er bat dann um eine vollständige Befreiung von dieser Pflicht und wollte nur noch die wissenschaftlichen Versuche an Kanälen beenden.

Bezüglich der wissenschaftlichen Arbeiten von Darcy ist zu bemerken, dass sie alle unter den körperlichen Belastungen seines Leidens ausgeführt wurden. Das erste Werk – «Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux» – entstand aus dem Widerspruch zwischen damals geltenden Fließformeln und Darcys Beobachtungen. Seine wesentliche Zielsetzung war dabei die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Fließgeschwindigkeit, Rohrdurchmesser und Druckliniengefälle in Rohren grossen Durchmessers. Der Bericht wurde der «Académie des Sciences» 1854 vorgelegt und 1857 zur Publikation in die «Recueil des Savants Etrangers» angenommen – eine grosse Wertschätzung.

Was seine Arbeit von anderen in dieser Fachrichtung unterscheidet, ist die Qualität und Quantität der Messungen. Rund 200 Beobachtungen an zwölf verschiedenen Rohrmaterialien mit Durchmessern bis 500 mm wurden peinlich genau ausgeführt. Als Resultat ergab sich, dass der Zustand der Rohrinnenfläche einen beträchtlichen Einfluss auf das Fließgesetz ausübt, d.h. beispielsweise neue und alte Rohre desselben Typs ganz verschiedene Abflusseigenschaften besitzen. Vom praktischen Standpunkt weniger wichtig, dagegen für die theoretische Entwicklung zentral war die Ermittlung eines verallgemeinerten Geschwindigkeitsprofils, welches die variable Geschwindigkeit auf die Schubspannungsgeschwindigkeit bezog und damit einen dimensionshomogenen Zusammenhang schuf.

Das zweite Lebenswerk von Darcy wurde – bereits 1854 publiziert – «Les fontaines publiques de la ville de Dijon» und befasste sich mit dem beschriebenen Wasserversorgungsprojekt, dazu aber weiteren Ausführungen zur Wasserversorgung und zum Grundwasserabfluss allgemein sowie auch der Beantwortung von praktischen Fragestellungen. Diese umfassten zum Beispiel die Versorgung einer Stadt mit Wasser, die erforderlichen Höhenlagen, die notwendigen Maschinen, Flussfassungen und Grundwasserversorgung oder Methoden zur Auffindung von Wasserquellen. Das Werk stellt damit ein Sammelsurium dieses Wissensgebietes dar und enthält zugleich

eine Vielzahl von neuen Ideen. Das wohl weitreichendste Kapitel beschäftigt sich mit dem «Fließgesetz nach Darcy», welches die Geschwindigkeit linear zum Druckgefälle setzt und heute als Darcy-Gleichung in die Grundwasser-Hydraulik eingegangen ist.

Die dritte Arbeit von Darcy wurde durch seinen Tod unterbrochen, dann aber durch seinen Assistenten *Henri Bazin* zu Ende geführt. Sie behandelt analog zur ersten Arbeit den Abfluss in Kanälen, den man heute als Normalabfluss bezeichnet. Ausserordentlich dabei waren die Abmessungen der Versuchsanlagen, namentlich des 600 m langen Umleitungskanals des «Canal de Bourgogne» und der verschiedenen Kanalquerschnitte. Diese Versuche wurden 1855 begonnen und führten 1857 zu den Resultaten, dass

- erstens die Kanalwandung einen beträchtlichen Einfluss auf den Widerstandskoeffizienten ausübt,
- zweitens der Widerstand mit der Abflusstiefe sich verändert und
- drittens auch die Querschnittsform Einfluss auf den Abfluss ausübt.

Spektakulär war die Erkenntnis, nach der bei einem halbkreisförmigen Profil mit glattpolierter Wand der Widerstandskoeffizient lediglich ein Drittel desjenigen nach de Prony – damals die wichtigste Referenz – ergab. Neben dem Normalabfluss wurden aber auch gewisse Experimente zu Stau- und Senkungskurven ausgeführt, die insbesondere undulierende Wassersprünge umfassten. Glücklicherweise führte Bazin die von Darcy begonnene Arbeit erfolgreich zu Ende, und der Lehrer wäre sicher stolz auf den Schüler gewesen, hätte er das heute noch bemerkenswerte Frühwerk Bazins gesehen.

Darcy hat neben diesen Experimenten aber auch neue Instrumente entwickelt und bekannte Apparaturen modifiziert. Die wichtigste Verbesserung gelang ihm dabei sicherlich beim Pitot-Rohr, welches Henri Pitot (1695–1771) als einfache, gebogene Glasröhre um 1732 einführte. Darcy verbesserte dabei insbesondere die praktische Anwendung dieses Geräts für Feldbeobachtungen.

Nach Charié-Marsaines (1858) soll Darcy seit rund 1850 in einem Wettstreit mit seiner Krankheit gewesen sein; er fühlte einerseits die nachlassenden Kräfte, wollte aber andererseits noch möglichst viele seiner Beobachtungen veröffentlichen. In den letzten Monaten des Jahres 1857 verbesserte sich sein Gesundheitszustand, und er erwog einen Wiedereintritt ins Berufsleben. In diese Zeit fiel die theoretische Bearbeitung des Normalabflusses. Ende 1857 erlitt er jedoch eine schwere Brustkrankheit, deren Folgen bereits am 2. Januar 1858 zum Tode führten. In Dijon ehrte man den Verstorbenen, indem der Platz «Château d'eau» in «Darcy-Platz» umbenannt wurde. Leider erst nach dem Tode wurde bekannt, dass er als Mitglied der «Académie des Sciences» als Nachfolger von Cauchy vorgesehen war, eine Ehre, die Darcy sicherlich grosse Befriedigung bedeutet hätte.

oder Dooge (1987). Dagegen liegt für die USA eine gute Dokumentation vor, beispielsweise von Sherman (1931) oder Rouse (1976), weshalb dort nicht ins Detail vorgedrungen werden soll. Ebenfalls soll der Bereich der teilgefüllten Rohre, wie sie im Kanalisationswesen auftreten, auch nicht besprochen werden, da dort Hager (1991) eine Übersicht gegeben hat.

Lévy und Gauckler

Lévy (1867) versuchte anhand der Messdaten von Darcy und Bazin (1865) ein Fliessgesetz abzuleiten. Dabei stiess er über eine Anzahl von Zwischenrechnungen auf die Beziehung

$$(4) \quad V^2/(gJ_f R_h) = \alpha_L + a_L R_h^{1/2}$$

Interessanterweise hängt α_L nur von der Rohroberfläche – also der Rauigkeit – und a_L nur von der Flüssigkeit ab. Damit wurden bereits zwei Jahre nach der Veröffentlichung von Darcy und Bazins Werk die Anteile von Widerstand infolge Wandrauheit und Viskosität additiv dargestellt. Es gelang Lévy anhand der erwähnten Daten nachzuweisen, dass:

- der Term V^2/J_f unabhängig vom Gefälle ist,
- der Term $V^2/(gJ_f R_h) - a_L R_h^{1/2}$ für ein spezifisches Rohr konstant bleibt und
- seine Formel mehrheitlich Gl. (3) überlegen ist.

Der Ansturm auf die Messdaten von Darcy und Bazin hatte damit begonnen. Die Arbeit von Lévy wurde von Vallot (1887) wiederum aufgegriffen. Sie wird insbesondere der Auswertung nach Darcy (1858) gegenübergestellt und bezieht sich auf neue sowie gebrauchte gereinigte Rohre aus Gusseisen. Vallot gelang es nachzuweisen, dass speziell bei grösseren Durchmessern Lévy's Ansatz die Messwerte von Darcy besser beschreibt als der Ansatz von Darcy. Die Formeln von de Prony und Gauckler werden nur in einem engen Bereich als aussagekräftig beschrieben.

Gauckler (1868a) versuchte, anhand der Messungen von Darcy (1857) eine Fliessformel für Druckrohre aufzustellen. Ursprünglich ging er dabei von der Beziehung

$$(5) \quad V^{1/2} + \frac{1}{4}DV^{1/4} = \kappa D^{3/4} J_f^{1/4}$$

aus, stellte dann jedoch fest, dass der zweite Term bei üblichen Geschwindigkeiten viel kleiner als der erste wäre. Dann ergibt sich

$$(6) \quad V = K J_f^{1/2} R_h^{2/3},$$

also die später ebenfalls nach Manning und Strickler benannte Beziehung, wobei der K-Wert (von Gauckler mit $(a^7/g)^{1/4}$ benannt) für Rohre mit starken Inkrustationen bis praktisch glatten Bleirohren angegeben wurde.

Anschliessend bezog er sich auf offene Kanäle und stellte anhand der kurz vorher veröffentlichten Messwerte von Darcy und Bazin (1865) eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit seiner Gl. (6) fest. In der Tat variierte K nur mit der Wandbeschaffenheit, und es ergaben sich für die von Darcy und Bazin aufgestellten Rauigkeitsklassen K-Werte zwischen etwa $50 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, wobei das Sohlgefälle mindestens 0.07% zu betragen hätte (fälschlicherweise behaupten die meisten modernen Quellen, dass Gauckler Gl. (6) auf $J_f < 0.07\%$ beschränke).

Interessant ist, wie schnell die Resultate ihren Weg nach Deutschland fanden. 1868 wurde der Originalartikel bereits ins Deutsche übersetzt (Gauckler 1868b). Bornemann (1869) stellte in einer langen Einleitung die Vorzüge von Gaucklers Formel sowohl in Rohren als auch in offenen Kanälen vor, kommt dann selbst auf einen Ausdruck der Form $V \approx J_f^{4/5} R_h^{4/3}$, den er mindestens so genau setzte wie Gl. (6). Die dazugehörigen Versuche gingen aber nicht von einem Mengemessbauwerk, sondern von einer mittleren Geschwindigkeitsmessung aus, die vermutlich zu recht ungenauen Durchflüssen führte. Bornemann erwähnte ebenfalls eine grosse Zahl wenig bekannter, hauptsächlich deutschsprachiger Experimentatoren, ohne jedoch die Zuverlässigkeit der Messungen zu werten. Abschliessend stellte Bornemann fest, dass die Frage nach der richtigen Fliessformel keineswegs umfassend behandelt sei und noch zuverlässige Versuche auszuführen wären, «durch welche sich ein weniger beschäftigter Ingenieur ein grosses Verdienst erwerben könnte».

