

# Schweizer Pioniere der Hydraulik: zum 200. Todestag von Leonhard Euler

Autor(en): **Vischer, Daniel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 48

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75240>

## **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.

# Schweizer Pioniere der Hydraulik

## Zum 200. Todestag von Leonhard Euler

Von Daniel Vischer, Zürich

Am 18. September 1983 jährte sich zum zweihundertsten Male der Todestag von Leonhard Euler, einem der grossen und universalen Gelehrten, die die Schweiz hervorgebracht hat. Neben vielen andern Neuerungen im Gebiet der Mathematik und der Physik hat er die klassische Mechanik der Festkörper und der Fluide begründet und damit die wissenschaftliche Basis für viele Sparten des Bauwesens gelegt. Es geziemt sich deshalb hier, seiner zu gedenken; allerdings soll dies nicht durch eine Würdigung seiner Persönlichkeit und seiner Verdienste geschehen – dies übernehmen andere –, sondern durch eine zusammenfassende Darstellung der Schweizer Pioniere der wasserbaulich orientierten Hydromechanik, d. h. der Hydraulik. In der Reihe dieser Pioniere nimmt Leonhard Euler zweifellos den ersten Platz ein: Er ist hinsichtlich Tiefgang, Mannigfaltigkeit und Ausstrahlung bei weitem der bedeutendste!

### Grundlagen der Hydraulik

Es wird allgemein anerkannt, dass der rechnerische Zugang zur Hydraulik vom Basler Mathematiker und Physiker **Daniel Bernoulli** (1700–1782) geöffnet wurde [1]. Er schrieb mehrere wegweisende Arbeiten über hydraulische Probleme und veröffentlichte zuerst 1733 in Petersburg und dann 1738 in Basel (Druck in Strassburg) sein berühmtes Buch «*Hydrodynamica*». Darin entwickelte er zwar nicht die ihm zugeschriebene und jedem Ingenieur geläufige Formel – das sogenannte Theorem von Bernoulli –, schuf aber die durch Experimente belegten Grundlagen dazu. Überdies behandelte er dort noch vieles, was damals neu war und heute selten mit seinem Namen in Verbindung gebracht wird [2]. Beispielsweise stellte er Formeln auf für die Bestimmung der Wasseroberfläche oder anderer Flächen konstanten Druckes in beschleunigten und rotierenden Gefässen; er verallgemeinerte das Problem der schwingenden Wassermasse in kommunizierenden Gefässen, indem er die Periode des einfachen Pendels als Referenzzeit einführte; er beschrieb als erster die Entwicklung einer Strömung in langen Rohren; er erfand die Idee des Strahlantriebs für Schiffe usw.

Daneben beschäftigte sich Daniel Bernoulli noch mit anderen Gebieten der Physik, so mit der Gravitation im Universum, der Elastizität fester Körper, dem Magnetismus und der Elektrizität [3]. Seine Werke werden gegenwärtig in 8 Bänden zusammengefasst und von Fachleuten kommentiert; die Hydraulik soll dabei in den Bänden 4 und 5, die voraussichtlich 1984 und 1987 erscheinen werden, zur Darstellung gelangen [4].

Eine noch grössere Ausstrahlung als Daniel besass sein Vater **Johann Bernoulli** (1667–1748), der ebenfalls Mathematiker und Physiker war. Er befasste sich sehr erfolgreich mit vielen Gebieten seiner Sparte, doch ist sein Verdienst in der Hydraulik umstritten. Er veröffentlichte nämlich sein einschlägiges Hauptwerk 1742 unter dem Titel «*Hydraulica... Anno 1732*» und behandelte darin ähnliche Probleme wie Daniel in seiner «*Hydrodynamica*». Dieser Umstand und die Vordatierung um ganze 10 Jahre auf 1732 – die «*Hydrodynamica*» von Daniel war ja zum ersten Mal 1733 erschienen – brachten ihn ins Zwielficht. Daniel empfand das Vorgehen seines Vaters jedenfalls als schieres Ehrabschneiden und beklagte sich bitter darüber, ja er gab in der Folge resigniert seine hydraulische Forschung auf [3]. Dementsprechend haftete der «*Hydraulica*» von Johann Bernoulli schon bald das Odium eines Plagiats an. Doch zeigen neuere Untersuchungen, dass dies nicht ganz gerechtfertigt ist. Denn, wie schon der Zeitgenosse, Leonhard Euler, feststellte, enthält die «*Hydraulica*» nicht nur neues Gedankengut, sondern geht in gewisser Hinsicht über die «*Hydrodynamica*» hinaus [5]. Sie ist es nämlich, die unter anderem jene Gleichungen zum ersten Mal anführt, die als Theorem von Bernoulli gewöhnlich, aber fälschlicherweise, Daniel Bernoulli zugeschrieben werden. Und zwar werden sie von Johann Bernoulli nicht nur für stationäre, sondern auch für instationäre Strömungen formuliert und begründen damit die für die Praxis so ergiebige Stromfadentheorie. «*Nicht von Bernoulli, sondern von einem anderen, der ebenfalls Bernoulli hiess!*», möchte man angesichts des Theorems von Bernoulli in Abwandlung eines Ausspruches über Shakespeare ausrufen.