In Frankreich verifizierte Stapfer (1869) anhand von Naturmessungen die Gleichung von Gauckler. Daraus leitete er die folgenden Resultate ab: Im Vergleich zur Formel von de Prony ergibt die neue Beziehung gute Übereinstimmung mit den erwähnten Messungen, das Hauptproblem liege jedoch an der exakten Ermittlung des massgebenden Gefälles. Zudem geht aus dem Aufsatz klar hervor, dass man Gl. (6) nur als Übergangslösung betrachtete, auf die bei genauerem Datenmaterial bessere Formeln folgen sollten.

Auch Hagen (1881) versuchte anhand einer Messserie von Captain Allan Cunningham aus Ostindien, die Potenzformel zu testen, und stiess dabei ebenfalls auf die Gleichung (6) nach Gauckler. Im



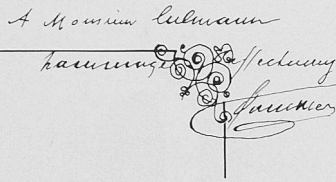
Lévy (1838–1910)

Maurice Lévy wurde am 28. Februar 1838 in Ribeaupillé geboren und 1856 an die Ecole Polytechnique zugelassen. Der Ingenieur des Ponts et Chaussées zeigte früh eine Hinwendung zu wissenschaftlichem Denken. Er befasste sich beispielsweise bereits während des Studiums mit der Tragfähigkeit von grossen, geraden Brücken. In Montauban verfasste er 1867 die Doktorarbeit über theoretische Geometrie mit einer Anwendung in der Fluidmechanik. Somit paarte sich auch bei Lévy die mathematische Präzision mit dem Sinn für praktische Anwendung. 1868 begann er mit der Planung und Ausführung von Wasserbauten auf der Seine und publizierte verschiedene Arbeiten in den «Mémoires de l'Académie des Sciences».

Nach der französischen Niederlage im Kriege 1870/71 wurde Maurice Lévy beauftragt, die Artillerie innerhalb von zwei Monaten neu zu organisieren. Mit 32 Jahren wurde somit einem Ingenieur eine grosse organisatorische Aufgabe übergeben.

Von 1872 an hielt er nahe Verbindung zur Académie des Sciences und wurde 1883 als Nachfolger des Mechanikers Bresse zum Mitglied der Abteilung Mechanik gewählt. Seit 1875 stand er als Professor Joseph Bertrand am Lehrstuhl für mathematische Physik am Collège de France zur Seite. 1887 wurde er dort Professor für analytische Mechanik und Himmelmekhanik. Er bearbeitete Probleme der graphischen Statik, der Hydraulik, der Thermodynamik, der Flutwellen, der Elektrizitätslehre und der Elastizitätstheorie. Eine Würdigung über das letzte Fachgebiet gibt Timoshenko (1953). Die Mathematiker Henry Poincaré und Emile Picard waren zwei von Lévy's berühmten Schülern.

Vergleich mit der fünf Jahre früher (Hagen 1876) aufgestellten Gleichung $V \approx J_f^{1/5} R_h^{1/2}$ anhand der Messdaten von Humphreys und Abbot war also beim steileren Gangeskanal ein ganz anderes Gesetz massgebend.



Gauckler (1826–1905)

Nach Stoecklin (1905) wurde *Philippe-Gaspard Gauckler* am 16. Januar 1826 in Wissembourg (Bas-Rhin) geboren. Im Anschluss an Studien in Strassburg wurde er 1848 Mitglied des «Corps des Ponts et Chaussées» und war in dessen Auftrag in Marseille, Nancy und Bordeaux. Nach einem zweijährigen Aufenthalt in Spanien kehrte er zurück nach Colmar, wo er sich mit der Wasserversorgung beschäftigte, dann durfte er den Bau eines Süswassertanks für die Weltausstellung in Paris leiten. Bereits 1868 wurde er Ingenieur I. Klasse.

Während des Krieges 1870/71, welchen das Elsass besonders spürte, war er in leitender Stellung bei den Verbindungstruppen. Dank seiner Umsicht wurde er als Offizier der Légion d'honneur geehrt. Auch nach dem Kriege konnte der auch deutschsprechende Gauckler eine Vielzahl von Diensten leisten. Später beschäftigte ihn die Fischerei in Flüssen, Transportmöglichkeiten von ausgewachsenen Fischen, worüber er auch ein Buch schrieb. 1881 wurde er zum Chefingenieur I. Klasse befördert und erhielt das Direktorium über die französischen Staatsbahnen. Er bemühte sich dabei um die Vereinheitlichung und Reorganisation des Bahnwesens. Diesen Posten verliess er 1886, nachdem er zum «Inspecteur général des Ponts et Chaussées» berufen wurde. Obwohl er sein Pensionsalter 1891 erreichte, setzte er die Arbeit fort und starb schliesslich am 5. Oktober 1905.

Obwohl die Formel von Gauckler also unmittelbar nach dem Erscheinen Aufmerksamkeit von verschiedener Seite erhielt, konnte sich der mit der Formel verbundene Name Gauckler nicht durchsetzen. Dies ist einerseits auf Bazin zurückzuführen, der bereits 1871 eine Wertung dieser auf seinen Messdaten aufgebauten Formel durchführte und sie ablehnte, wie noch diskutiert wird. Dieses Urteil des bereits illustren Bazin dürfte fast ein Todesstoss für den in diesem Bereich unbekanntem Gauckler gewesen sein. Vermutlich traute man auch von der Praxis her dieser «zu einfachen Formel» nicht, vergleicht man sie etwa mit der infolge ihres relativ komplizierten Aufbaus «genauen» Formel von Ganguillet und Kutter (1869). Erst in jüngster Zeit werden Versuche gemacht, von der Gauckler-Manning-Strickler (GMS)-Formel zu sprechen und damit die Verdienste für einen einfachen Zusammenhang der Geschwin-

digkeit mit dem Reibungsgefälle und dem hydraulischen Radius zu würdigen.

Ganguillet und Kutter

Bereits 1868 gab *Kutter* einen «kurzen Bericht» über seine aus den Daten von Darcy und Bazin sowie Humphreys und Abbot abgeleitete Formel «zum Gebrauch für den schweizerischen Ingenieur» heraus. Darin werden zudem fünf (in der Arbeit von 1869 sechs) Rauheitskategorien angegeben und die Formel von Gauckler (1867) vorgestellt. Zum Abschluss werden gar zwölf Rauheitskategorien bezüglich der Formel (3) von Chezy vorgestellt, «um dem praktischen Ingenieur brauchbare Anhalte und den Gelehrten ein Material zu bieten, aus dem sich vielleicht noch genauere Theorien ableiten lassen».

In einer zweiten Arbeit würdigte *Kutter* (1869) nochmals eingehend die Untersuchung von Humphreys und Abbot (1861) bzw. deren Übersetzung ins Deutsche durch Grebenau (1867) und die Kritik des berühmten Wasserbauers Grashof (1869). Die abgeleitete Beziehung wird als «richtig» für grosse Flüsse und Kanäle mit *geringem* Sohlgefälle hingestellt. Sie genügt jedoch steileren Gewässern nicht. Dagegen scheinen die restlichen bekannteren Formeln aus Messwerten von kleineren Gewässern abgeleitet zu sein. Das Ziel ist demnach die «Verschmelzung» der beiden Extremfälle zu einer einzigen Beziehung, welches die heute nach Ganguillet und Kutter benannte Formel darstelle. Nach dem Franzosen Bazaine (1876) hat *Kutter* dieses Ziel erreicht, seine Formel stelle in der Tat eine Verbesserung derjenigen von Darcy und Bazin dar, rechtfertige sich aber hauptsächlich bei grossen Flüssen mit kleinem Gefälle.

Trotz der umfassenden Publikation mit seinem Chef Ganguillet stellte *Kutter* allein 1870 nochmals eine fast hundertseitige Abhandlung zum Fliessgesetz vor. Darin werden die vier wichtigsten Fliessformeln von Humphreys und Abbot, (Darcy und) Bazin, Gauckler sowie Ganguillet und *Kutter* eingehend gewürdigt. *Kutter* hatte demnach durch diese zweite, innerhalb von zwei Jahren in derselben Zeitung erschienene Arbeit seine Formel ausgiebig dargestellt und 1877 ebenfalls allein sogar in Buchform herausgebracht. In der zweiten Auflage von 1885 wurde neben der Formel von Ganguillet-Kutter auch die sogenannte kleine *Kutterformel* vorgeschlagen, auf welche später eingegangen wird. Im Vorwort gaben Ganguillet und *Kutter* als Ziel das Aufstellen einer Formel für grosse, flache Flüsse (Humphreys und Abbot), Kanäle und Rinnen

(Darcy und Bazin) sowie steilere Bäche (eigene Messungen) an. Weiter findet man die Bemerkung, dass *Kutter* nicht nur die rechnerischen und graphischen Auswertungen vorgenommen, sondern auch die Aufsätze verfasst habe, während sich Ganguillet, dessen Leben durch Vischer (1983) gewürdigt wurde, mit den analytischen Fragen beschäftigt habe – und zudem Chef von *Kutter* war.

In der Arbeit von *Kutter* (1873) werden in Abwandlung zur Rauheitskategorie für ausgewählte Kanaltypen und sogar Bäche und Flüsse spezifische *Rauheitswerte* angegeben. Dabei wird unterschieden zwischen Kanälen, Flüssen mit und ohne Geschiebe sowie Bächen. In einer Übersicht finden sich schliesslich noch 15 verschiedene Kategorien mit unteren und oberen Grenzen für den *n*-Wert.

In der Übersetzung der Arbeit von Ganguillet und *Kutter* durch die Amerikaner Hering und Trautwine (1893) wird vorerst die Übersetzung von Jackson im Jahre 1876 ins Englische erwähnt, anschliessend soll eine Übersetzung ins Italienische durch Dal Bosco (1873) vorgenommen worden sein. Im Vorwort der Übersetzer wird schliesslich festgehalten, dass es von der Praxis her nicht erstrebenswert wäre, für alle vorkommenden Fälle eine allgemeine, also komplexe Formel zu entwickeln, dass jedoch dann für die vereinfachte Formel Anwendungskriterien zu befolgen wären, die den Berechnungsgang erleichtern würden. Weiter wird klar auf den empirischen Charakter der Ableitungen hingewiesen.

Trotz des komplizierten Aufbaus darf die Formel von Ganguillet und *Kutter* (1869) als eine grundlegende Fliessformel betrachtet werden. Aufbauend auf einem geschichtlichen Überblick, in dem Arbeiten von Gelehrten wie Galilei, Torricelli, Guglielmini, Pitot und Bernoulli erwähnt werden, wird Gl. (3) von Chezy als Resultat dieser frühen Untersuchungen herausgestrichen. Den Koeffizienten *C* bestimmte Chezy aus eigenen und aus dreissig Messungen von Dubuat. Weitere Messungen führten die Deutschen Brüning, Woltmann und Funk durch. Dadurch leiteten Eytelwein und später Dupuit und de Saint-Venant in Frankreich sowie Rühlmann und Weisbach in Deutschland neben anderen Formeln ab, die hauptsächlich der Ermittlung des *C*-Wertes galten.

Jedoch wurde dem Einfluss der Rauheit keine spezielle Aufmerksamkeit gewidmet. Die recht unterschiedlichen Werte von *C* in Gl. (3), zu dem die Geschwindigkeit *V* direkt proportional ist, waren Anlass zu einer grossen Verunsicherung unter den Hydrotekten, den

damaligen Hydraulikern. Die Naturmessungen in Flüssen und Bächen lieferten viel zu ungenaue Angaben über den Sachverhalt. Wie bereits erwähnt, haben Darcy und später Bazin durch die ersten hydraulischen Modellversuche hier gewisse Klarheit verschafft. Dabei wurde die Rauheit der Kanäle systematisch variiert, das Sohlgefälle verändert, verschiedene Profile in die Rechnung einbezogen und der Durchfluss durch Überfälle recht genau evaluiert. Damit stand die erste Quelle von «guten» Messwerten zur Verfügung. Bazin selbst wertete die Versuche aus und gelangte zur provisorischen Formel

$$(7) \quad V/(J_s R_h)^{1/2} = \left(\alpha + \frac{\beta}{R_h} \right)^{-1/2}$$

mit α und β als Koeffizienten, die von der Rauheit des Kanales abhängen. Gl. (7) entspricht essentiell derjenigen nach Darcy für Druckrohre. Insgesamt wurden vier Kategorien von Kanaltypen betrachtet aus:

- sorgfältig gehobeltem Holz oder Zement,
- behauenen Quaderstein, Backstein und ungehobeltem Holz,
- Mauerwerk von Bruchsteinen und
- Erde.

Eine Beziehung zwischen den beiden Koeffizienten α und β wurde jedoch nicht gefunden. Vom heutigen Standpunkt aus ist somit die Rauigkeit durch zwei Parameter beschrieben worden.

Weitere Messdaten, die Ganguillet und Kutter vorfanden, wurden durch Humphreys und Abbot (1861) am Mississippi aufgenommen. Während rund zehn Jahren wurde die Flussstrecke zwischen Ohio und der Mündung in das Meer durch Doppel-Schwimmkörper, aber auch durch Woltmann-Flügel und Pitot-Rohre ausgemessen. Die vorgeschlagene Formel lässt sich vereinfachen auf $V \approx J_s^{1/4}$ und steht damit im Widerspruch zu Gl. (3).

Schliesslich haben auch Ganguillet und Kutter selbst Naturmessungen vorgenommen an Wildbachschalen im Thunerseegebiet. Sie entwickelten eine neue Formel mit dem Ziel:

- den Beiwert C mit dem Grade der Rauheit zu variieren,
- den Einfluss des hydraulischen Radius zu prüfen und
- die merkwürdige Veränderung des Gefälles nach Humphreys und Abbot zu untersuchen.

Ganguillet und Kutters definitive Gleichung enthielt Gl. (7) nach Bazin als Spezialfall und folgte auch der Gefällsfunktion von Humphreys und Abbot bei kleinen Sohlgefällen. Der Grad der Rauheit wurde im Gegensatz zu Darcy und Bazin (1865) mit einem *einzig* di-

mensionsbehafteten Koeffizienten n abgedeckt. Damit entstand schliesslich der komplizierte Ausdruck

$$(8) \quad V/(J_s R_h)^{1/2} = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{J_s}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{J_s} \right) \frac{n}{\sqrt{R_h}}}$$

Hinsichtlich der Rauheit wurden in Anlehnung an Bazin sechs Rauigkeitskategorien aufgezählt, nämlich:

- I Kanäle von sorgfältig gehobeltem Holz und von glatter Zementverkleidung, $1/n=100$,
- II Kanäle aus Brettern, $1/n=83$,
- III Kanäle aus behauenen Quadersteinen und von gutgefügt Backsteinen, $1/n=77$,
- IV Kanäle aus Bruchsteinen, $1/n=59$,
- V Kanäle in Erde, Bäche und Flüsse, $1/n=40$ und
- VI Gewässer mit größerem Geschiebe und mit Wasserpflanzen, $1/n=33$.

Die Potenzformel von Gauckler wurde abgelehnt, da sich bei zwei gleichen Werten R_h die Geschwindigkeiten nicht proportional zu einer konstanten Potenz von Gefällen verhielt. Der Arbeit von Ganguillet und Kutter sind auch die massgebenden Messserien sowie Berechnungshilfen beigelegt.

Erst kurz vor seinem Tode hat Kutter (1885) in der dritten Auflage seiner 1877 erschienenen Arbeit die Formel von Ganguillet und Kutter vereinfacht für Abflüsse mit nicht zu kleinem Gefälle. Daraus entstand die sogenannte *kleine Kutterformel*

$$(9) \quad V/(J_s R_h)^{1/2} = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{23n}{R_h^{1/2}}}$$

Sie ähnelt einer Anzahl von andern Formeln, besitzt aber im Gegensatz zur Formel von Darcy und Bazin nur den in der Zwischenzeit bekannten und durch einige Übung schätzbaren Rauigkeitskoeffizienten $1/n$. Für hydraulische Radien $0.3 < R_h < 3\text{m}$ und $10 < 1/n < 100$ lässt sich der zweite Ausdruck auf der rechten Seite von Gl. (9) durch $R_h^{1/6}$ annähern, womit die von Manning (1889) abgeleitete Beziehung entsteht.

Bazin

Nachdem Gauckler zwischen 1867 und 1868 aus den Messdaten von Darcy und Bazin (1865) eine so einfache Formel ableiten konnte, wird auch Bazin selbst



Ganguillet (1818-1894)

Am 14. Mai 1818 in Cormoret (BE) geboren, besuchte *Emil Ganguillet* nach Abschluss der Dorfschule das Institut Allemann in Kirchlindach (BE), dann das Collège in Biel und schliesslich das Obergymnasium in Bern. Nach Schulabschluss folgte eine siebenjährige Tätigkeit in Frankreich im Brücken-, Strassen- und Eisenbahnbau.

1847 kehrte er in die Schweiz zurück und fand eine Anstellung als bernischer Bezirksingenieur in Delsberg, dann in Biel, und 1858 wurde er zum Oberingenieur des Kantons Bern gewählt. Während seiner fast 50jährigen Tätigkeit für den Kanton Bern wurden unter seiner Oberaufsicht hauptsächlich Brücken- und Wasserbauten ausgeführt. Daraus resultierte auch die mit Kutter veröffentlichte Arbeit über den Abfluss in offenen Kanälen.

Als aktives Mitglied des bauwissenschaftlichen Vereins und Gründungsmitglied des bernischen Ingenieur- und Architektenvereins stand er dem technischen Vereinsleben nahe. Deshalb erhielt er vom Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein 1893 die Ehrenmitgliedschaft. Er verstarb am 9. Mai 1894 im Alter von 76 Jahren.

noch einmal versucht haben, seine Daten zu reanalysieren. Vorerst wies Bazin (1871) nochmals klar auf den mit der *Wandbeschaffenheit* variablen Rauigkeitskoeffizienten hin. Anschliessend wird unterschieden zwischen monomen und binomen Ausdrücken für die Fliessgeschwindigkeit, wobei bei den ersten auf de Saint-Venant, Gauckler, Bornemann und Hagen Bezug genommen wurde. Bazin, der während Jahren die verschiedensten Abflüsse selbst ausgemessen hatte, konnte sich einfach nicht ein so einfaches Gesetz vorstellen, wie es Gauckler vorgab. Auch störte ihn die brüske Unterscheidung zwischen zwei Formeln, je nachdem ob das Gefälle grösser oder kleiner als 0.07% war. Bazin schwebte eine Be-



Kutter (1818–1888)

In der Übersetzung von Hering und Trautwine (1893) liegt eine Biographie über *Wilhelm R. Kutter* vor. Geboren am 23. August 1818 in Ravensburg (Württemberg), entstammte er einer reichen Familie, die in der Papierherstellung tätig gewesen war, bis Napoleon alles zerstörte. Mit 13 Jahren zog er zu seinem Onkel in die Schweiz und lernte das Vermessen. Schon mit siebzehn Jahren trat er in das Technische Bureau des Kantons Bern ein, beschäftigte sich mit dem Strassenbau und lernte auch Französisch. Obwohl dieses Bureau 1839 aufgelöst wurde, setzte er seine Arbeit fort und begann auch intensiv im Bereich der Försterei zu wirken. Unter dem Kantonsingenieur Ganguillet wirkte er an der ersten Jura-Gewässerkorrektur mit und hatte sich somit intensiv mit hydraulischen Fragen auseinandersetzen. Eines der Resultate war die «Formel von Ganguillet-Kutter». 1851 wurde Kutter Sekretär des Departements für öffentliche Bauten des Kantons Bern, eine Stellung, die er bis ans Lebensende innehatte.