Einer, der sowohl Johann als auch Daniel Bernoulli und ihre Werke bestens kannte, war **Leonhard Euler** (1707–1783). Er war ebenfalls von Basel und ging aus derselben, von der Bernoulli-Dynastie geprägten mathematisch-physikalischen Schule hervor. Doch überragte er schliesslich alle seine Lehrer und Kollegen bei weitem. Sein Arbeitsgebiet reichte vom Zentrum der Mathematik in die theoretische Physik, die Technik, die Astronomie und die Philosophie. Die von ihm darüber verfassten wissenschaftlichen Notizen, Aufsätze und Bücher sind *derart zahlreich und profund*, dass sie kaum überblickt, geschweige denn in Kürze vorgestellt werden können. Einen Anhaltspunkt über die Fülle vermittelt der Umstand, dass die Euler-Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft seit 1911 unter dem Titel «*Leonhard Euler – Opera Omnia*» bereits 74 Bände herausgegeben hat, und dass die entsprechende Reihe noch nicht abgeschlossen ist [6]. Zu den bedeutenden Neuerungen gehörten zweifellos die 1755 von Euler veröffentlichten Bewegungsgleichungen, die unter der Bezeichnung Eulersche Gleichungen oder Eulersche Differentialgleichungen die moderne Hydromechanik begründeten. Sie erfassten zusammen mit der ebenfalls von Euler in der allgemeinsten Form eingeführten Kontinuitätsgleichung die Strömung einer idealen, das heisst einer raumbeständigen und zähigkeitslosen Flüssigkeit aufs bestechendste. Unter anderem lieferten sie, wie Euler selbst nachweist, das schon mehrfach erwähnte Theorem von Bernoulli als Spezialfall für den Stromfaden. Deshalb wird dieses Theorem auch etwa Euler statt Daniel Bernoulli zugeschrieben [2]. Von Interesse ist noch, dass Euler 1754 die Theorie einer von ihm erdachten Reaktionsturbine veröffentlichte.

*Es hält schwer, nach diesem Höhepunkt geistigen Schaffens der drei Basler Gelehrten eine schweizerische Fortsetzung zu finden.* Universalgenies im Ausmass eines Euler oder der erwähnten Bernoullis gab es in der Hydraulik nicht mehr. Immerhin ist folgendes zu bemerken: Sowohl Euler als auch Johann Bernoulli stellten sich auf den Standpunkt, dass ihre Gleichungen keines Beweises in Form eines Experimentes bedürften. Sie durchdrangen alles von ihrer mathematischen Logik her und stiessen damit, wie Euler selbst bemerkte, schliesslich an Grenzen [2]. Ihre Berechnungen bezogen sich ja praktisch nur auf ideale Flüssigkeiten, für die sie lediglich zwei empirische Grössen be-