Er soll zweimal verheiratet und Vater von achtzehn Kindern gewesen sein, wovon zehn ihn überlebten. Er starb am 6. Mai 1888 und blieb seinen Freunden als liebenswürdige, bescheidene und ruhige Person in Erinnerung. Sein Werk umfasst ein gutes Dutzend Schriften zwischen 1853 anlässlich der Jura-Gewässerkorrektur und 1885 als Zusammenfassung der Arbeiten bezüglich der Fließformeln. Sein Sohn Hermann (1863–1931) wurde ein berühmter Theologe in Zürich.

ziehung vor, die alle Messwerte – seine und beispielsweise auch diejenigen nach Humphreys und Abbot – abdeckte.

Hinsichtlich der binomen Formeln störten ihn an der ursprünglich von Darcy für Rohre und von ihm auf offene Kanäle aufgestellten Beziehung

$$(10) \quad V = \frac{(J_s R_h)^{1/2}}{(\alpha + \beta/R_h)^{1/2}}$$

die Koeffizienten α und β . Beide variierten sowohl mit dem Gefälle als auch mit dem Rauheitsgrad. Wie im Detail ausgeführt wurde, wichen die Messungen im glatten Kanal von der üblichen Form ab, d.h., das Verhältnis $V/(gJ_s R_h)^{1/2}$ war abhängig von R_h und von J_s . Auch die kompliziertere Formel von Humphreys und Abbot stimmte recht gut mit den eigenen und den amerikanischen Messungen überein, stand aber im Widerspruch zu den viel umfangreicheren, europäischen Daten. Hinsichtlich der Formel von Ganguillet und Kutter (1869) konnte Bazin nachweisen, dass diverse Punkte direkt aus seinen eigenen Untersuchungen abgeleitet wurden und dass sich die komplizierte Formel mit Ausnahme von Abflüssen bei extrem kleinen Gefälle durch eine monome ersetzen liess (was Kutter in der Tat 1885 auch vorschlug). Bazin (1871) selbst war mit seiner 1865 aufgestellten Formel zwar nicht vollständig zufrieden, machte vorläufig aber keinen neuen Vorschlag. Für diese Arbeit wurde Bazin mit dem zweiten Preis für eine hervorragende Publikation in den «Annales des Ponts et Chaussées» 1873 ausgezeichnet. Bazin ging in der Folge anderen Projekten nach und befasste sich mit der Fließformel erst wieder 1897. Darüber wird unten berichtet.

Hagen, Lampe, Iben und Frank

Gotthilf Hagen (1797–1884), der damals berühmteste Wasserbauer Deutschlands schlechthin, war bekannt durch seine Arbeit über die Laminarströmung in Rohren, welche zur Formel von Hagen-Poiseuille um 1840 führte, sowie durch sein mehrbändiges Werk «Wasserbaukunst». Die Problematik um die Rohrhydraulik und das allgemeine Widerstandsgesetz liessen ihm keine Ruhe, und mit fast 70 Jahren begann eine neue Forschungsperiode. Aufbauend auf den Experimenten von Humphreys und Abbot (1861) legte er 1868 zwei Arbeiten vor, die sich auf grosse Flüsse bezogen. In der ersten (Hagen 1868a) wird die Übersetzung von Grebenau kritisiert und die von Humphreys und Abbot aufgestellte Formel für die mittlere Geschwindigkeit als unzulänglich bezeichnet, in der zweiten Arbeit (Hagen 1868b) werden die Daten der Amerikaner nochmals ausgewertet. Zwar kannte er die Arbeit von Darcy und Bazin (1865), verwarf sie jedoch für den von ihm untersuchten Fall und gelangte zu jener Beziehung, die weit entfernt von allen bekannten liegt. Nach Gl. (14) fand er nämlich für den Exponenten des Sohlgefälles $p=1/6$, während für $q=1/2$ aus den Messungen hervorgehe. Damit wurden sicherlich

eine Vielzahl von Praktikern verunsichert, galt doch Hagen als die Autorität im deutschsprachigen Raum.

Hagen (1869) leitete aufgrund der Messungen von Darcy und ohne Bezug auf seine 1868 erschienene Studie ebenfalls eine Formel der Art

$$(11) \quad J_f = a_H V + b_H V^2$$

ab, wobei die beiden Konstanten a_H und b_H als dimensionsbehaftete Zahlenwerte angegeben wurden. Weiter wurde der Einfluss der Rohroberfläche im Gegensatz zu Darcy als *untergeordnet* betrachtet. Nach den früheren, grossartigen Leistungen Hagens darf diese Arbeit als enttäuschend bezeichnet werden.

1876 versuchte Hagen nochmals, ...«unter Berücksichtigung aller bekannt gewordenen, zuverlässigen Beobachtungen dasjenige möglichst einfache Gesetz herzuleiten, das sich diesen am besten anschliesst». Aus diesem Datenmaterial gelangte Hagen zur Ansicht, dass der Abfluss in «Canälen und kleineren Gräben» einem anderen Gesetz folgte als in «Flüssen und Strömen». Für die ersten fand er

$$(12) \quad V = 4.9 J_s^{1/5} R_h$$

während

$$(13) \quad V = 3.34 J_s^{1/5} R_h^{1/2}$$

für die zweiten gelte. Die von Darcy und Bazin (1865) in den Versuchskanälen abgeleiteten Daten folgen jedoch mehrheitlich dem Term $J_s^{1/2} R_h^{2/3}$. Es ist unerklärlich, weshalb Hagen dieses letzte Gesetz noch immer in Zweifel zog und wiederum Beziehungen empfahl, die weit von allen üblichen entfernt liegen.

Lampe (1873) hat in einer längeren Untersuchung den Abfluss in Rohren studiert. Er bezog sich dabei fast ausschliesslich auf deutsche Arbeiten, kannte aber auch die Aufsätze von Poiseuille und Darcy (1857). Um eine Formel für die Praxis abzuleiten, stellte Lampe neben dem ihm zur Verfügung stehenden Beobachtungsmaterial auch eigene Versuche an. Dazu wurde eine neue Druckleitung in Danzig verwendet, die eine Länge von über zwei Meilen hatte. Wie bei Darcy wurde die Drucklinie durch Piezometer aufgenommen, die Leitung hatte jedoch verschiedene Krümmungen sowohl im Längsschnitt als auch im Grundriss.

Lampe veröffentlichte seine «in situ»-Daten aus verschiedenen Gründen:

– er zweifelte an Hagens zu einfachem Gesetz,

- er wollte mit $D=0.42\text{m}$ die Lücke der Durchmesser füllen, die bereits Darcy 1857 untersucht hat,
- er wollte einen Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und der mittleren Geschwindigkeit herstellen, und
- er wollte den Einfluss von Krümmungen nebenbei auch noch ausfindig machen.

In der Besprechung älterer Arbeiten stellte Lampe klar den Einfluss der Viskosität fest. Gibt man Bernsteinpulver in ein Glasröhrchen, so kann man anscheinend mit blossen Auge den Geschwindigkeitsgradienten feststellen. An der Rohrwand verharren die Partikeln in Ruhe, gegen das Zentrum erhöht sich die Geschwindigkeit. Dieses Phänomen wird der «gegenseitigen Reibung der einzelnen Wasserschichten» zugeschrieben, physikalischer Ursprung sei die «Kleberigkeit» (Viskosität) des Wassers. Wie bereits vor ihm unterschied auch Lampe die geschichtete (laminare) von der verwirbelten (turbulenten) Rohrströmung. Der Übergang von der einen in die andere Bewegungsart könne durch Verkürzung des Rohres, Vergrösserung des Durchmessers oder durch Erhöhung der Temperatur hervorgebracht werden.

Nach einer eingehenden Beschreibung der Versuche von Hagen und Poiseuille, deren Übereinstimmung hervorgehoben wird, stellte Lampe eine Verallgemeinerung der laminaren Strömung auch auf Rohre grösseren Durchmessers in Aussicht. Dann folgte eine ausführliche Zusammenfassung der theoretischen Ableitungen von Neumann und Hagenbach, die schliesslich im Geschwindigkeitsprofil für laminare Strömungen gipfelt. Aus der Beschreibung der Versuche von Darcy bemerkt man den Respekt, der diesem Meisterwerk experimenteller Hydraulik entgegengebracht wurde. Anschliessend wurde die Arbeit Hagens (1869) detailliert kommentiert und gefolgert, dass andere Ausdrücke – beispielsweise die Potenzformel – mindestens ebenso gute Übereinstimmung mit den Experimenten ergeben. Bezüglich der Potenzformel

$$(14) \quad V = C_L J_L^p R_h^q$$

fand er für $p=0.555$ und $q=0.694$. Diese Beziehung wurde auch von Wehner (1897) übernommen, und ein Rechenschieber wird vorgestellt, der eine einfache Auswertung der Formel gewährleistet. Insgesamt wurden jedoch nur vier Oberflächentypen von «glatt» bis «schlecht» vorgeschlagen.

Aufgrund eines vom Verband deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine im Jahre 1874 ergangenen Aufrufs zur Un-

tersuchung von Fliessformeln fasste *Otto Iben* (1880) das damalige Wissen zusammen und unternahm zudem auch eigene Versuche. Hinsichtlich des damals bekannten Versuchsmaterials wurden die Experimente von Couplet (1732), Bossut (1777), Dubuat (1816), d'Aubuisson (1830) und Castel (1832), Hagen (1838), Poiseuille (1844), Braidwood (1844), Darcy (1858) und Lampe (1873) erwähnt. Aus diesem Zahlenmaterial leiteten de Prony, d'Aubuisson, Eytelwein, Weisbach, Poiseuille, Zeuner, Hagen, de Saint-Venant, Darcy und Lampe neben anderen Fliessgesetze ab, wobei alle Formeln nicht dimensionsgerecht sind. Obwohl die Formeln von de Prony, Eytelwein und d'Aubuisson einen analogen Aufbau besitzen, unterscheiden sich die Zahlenwerte darin beträchtlich.

Daneben lag aber von einzelnen Verbänden Deutschlands neues Versuchsmaterial vor, das von Iben ebenfalls gesichtet wurde. Er unterschied dann lediglich zwischen den vagen Begriffen «neue» und «alte» Rohre. Weiter stellte Iben eine eindeutige Zunahme des Reibungswiderstands mit dem *Alter* einer Röhre fest. Dies erklärte sich durch eine Zunahme der Verkrustung und der Abnahme der Oberflächen-glätte. Als Resultat der Literaturübersicht zog Iben eindeutig die Formel von Darcy für «neue» Leitungen vor. Hinsichtlich der «alten» Leitungen wurden keine abschliessenden Angaben gegeben, da deren Rauigkeitsverhalten von einer Vielzahl von Zufällen abhängt. Solange die Baumethoden, Reinigungsverfahren und Qualitätsansprüche an das zu transportierende Wasser so verschieden seien, wären hier keine Aussagen zu machen. Es wurde gefordert, verkrustete Leitungen möglichst zu ersetzen und auf einen sauberen Zustand der Leitungen zu achten, um damit auch die Betriebskosten möglichst niedrig zu halten. Neben dieser Würdigung der bekannten Resultate unternahm Iben auch den Versuch, eigene Messungen an sechs «neuen» Röhren mit Durchmessern von 0.025m bis 0.252m durchzuführen. Als Folgerung ergab sich auch hier die beste Übereinstimmung mit der Formel von Darcy.

Einen Überblick über die Kenntnisse nach Darcy und Bazin (1865), aber vor Manning (1889) gab *Albert Frank* (1881). An den älteren Messdaten wurden bemängelt:

- kleine Rohrdurchmesser, üblicherweise unter 0.10m ,
- indirekte Druckverlustmessung durch Niveaudifferenz zwischen Ober- und Unterwasser,
- Genauigkeit der Durchflussmessung,

- Art der gleichmässigen Rohrwandung.

Das Messverfahren von Darcy wurde beschrieben und im Vergleich zu den Vorläufern als revolutionär bezeichnet. Weiter Eingang in die Diskussion fanden Lévy, Gauckler, Hagen und Lampe. Auf Anregung des Hamburger Architekten- und Ingenieur-Vereins wurden dann neue Versuche unter der Leitung von Iben angestellt, um Ungewissheiten in der Berechnung zu beheben. Dabei sollte den rauhen, gebrauchten Rohren spezielle Aufmerksamkeit gewidmet werden, da neue Leitungen besser untersucht waren. Als Resultat dieser Untersuchung gelangte Iben wie bereits erwähnt zum Schluss, die Formel von Darcy sei zu empfehlen. Frank selbst ging in der Folge an die Auswertung der von ihm exakt ausgeführt erscheinenden Versuche und erzielte damit eine Formel des Typs von Bazins 1897 aufgestellter Beziehung (16), wobei ein konstanter Rauigkeitsbeiwert $\gamma=0.37$, entsprechend weniger glatten Rohren, eingeführt wurde. Für «ältere Leitungen» erhielt Frank dieselbe Basisbeziehung, nur war $\gamma=0.66$, und somit lagen nach Bazins späterer Rauigkeitskala etwa Erdkanäle mit gepflasterten Böschungen oder sehr regelmässige Kiesbäche vor.

Frank (1886) ging in der zweiten Arbeit an die Berechnung des Fliesswiderstandes. Aufbauend auf den bekannten Beziehungen wies er vorerst nach, dass die Formel von Ganguillet und Kutter in Kanälen für Gefälle über 0.1% durchaus vereinfacht werden dürfe auf Gl. (9). Damit wagt er als erster, die Komplexität der genauen, aber «unantastbaren» Formel zu vereinfachen. Gleichzeitig bezog er sich damit jedoch nur auf Abflüsse im vollturbulenten Regime. Kutter hatte diese Vereinfachung sicherlich auch als eine Näherung in Betracht gezogen, sie jedoch erst 1885 vorgeschlagen und damit den Namen der «Formel von Ganguillet und Kutter» wenig gefährdet. Bereits 1887 schlug Knauff Gl. (9) auch für kreisförmige Kanalisationsrohre vor. Damit begann der Siegeszug der «kleinen Kutter-Formel», die das Kanalisationswesen bis um 1950 prägte. Sie wurde 1888 durch amerikanische Versuche erhärtet, in der Diskussion verwies jedoch Frank auf seine frühere Arbeit und propagierte die hydraulische Berechnung anhand graphischer Tabellen. In Rohren wurde die eigene, 1881 entwickelte Beziehung als beste gefunden sowohl für neue als auch für gebrauchte Oberflächen.

Lang (1889) leitete aufgrund des grossen Datenmaterials sowohl für glatte als auch für rauhe Rohre Beziehungen ab, in denen der Beiwert C nach Gl. (3) von

einer Zahl ähnlich der Reynoldszahl abhängt, die «Rauhigkeit» aber nicht explizit erscheint. Die «Formeln von Lang» waren während rund 30 Jahren populär im deutschsprachigen Raum.

Manning, Flamant und Bazin

Über die Formel von Manning ist viel geschrieben worden, so in jüngerer Zeit beispielsweise von Chow (1955), Powell (1962, 1968), Williams (1970) und Dooge (1987). Eine ausgezeichnete Übersicht über Robert Manning (1816–1897) und die Hydraulik jener Zeit gab kürzlich Doodge (1989a, b). Dabei ist es aber wichtig zu wissen, dass:

- vor Manning eine ganze Reihe von anderen Forschern dieselbe Formel bereits ableiteten,
- Manning seine 1889 aufgestellte Formel bereits 1895 wieder verwarf und eine andere Beziehung empfahl,
- Strickler (1923) anhand von Messungen in Kanälen und Röhren die Manning-Formel erst als die beste Potenzformel empfahl.

Wie erwähnt schlug Gauckler 1867 Gl. (6) vor, reduzierte jedoch deren Anwendung auf Gefälle grösser als 0.07%. Im Jahre 1881 schlug Hagen anhand einer kleinen Messserie ebenfalls (und vermutlich unabhängig von Gauckler) Gl. (6) vor. Manning wusste davon, auch von der Arbeit Kutters und bezog sich ebenfalls auf Major Allan Cunningham (1876), der jedoch Gl. (6) ablehnte wegen zu grosser Fehler. Nach Dooge (1989) dürfte Manning keine direkte Kenntnis von der Formel von Gauckler besessen haben, und auch in der Privatkorrespondenz mit Flamant zwischen 1890 und 1895 findet sich kein Hinweis darauf. Da Manning gute Beziehungen zu Paris pflegte, wusste auch Flamant, ein bekannter Hydrauliker und Kollege von Boussinesq, von der Potenzformel und empfahl sie in seinem Buch von 1891.

Bereits 1882 fasste Flamant ebenfalls die Arbeit von Cunningham (1881) zusammen, welche in einem 400seitigen Buch mit vielen Tafeln und Tabellen nun komplett vorlag. Cunningham ging es in seiner Arbeit vor allem um:

- eine gute Messmethode für die Durchflüsse,
- die Entwicklung von Fließformeln und
- den Vergleich der Resultate mit bekannten Ansätzen.

Als Folgerungen aus der Studie wurde abgeleitet:

- mit Ballast beschwerte Vertikallatten sind für Wassertiefen bis etwa 4.5m einfache und zuverlässige Driftkör-

Literatur

Allen, J. (1970): Osborne Reynolds and engineering science today. Manchester University Press; Barnes & Nobles: New York.

Anonymus (1890): On the flow of water in open channels and pipes. *The Engineering and Building Record* 21: 266.

Bazaine, A. (1876): Mémoire sur une nouvelle formule de jaugeage des cours d'eau [par MM. Ganguillet et Kutter]. *Mémoires et Compte Rendu des Ingénieurs Civils de France* 29: 481–504.

Bazin, H. (1871): Etude comparative des formules nouvellement proposées pour calculer le débit des canaux découverts. *Annales des Ponts et Chaussées* 41 (1): 9–43.

Bazin, H. (1897): Etude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts. *Annales des Ponts et Chaussées* 67 (4): 20–70, sowie Faltblatt 29.

Biswas, A.K. (1970): History of hydrology. North-Holland Publishing Comp.: Amsterdam, London.

Bornemann, K.R. (1869): Die Gauckler'sche Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen. *Der Civilingenieur* 15: 13–52.

Charié-Marsaines, M. (1858): Notice nécrologique sur M. Darcy, inspecteur général des ponts et chaussées. *Annales des Ponts et Chaussées* 28 (1): 90–109.

Chow, V.T. (1955): A note on the Manning formula. *Trans. American Geophysical Union* 36: 688; 37: 327–330.

Colebrook, C.F. (1938): Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Proc. Institution Civil Engineers* 11: 133–156; 1939, 12: 393–422.

Colebrook, C.F., and White, C.M. (1937): Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proc. Royal Society London A* 161: 367–381.

Cox, W. (1892): Pipe computations. *Engineering News* 28: 582–583.

Cunningham, A.J.C. (1876): Hydraulic experiments at Roorkee. *Minutes, Proc. Institution of Civil Engineers* 71: 1–94.

Cunningham, A. (1881): Roorkee Hydraulic Experiments: Roorkee.

Cunningham, A. (1883): Recent hydraulic experiments. *Minutes, Proc. Institution Civil Engineers* 71: 1–94

Dal Bosco, B. (1873): Le nuove formole sul moto dell'acqua nei canali e negli alvei sistemati dei fiumi. Versione dal tedesco permessa dall'Autore, con una introduzione del Comm. Prof. F. Brioschi. Tipog. e prem. Litog. degli Ingegneri: Milano.