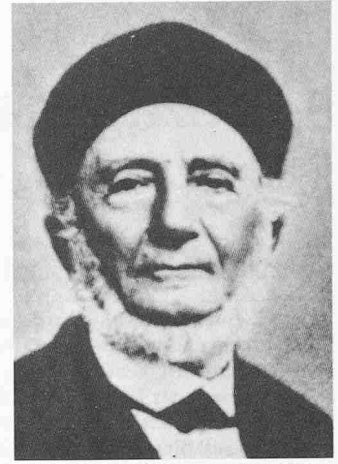
Daniel Bernoulli, 1700–1782



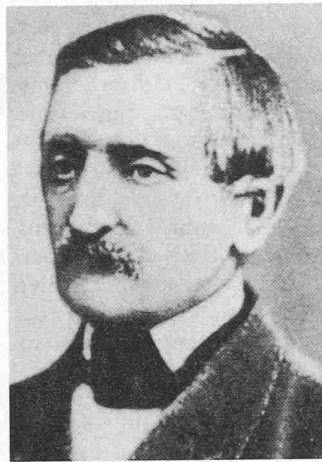
Johann Bernoulli, 1667–1748



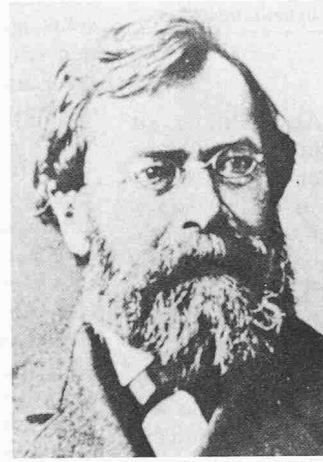
Leonhard Euler, 1707–1783



Jean-Daniel Colladon, 1802–1893



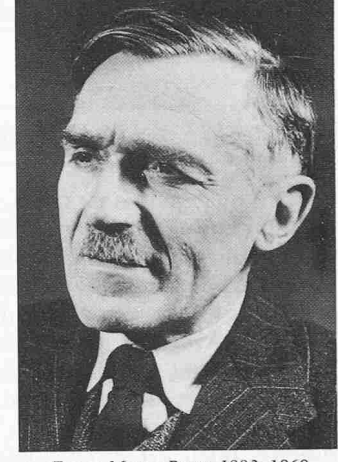
Wilhelm R. Kutter, 1818–1888



Emile O. Ganguillet, 1818–1894



Albert Strickler, 1887–1963



Eugen Meyer-Peter, 1883–1969

nötigten: die Flüssigkeitsdichte und die Erdbeschleunigung. Um aber eine wirkliche Flüssigkeit zu erfassen, braucht es mehr, nämlich Ansätze und Angaben über die Zusammendrückbarkeit und die Zähigkeit beziehungsweise die Reibung. Diese waren aber damals nicht oder in nur unzulänglicher Form verfügbar, was nach zeitraubenden *Experimenten* und *Naturbeobachtungen* rief. Und an diesen waren in der Folge auch mehrere Schweizer beteiligt.

### Zusammendrückbarkeit (Kompressibilität) und Reibung

Schon in jungen Jahren beschäftigten sich die Genfer **Jean-Daniel Colladon** (1802–1893) und **Charles-François Sturm** (1803–1855) mit der Kompressibilität von Flüssigkeiten. Aufgrund ihrer eingehenden Experimente gewannen sie 1827 einen einschlägigen Wettbewerb der französischen Akademie der Wissenschaften [7, 8]. Berühmt geworden sind die *Schallmessungen*, die dabei von Colladon im Genfersee zwi-

schen Rolle und Thonon auf einer Strecke von rund 14 km durchgeführt wurden. Der Schall wurde mit einer ins Wasser hängenden Glocke erzeugt und benötigte rund 10 Sekunden bis zum Ziel, wo er mit einem ins Wasser eingetauchten Riesenhörrohr empfangen wurde. Die Auswertung ergab eine Schallgeschwindigkeit von 1435 m/s bei 8 °C warmem Wasser. Sie stimmte sehr genau mit dem aufgrund der Theorie von *Poisson* (Hauptwerk 1829 [2]) errechneten Wert von 1437,8 m/s überein, was damals als Triumph der Wissenschaft gefeiert wurde [7]. Colladon wurde in der Folge *Physiker und Ingenieur*. Er wandte sich Problemen der Elektrizitätslehre, der Meteorologie und anderer Gebiete zu. Auch erfand er verschiedene Neuerungen im Dampfmaschinenbau und entwickelte ein nach ihm benanntes Trubinenrad (Schaufelrad). Europäische Bedeutung erhielt er vor allem durch die Förderung der Stadtgasversorgung und die Einführung des Druckluftbetriebes im Tunnelbau, beispielsweise am Gotthard. Dabei führte er auch eingehende Versuche zur Bestimmung der Reibung von Gas und Luft in einer 530 m langen

Leitung von 400 mm Innendurchmesser durch [8]. Sturm schlug die Laufbahn eines *Mathematikers* ein und wurde unter anderem durch sein Theorem bekannt.