Darcy, H. (1854): Rapport sur un mémoire sur des recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 38 (26): 1109–1121.

Darcy, H. (1857): Recherches expérimentales sur le mouvement de l'eau dans les tuyaux. *Annales des Ponts et Chaussées* 27 (2): 570–572.

Darcy, H. (1858): Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. *Mémoires présentés par divers Savants* 15: 141–359.

Darcy, H., und Bazin, H. (1865): Recherches Hydrauliques. Imprimerie Impériale: Paris, auch *Mémoires présentés par divers Savants* 19: 1–494

Darrach, C.G. (1878): The flow of water in pipes under pressure. *Trans. ASCE* 7: 114–121.

Dooge, J.C.I. (1987): Historical development of concepts in open channel flow. *Hydraulics and Hydraulic Research – A Historical Review* ed. G. Garbrecht, A.A. Balkema: Rotterdam.

Dooge, J.C.I. (1989a): The Manning formula in context. *Proc. Int. Conf. Channel Flow and Catchment Runoff: Centennial of Manning's formula and Kuichling's Rational formula: 849–902*. ed. B.C. Yen, University of Virginia: Charlottesville.

Dooge, J.C.I. (1989b): Robert Manning (1816–1897). Vortrag an die *Institution of Engineers of Ireland, Dublin*.

Dooge, J.C.I. (1992): The Manning formula in context. *Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula*, B.C. Yen, ed. Water Resources Publications: Littleton, Col.

Duane, J. (1893): The effect of tuberculation on the delivery of a 48in. water main. *Trans. ASCE* 28: 26–31; 257–275; 352–357.

Ellis, T.G. (1877): The flow of water in open channels. *Trans. ASCE* 6: 250–257.

FitzGerald, D. (1896): Flow of water in 48-in. pipes. *Trans. ASCE* 35: 241–304.

Flamant, A. (1882): Compte rendu des expériences hydrauliques faites à Roorkee (Inde Anglaise). *Annales des Ponts et Chaussées* 52 (2): 43–96.

Flamant, A. (1891): *Hydraulique*. Béranger: Paris; auch erschienen als dritte Auflage unter *Encyclopédie des Travaux Publics*, 1909.

Flamant, A. (1892): Formules de l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de conduite. *Annales des Ponts et Chaussées* 62: 301–345.

Forchheimer, P. (1914): *Hydraulik*. Teubner: Leipzig und Berlin.

Foss, W.E. (1894): New formulas for calculating the flow of water in pipes and channels. *Journal of the Association of Engineering Societies* 13: 295–309.

Frank, A. (1881): Die Formeln über die Bewegung des Wassers in Röhren. *Der Civilingenieur* 27: 161–222.

Frank, A. (1886): Die Berechnung der Kanäle und Rohrleitungen [nach einem neuen einheitlichen System mittels logarithmo-graphischen Tabellen]. R. Oldenbourg: München und Leipzig (mit 9 Tafeln und 11 Figuren).

Fteley, A., und Stearns, F.P. (1883): Descriptions of some experiments on the flow of water made during the construction of works for conveying the water of Sudbury river to Boston. *Trans. ASCE* 12 (1): 1–36; 12 (2): 37–80; 12 (3): 81–118.

Ganguillet, E., und Kutter, W.R. (1869): Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Canälen und Flüssen, gestützt auf die Resultate der in Frankreich vorgenommenen umfangreichen und sorgfältigen Untersuchungen und der in Nordamerika ausgeführten, grossartigen Strommessungen. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- und Architektenvereins* 21: 6–25; 46–59.

Grashof, F. (1869): Humphreys und Abbots Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 13 (5): 289–300; 13 (6): 353–364; 13 (8): 481–490.

Gauckler, P. (1867): Etudes théoriques et pratiques sur l'écoulement et le mouvement des eaux. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 64 (16): 818–822; 64 (19): 918.

Gauckler, P. (1868a): Du mouvement de l'eau dans les conduites. *Annales des Ponts et Chaussées* 38 (1): 229–281.

- Gauckler, P. (1868b): Über die Bewegung des Wassers in Kanälen und Röhrenleitungen. *Civilingenieur* 14: 490–526.
- Gravelius, H. (1898): Die Geschwindigkeitsformel. *Zeitschrift für Gewässerkunde* 1: 196–208.
- Grebenau, H. (1867): Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen [nach den auf Kosten der V. Staaten von Nord-Amerika vorgenommenen Untersuchungen und Bericht Humphreys' und Abbot's über die physischen und hydraulischen Verhältnisse des Mississippi-Stromes, seiner Nebenflüsse, Mündungen und Alluvial-Regionen]. J. Lindauer: München.
- Hagen, G. (1868a): Die neuen Theorien der Bewegung des strömenden Wassers. *Zeitschrift für Bauwesen* 18: 63–72.
- Hagen, G. (1868b): Über die Bewegung des Wassers in Strömen. *Mathematische Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 24 (2): 1–29.
- Hagen, G. (1869): Über die Bewegung des Wassers in cylindrischen, nahezu horizontalen Leitungen. *Mathematische Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* 26: 1–29.
- Hagen, G. (1876): Untersuchungen über die gleichförmige Bewegung des Wassers. Ernst & Korn: Berlin.
- Hagen, G. (1881): Neuere Beobachtungen über die gleichförmige Bewegung des Wassers. *Zeitschrift für Bauwesen* 31: 403–412.
- Hager, W.H. (1988): Abflussformeln für turbulente Strömungen. *Wasserwirtschaft* 78 (2): 79–84.
- Hager, W.H. (1991): Teilfüllung in geschlossenen Kanälen. *gwf-Wasser/Abwasser* 132 (10): 558–564; 132 (11): 641–647.
- Halbertsma (1879): Die Bewegung des Wassers in Röhren [von Charles G. Darrach]. *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 22: 236–241.
- Hering, R. (1879): The flow of water in small canals [after Ganguillet and Kutter, with Kutter's diagram modified, and graphical tables with special reference to sewer calculations]. *Trans. ASCE* 8: 1–14.
- Hering, R., und Trautwine, J.C. (1890): Diagrams of hydraulic formulas. *Engineering News* 24: 206–207; 236.
- Hering, R., und Trautwine, J.C. (1893): *A general formula for the uniform flow of water in rivers and other channels*. John Wiley & Sons: New York.
- Humphreys, A.A., und Abbot, H.L. (1861): Report upon the physics and hydraulics of the Mississippi river. Government Printing Office: Washington.
- Iben, O. (1880): *Druckhöhen-Verlust in geschlossenen eisernen Rohrleitungen*. Otto Meissner: Hamburg.
- Knauff, M. (1887): Formeln für städtische Leitungen. *Gesundheitsingenieur* 10 (1): 13–17; 10 (2): 57–62.
- Knauff, M. (1888): Geschwindigkeitsformel für ein städtisches Druckrohr. *Gesundheitsingenieur* 11 (20): 671–674; 11 (22): 729–730.
- Kutter, W.R. (1868a): *Kurzer Bericht über die neuen Theorien der Bewegung des Wassers in Flüssen und Kanälen* [von Darcy und Bazin und von Humphreys und Abbot, nebst einer Coefficienten-Scala zum Gebrauch für den schweizerischen Ingenieur]. K.J. Wyss: Bern.
- Kutter, W.R. (1868b): Die neue amerikanische Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Canälen von Humphreys und Abbot und die bisherigen europäischen Formeln. *Cultur-Ingenieur* 1: 293–310.
- Kutter, W.R. (1869a): Die neue Theorie der Bewegung des Wassers in Flüssen und Kanälen [von Humphreys und Abbot in Beziehung auf die schweizerischen und andere Gewässer mit stärkeren Gefällen]. *Allgemeine Bauzeitung* 34: 126–155.
- Kutter, W.R. (1869b): Die neuen Formeln für die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit des Wassers in Canälen und Flüssen (von Darcy und Bazin und von Humphreys und Abbot, nebst mehreren Coefficientenscalen zum praktischen Gebrauche). *Cultur-Ingenieur* 2: 87–95; 154–188.
- Kutter, W.R. (1869c): Mittlere Geschwindigkeiten und Wassermenge (per Sekunde in Gräben und Flüssen mit verschiedener Rauheit des benetzten Umfangs und mit verschiedenen Gefällen und Querschnittsformen – Für den praktischen Gebrauch bearbeitet). *Cultur-Ingenieur* 2: 327–477.
- Kutter, W.R. (1870): Die neuen Formeln für die Bewegung des Wassers in Kanälen und regelmäßigen Flussstrecken. *Allgemeine Bauzeitung* 35: 10–28; 44–59; 137–150; 210–244; 267–276 sowie 21 Tafeln.
- Kutter, W.R. (1871): Ergänzende Tabellen der mittleren Geschwindigkeit des Wassers [und der abfließenden Wassermengen in Canälen mit 1 1/2-füssigen Seitenwänden pr. Secunde; in Metermass]. *Cultur-Ingenieur* 3: 224–232.
- Kutter, W.R. (1873): Einfluss der Störungen der gleichförmigen Bewegung des Wassers [auf der Geschwindigkeit desselben und etwas über die Geschiefbeführung in Kanälen und Flüssen]. *Allgemeine Bauzeitung* 38: 272–292.
- Kutter, W.R. (1877): *Die neuen Formeln für die Bewegung des Wassers in Kanälen und regelmäßigen Flussstrecken*. 2. Auflage. R. v. Waldheim: Wien.
- Lampe, C.J.H. (1873): Untersuchungen über die Bewegung des Wassers in Röhren. *Der Civilingenieur* 19: 1–50; 67–112.
- Lang, H. (1889): *Des Ingenieurs Taschenbuch*. Band 1, Auflage 14. Akad. Verlag Hütte: Düsseldorf.
- Leliavsky Bey, S. (1951): Historic development of the theory of the flow of water in canals and rivers. *The Engineer* 191: 466–468; 498–501; 533–535; 565–567; 601–603; 615.
- Lévy, M. (1867): Théorie d'un courant liquide à filets rectilignes et parallèles de forme transversale quelconque. Application aux tuyaux de conduite. *Annales des Ponts et Chaussées* 37 (1): 237–319.
- Mair, J.G. (1886): Experiments on the discharge of water of different temperatures. *Minutes, Proc. Institution Civil Engineers* 84: 424–435.
- Manning, R. (1889): On the flow of water in open channels and pipes. *Trans. Institution of Civil Engineers*, Ireland 20: 161–207.
- Manning, R. (1895): On the flow of water in open channels and pipes. – Supplement zum Aufsatz 1889. *Trans. Institution of Civil Engineers*, Ireland 24: 179–207.
- Powell, R.W. (1962): Another note on Manning's formula. *Trans. American Geophysical Union* 67: 3634.
- Powell, R.W. (1968): The origin of Manning's formula. *Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division* 94(HY4): 1179–1181.
- Reynolds, O. (1883): An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Philosophical Transactions A* 174: 935–982, inkl. Tafeln 72 bis 74.
- Rouse, H. (1976): *Hydraulics in the United States 1776–1976*. Institute of Hydraulic Research, University of Iowa: Iowa.
- Rouse, H., und Ince, S. (1957): *History of Hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa: Iowa.
- Sherman, C.W. (1931): Great hydraulic engineers of New England's classic period. *Engineering News-Record* 107: 475–479.
- Smith, jr., H. (1883): The flow of water through pipes. *Trans. ASCE* 12 (4): 119–125.
- Stapfer (1869): Sur l'usage des formules de M. Gauckler et de Prony, relatives au mouvement de l'eau dans les canaux découverts. *Annales des Ponts et Chaussées* 39 (2): 51–64.
- Stearns, F.P. (1885): Experiments on the flow of water in a 48-inch pipe. *Trans. ASCE* 14: 1–18.
- Stoecklin (1905): Notice biographique sur M. Gauckler. *Annales des Ponts et Chaussées* 74 (4): 10–15.
- Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilung 16. Amt für Wasserwirtschaft: Bern. Auch erschienen in *Bulletin Technique de la Suisse Romande* 49 (26): 315–316.
- Swan, C.H. (1880): Note on Kutter's diagram. *Trans. ASCE* 9: 326–328.
- Timoshenko, S.P. (1953): *History of strength of materials*. Mc Graw-Hill: New York.
- Tolkmitt, G. (1898): Die neue Geschwindigkeitsformel von Bazin. *Centralblatt der Bauverwaltung* 18 (27): 317–318.
- Tutton, C.H. (1899): The flow of water in pipes. *Journal Association of Engineering Societies* 23 (4): 151–165.
- Unwin, W.C. (1884): Experiments on disks revolved in water. *Minutes, Proc. Institution Civil Engineers* 80: 221–239.
- Unwin, W.C. (1886): The flow of water in pipes. *Engineer* 61 (1): 1; 61 (5): 104.
- Vallot, H. (1887): Du mouvement de l'eau dans les tuyaux circulaires. [Théorie de M. Maurice Lévy, table pour le calcul des conduites]. *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils* 40 (2): 527–586.
- Vischer, D. (1983): Schweizer Pioniere der Hydraulik. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 101 (48): 1129–1134.
- Wehage (1884): Über den Leitungswiderstand von Röhren. *Dingler's Polytechnisches Journal* 252: 89–96.
- Wehner, H. (1897): Ein Beitrag zur Berechnung des Rohrwiderstandes in der Praxis. *Gesundheits-Ingenieur* 20 (17): 273–278.
- Weston, E.B. (1890): The results of investigations relative to formulas for the flow of water in pipes. *Trans. ASCE* 22: 1–90.
- Williams, G.P. (1970): Manning formula – a misnomer? *Proc. ASCE, Journal of Hydraulics Division* 96 (HY1): 193–200; 96 (HY6): 1373; 96 (HY9): 1910–1914; 96 (HY10): 2139–2141; 1971, 97 (HY5): 733–735.

Flamant (1839–1914)

Alfred-Aimée Flamant wurde in Noyales (Aisne) am 31. Oktober 1839 geboren und schloss 1859 an der Ecole des Ponts et Chaussées als Ingenieur ab. In Lille beschäftigte er sich vorerst mit Kanalbauwerken. 1872 wurde er Inspektor und hatte dabei mit Strassen und Hafengebäuden in Südfrankreich zu tun. Als Chef-Ingenieur (1879) hatte er den Verbindungskanal zwischen Dêule und Seine zu studieren, damit die Kohle einfacher nach Paris transportiert werden könne. Dieses Projekt wurde jedoch nicht ausgeführt.

Flamant trat dann als Assistenzprofessor für angewandte Mechanik in die Ecole des Ponts et Chaussées ein. 1893 wurde er Inspecteur Général und später auch Offizier der Ehrenlegion. Er liess sich 1910 pensionieren und verstarb bei Kriegsausbruch 1914. Sein wissenschaftliches Werk umfasst verschiedene Arbeiten bei den Annales des Ponts et Chaussées sowie Bücher über die Angewandte Mechanik, die Hydraulik, die Elastizitätstheorie (Timoshenko 1953) sowie die Häfen und Strassen von Algerien.

per, sie erlauben die Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit,

- der Durchfluss dürfte mit solchen Messlatten etwa auf 3% (!) genau errechnet werden,
- von der mittleren Geschwindigkeit in Kanalmitte darf nicht unmittelbar auf die Geschwindigkeit bezüglich des gesamten Querschnitts geschlossen werden, und
- das Geschwindigkeitsmaximum befindet sich unterhalb der Oberfläche, und der Wind hat darauf praktisch keinen Einfluss.

Diese und weitere Folgerungen basieren auf umfangreichen Messungen von rund 50 000 Einzelgeschwindigkeiten und vielen geometrischen Abmessungen, welche während der Jahre 1874–1879 am Gangeskanal (Uttar-Pradesh) ausgeführt wurden.

Mannings Formel fand dann eine rasche Verbreitung in England und insbesondere in den USA. Bereits 1890 wurde sie in Amerika zur Anwendung empfohlen (Anonymus 1890). Das besondere Verdienst von Manning ist wohl die Verbindung der Formeln von Gauckler und Ganguillet-Kutter über den in der Zwischenzeit bekannten Reibungsbeiwert l/n . Eine ausführliche Darstellung der Formel von Manning gab Williams (1970). Obwohl er durch die Benennung

Gauckler-Manning-Formel den Beitrag des Franzosen würdigen wollte, drang Powell in der Diskussion damals mit diesem Votum nicht durch.

In der Folge wurden ausgedehntere Messungen angestellt, die sich sowohl auf rauhe Gerinne als auch auf glattere Rohre bezogen. Flamant (1892) beispielsweise stellte anhand von Messungen bei Blei-, geteerten Blech-, Weissblech-, Glas-, gezogenen Eisen- und neuen Gussrohren fest, dass die einfache Beziehung

$$(15) \quad a^4 V^7 = J_f^4 D^5$$

in Druckrohren gelte, wonach also der Gefällsterm und der Durchmesser des Kreisrohres die Exponenten 0.57 und 0.71 besitzen und demnach sich der Abfluss im turbulent glatten Regime befindet. Trotz dieser vom heutigen Standpunkt aus gesehen korrekten Formel im turbulent glatten Regime für einen bestimmten Bereich von Reynoldszahlen (Hager 1988) wird Flamant mit Gl. (15) mehr Verwirrung angerichtet als Klarheit hervorgerufen haben. Dabei darf die erwähnte Beziehung noch zu den erfolgreichsten Gleichungen gezählt werden, da sie physikalisch einwandfrei erscheint und in der Anwendung relativ einfach ist.

In Frankreich zählte auch die Formel von Bazin (1897)

$$(16) \quad V/(J_s R_h)^{1/2} = \frac{87}{1 + \gamma/\sqrt{R_h}}$$

zu den bis in die neuere Zeit beliebten Beziehungen, mit welcher offene Kanäle berechnet wurden. Im Gegensatz zur Gl. (10) nach Darcy und Bazin (1865) liegt nun lediglich noch ein «Rauigkeitskoeffizient» γ vor, der in den bereits erwähnten Kategorien von 0.06 bis 1.75 variiert. Man beachte, dass die Gln. (9) und (16) nach Kutter (1885) und Bazin (1897) bis auf die Konstante übereinstimmen. Andererseits streben beide Formeln für grosse Werte von R_h gegen den Ausdruck von Chezy. Bazins Formel wurde durch Gravelius (1898) – einer illustren Persönlichkeit der Gewässerkunde und Professor in Dresden – und Tolkmitt (1898), einem bekannten Wasserbauer aus Charlottenburg, auch im deutschsprachigen Raum verbreitet.

Entwicklung in den USA

Zu den ersten Beiträgen aus den USA darf die Arbeit von Ellis (1877) gezählt werden. Darin werden die Formeln von Darcy und Bazin, Ganguillet und Kutter inklusive der n -Werte sowie von Humphreys und Abbot vorgestellt. Die

Formel von Ganguillet und Kutter wurde als allgemeinste trotz ihrer Unzulänglichkeiten zur Anwendung empfohlen.

1879 veröffentlichte Hering eine Arbeit, die die Popularität der Formel von Ganguillet und Kutter in den USA stark förderte. Darin werden als hervorragendste Eigenschaften nochmals das Rauigkeitsverhalten sowie die universelle Anwendung für «alle» ingenieurmässigen Anwendungen bestätigt. Die erste Kunde von der neuen Formel soll dabei im Schweizer Pavillon an der Hundertjahr-Ausstellung 1876 in Philadelphia in die neue Welt gekommen sein. Diese Formel wurde dann diagrammhaft auf Abwasserkanalisationen angewendet. Ein noch beliebteres Diagramm wurde von Hering und Trautwine (1890) veröffentlicht. Swan (1880) ergänzte die ursprüngliche Arbeit ebenfalls.

Basierend auf Darrach (1878) veröffentlichte Halbertsma (1879) in Deutsch dessen Messungen in den Wasserwerken von Philadelphia. Daraus scheint hervorzugehen, dass anstelle der neuen Formel von Hagen diejenige von Weisbach zu wählen sei, entgegen der Empfehlung der Autorität des Wasserbauers Grashof.

Smith (1883) stellte neue Experimente in Gussrohren sowie Glas- und Holzrohren für Durchmesser zwischen 13mm und 1.2 m vor. Die Rohroberflächen variierten zwischen glatt und verkrustet, und infolge dieser verschiedenartigen Zustände wurde schon gar keine Formel abgeleitet. Eine deutsche Übersetzung dieser Arbeit stammt von Wehage (1884).

Die ersten zuverlässigen Experimente aus den USA in der Rohrhydraulik stammen von Stearns (1885). Sie wurden an der Wasserversorgung von Boston durchgeführt. Das 48-inch-Rohr (1220mm Durchmesser) war aus Guss-eisen, welches innen einen Teerüberzug besass und bereits zwei Jahre in Betrieb war. Es wurden vier sehr genaue Einzelerperimente durchgeführt. Daraus wurde eine erstaunlich geringe Rauigkeit abgeleitet sowie festgestellt, dass ältere Formeln diese Experimente überhaupt nicht beschreiben. In der Diskussion wird wiederum die Formel von Ganguillet und Kutter als beste hingestellt, obwohl die «richtige» Wahl des Reibungskoeffizienten viel Erfahrung verlange. Früher leiteten aber Fteley und Stearns (1883) als Nebenergebnis von bekannten Überfallmessungen ein Gesetz ab, das ausgedrückt werden kann durch

$$(17) \quad V = 127 J_f^{1/2} R_h^{0.62}$$

Ein halbes Lehrbuch von fast 100 Seiten Stärke publizierte *Weston* (1890). Darin werden drei Leitungstypen unterschieden, nämlich glatte (ähnlich wie Messing- oder Bleirohre), fast neue und ältere Rohre, wie man sie typisch bei Gussrohren findet. Je nach Geschwindigkeit und Durchmesser werden für alle eigene Beziehungen vorgeschlagen, die insbesondere bei Durchmessern kleiner als 100mm Anwendung finden. In der Diskussion wurde bemängelt, dass eine breitere Palette von Reibungsbeiwerten – analog zu Kutter – bereitzustellen sei, ein besserer Reibungsparameter einzuführen wäre sowie die Dimensionslosigkeit in der empfohlenen Formel noch immer fehle. Die Publikation gibt als Nebenresultat eine Beschreibung von älteren amerikanischen Versuchsberichten.

Duane (1893) verglich verschiedenartig verkrustete Rohre mit einem gleichen, aber neuen Rohr von 48 inch (1220mm) Durchmesser. Er fand, dass ein unbehandeltes Gussrohr innerhalb von wenigen Jahren stark verkrustet, bei sauberem Teeranstrich innerhalb von mehr als 10 Jahren jedoch praktisch kein Verlust gegenüber dem Neuzustand auftritt.

1893 erschien die zweite Auflage von Hering und Trautwine als englische Übersetzung von Kutters Buch (1877). Dieses Werk hat den Namen von Kutter weltweit verbreitet und die Formel von Ganguillet und Kutter äusserst populär gemacht. Daneben wurde auch der Rauigkeitsbeiwert $1/n$, welcher wenig modifiziert auch in der Manningformel erscheint, als Charakterisierung einer Oberfläche eingeführt. Schliesslich liegt auch eine Biographie von Kutter samt einem Verzeichnis seiner Veröffentlichungen vor.

Aufbauend auf den Arbeiten von Reynolds (1883), Unwin (1884, 1886), Mair (1886) und Flamant (1892) leitete Foss (1894) eine Potenzgleichung der Form

$$(18) \quad J_f = C_f D^{-m} V^n$$

ab. Für neue Gussrohre fand er $m=1.33$ und $n=1.88$, während sich für genietete Rohre $m=1.16$ und $n=1.80$ ergab. Überschlägig wäre gar die Beziehung mit $m=4/3$ und $n=11/6$ für beide Rohrtypen anzuwenden, falls die Proportionalitätskonstante entsprechend angepasst wird. Daraus folgt $V \sim (J_f^{1/2} D^{2/3})^{12/11}$, was nahe an der GMS-Formel liegt. Die von einem weiteren Grossversuch abgeleiteten Messdaten von FitzGerald (1896) sind eigentlich interessant. Ihre Auswertung bezieht sich jedoch auf neue Formeltypen, und ein Vergleich mit bekannten Beziehungen unterbleibt.

Tutton (1899) schliesslich gelangte anhand einer interessanten Überlegung auf die GMS-Formel, welche bei üblichen Rauigkeiten gut mit der «kleinen Kutterformel» übereinstimmt. Weiter fand er als Zusammenhang zwischen den Exponenten m und n nach Gl. (18) $m=1.17n-1$, für $n=2$ wird also $m=4/3$. Die Beziehung

$$(19) \quad V = C_T J_f^p R_h^{1.17-p}$$

darf als interessante Erweiterung der GMS-Formel betrachtet werden, welche bereits in modifizierter Form von Reynolds stammt. Für Zinnrohre folgt $p=0.58$, für gewundene Eisen- und asphaltbestrichene Rohre $p=0.55$, für geteerte und galvanisierte Rohre $p=0.48$. Diese Arbeit steht als ein wertvoller amerikanischer Beitrag am Abschluss des 19. Jahrhunderts da.

Österreich und Italien für kenntnisreiche und hochinteressante Beiträge zu gewinnen. In einer durchgehend illustrierten Form wird dem Leser deutlich vor Augen geführt, welche ungeheuren Anstrengungen notwendig waren, die Gewalt des Wassers zu bändigen, viele Landstriche zu kultivieren und überschüssiges Wasser abzuleiten.

Räumlich wird der Bogen geschlagen vom Hochgebirge über das Alpenvorland bis zur Donau und donauabwärts bis nach Wien. Inhaltlich angesprochen werden die Wiesenbewässerung, Flusskorrekturen, die Wildbachverbauung, Hochwasserschutz, Entwässerung und Moorkultivierungen: ein spannungsreiches Feld mit ganz aktuellen Bezügen.

Der interessierte Leser findet in allen Beiträgen eine Fülle von Fachinformationen und eine Vielzahl von zum Teil historischen Abbildungen, die ihm ein umfassendes Bild von den bewältigten Problemen vermitteln.

Anmerkung

Nach Eingang des Manuskripts im Herbst 1992 erschien ein weiteres Werk zur Manning-Formel: *Yen, B.C.* (1992): Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula. Darin wird speziell auf Dooge (1992) hingewiesen.

Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Arbeit ist einerseits die Geschichte der Fliessformel zwischen den Jahren 1867 und 1897 nachgezeichnet und andererseits deutlich vor Augen geführt worden, wie wichtig genau beschriebene und exakt ausgeführte Experimente eine physikalische Gesetzmässigkeit beschreiben. Viele Irrwege wären im nachhinein unnötig gewesen, hätte man sich an diese Anforderungen gehalten.

Obwohl das universelle Fliessgesetz erst um 1940 aufgestellt wurde, sind in der erwähnten Periode des vergangenen Jahrhunderts wichtige Voraussetzungen dafür geschaffen worden. Einerseits haben Darcy und Bazin experimentell Entscheidendes geleistet, andererseits ist die Einführung eines Rauigkeitsbeiwertes speziell Kutter zu verdanken. Zusammen mit Strickler hat deshalb Kutter einen wesentlichen Anteil an der in der Praxis nach wie vor aktuellen Fliessformel.

Adresse des Verfassers: *Willi H. Hager*, Dr.sc.techn., dipl. Bauing. ETH/SIA, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zentrum, 8092 Zürich

Verdankung

Ich möchte mich bei Herrn dipl. Bauing. ETHZ *N. Schnitter*, Zürich, für die Anregungen und Verbesserungen des Manuskripts freundlich bedanken.

Bücher

Historische Wasserwirtschaft im Alpenraum und an der Donau

Hrsg. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Bearbeitet von *Werner Konold*. 450 Seiten, 280 Schwarzweiss- und 21 Farbbabb., geb., Preis: Fr. 98.–, Verlag Konrad Wittwer GmbH, Stuttgart 1993. ISBN 3-87919-174-3

In den Gebirgsregionen und im Vorland war von jeher das Wasser Schrecken und Segen zugleich. Zahlreiche Wasserbauten und viele technische Meisterleistungen der Vergangenheit, die der Eindämmung der Naturgewalt und der Nutzbarmachung des Wassers dienen sollten, sind heute kaum mehr sichtbar und gänzlich dem Bewusstsein entrückt. Dem Bearbeiter ist es gelungen, ausgewiesene Fachleute aus Deutschland, der Schweiz,

Sammlung von Bundesgesetzen über den Natur- und Umweltschutz

Eine handliche Sammlung von Bundesgesetzen im Bereich Natur- und Umweltschutz wird neuerdings von der sanu (Schweizerische Ausbildungsstätte für Natur- und Umweltschutz) angeboten. Dank ihr erübrigt sich die Anschaffung der «Systematischen Sammlung des Bundesrechts» (SR), welche teuer und im Unterhalt arbeitsintensiv ist. Trotzdem besteht die Gewähr, alle wesentlichen Rechtsnormen im aktuellen Wortlaut konsultieren zu können. Die Sammlung umfasst über 80 Gesetze, Verordnungen, Bundesbeschlüsse usw. in 3 Ordnern und wird für Fr. 300.– verkauft. Die Änderungen und Erweiterungen können im Jahresabonnement bestellt werden.

Information und Bestelltalon bei: sanu, Postfach 3126, 2500 Biel 3, Tel. 032/22 14 33, Fax 032/22 13 20.