Einen bedeutenden Beitrag zur Erfassung der Flüssigkeitsreibung leisteten die Ingenieure **Wilhelm Rudolph Kutter** (1818–1888) und **Emile Oscar Ganguillet** (1818–1894). Der erste war aus Ravensburg eingewandert und hatte sich in Mett bei Biel einbürgern lassen, der zweite war von Cormoret im Berner Jura. Sie befassten sich gemeinsam im Dienste des Kantons Bern mit dem Projekt der *Juragewässerkorrektion* und erkannten dabei die Bedeutung einer zutreffenden Erfassung der Reibung in Flüssen und Kanälen. Zuerst stellte Kutter einen Ansatz auf, der als Kutter-Formel bekannt wurde; dann veröffentlichten beide eine Erweiterung davon unter dem Titel *«Versuch zur Aufstellung einer neuen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Kanälen und Flüssen»*. Sie erschien zuerst 1869 als Aufsatz, dann 1877 als Buch, das 1889 ins Englische übersetzt wurde [2]. Dabei stützten sich die Ver-

fasser auf die Untersuchungen der Franzosen Darcy, Bazin und anderer sowie auf Messungen von Amerikanern am Mississippi und auf zahlreiche eigene Messungen an schweizerischen Flüssen und Bächen. Der Reibungsansatz von Ganguillet und Kutter erhielt damit für Freispiegelabflüsse für lange Zeit Weltgeltung.

Heute ist der Reibungsansatz des Zürcher Maschineningenieurs **Albert Strickler** (1887–1963) bekannter. Die entsprechende empirische Formel trägt im deutschen Sprachraum seinen Namen und im englischen jenen von *Manning*. Je nachdem wird sie oft auch als *Strickler-Manning-* oder *Manning-Strickler-Formel* bezeichnet. Sie lässt sich sowohl auf Freispiegel- als auch auf Druckgerinne anwenden und ist deshalb und wegen ihrer Einfachheit weltweit beliebt. In der Literatur wurde zwar mehrfach darauf hingewiesen, dass die Formel nicht von Strickler stamme [9]. Tatsächlich wurde sie bereits 1868 vom Franzosen *Gauckler* empfohlen, allerdings begrenzt auf Flüsse mit mehr als 0,7‰ Gefälle. Auch von anderen wurde sie empirisch abgeleitet, aber ebenfalls auf Spezialfälle beschränkt. Einzig der Ire *Manning* veröffentlichte sie 1891 für eine an sich unbeschränkte Anwendung auf Freispiegel- und Druckgerinne. Das heisst, er leitete sie aus vielen entsprechenden Messungen selber ab, verwarf sie dann aber aus theoretischen Überlegungen und weil ihm die darin enthaltene Kubikwurzel unpraktisch erschien. Er schlug an ihrer Stelle eine andere, kompliziertere Formel vor, die eine Zeitlang den Namen *Manning-Formel* führte. Demgegenüber propagierte *Strickler* seine Formel aufgrund von überaus zahlreichen Vergleichen mit eigenen und fremden Messungen als – wie er selber schrieb [10] – «*allgemein gültige Gleichung für den Energieverlust beim gleichförmigen turbulenten Strömen von Flüssigkeiten in Gerinnen irgendwelcher Art*». Und er stellte die Brauchbarkeit dieser Formel in seinem Hauptwerk «*Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*» derart überzeugend dar, dass er damit einen weltweiten Widerhall erzielte. Daher ist die Bezeichnung der Formel als *Strickler-Formel* durchaus berechtigt. Weniger bekannt ist, dass *Strickler* den Beiwert in seiner Formel mit der *Kornrauigkeit* beziehungsweise *Sandrauigkeit* der Gerinnewände in Beziehung brachte und dafür insbesondere für geschiebeführende Flüsse eine empirische Formel schuf, die in der Geschiebetheorie heute noch Anwendung findet.

Tabelle 1. Pioniere der Hydraulik

| Name                   | Lebensjahre | Studium, Beruf                    | Bürgerort, Geburtsort | Kanton |
|------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|--------|
| Bernoulli Johann       | 1667–1748   | Mediziner, Mathematiker, Physiker | Basel                 | BS     |
| Bernoulli Daniel       | 1700–1782   | Mediziner, Mathematiker, Physiker | Basel                 | BS     |
| Euler Leonhard         | 1707–1783   | Theologe, Mathematiker, Physiker  | Basel                 | BS     |
| Colladon Jean-Daniel   | 1802–1893   | Jurist, Physiker, Ingenieur       | Genf                  | GE     |
| Sturm Charles-François | 1803–1855   | Mathematiker                      | Genf                  | GE     |
| Kutter Wilhelm Rudolph | 1818–1888   | Bauingenieur                      | Mett                  | BE     |
| Ganguillet Emile Oscar | 1818–1894   | Bauingenieur                      | Cormoret              | BE     |
| Meyer-Peter Eugen      | 1883–1969   | Bauingenieur                      | Herisau               | AR     |
| Strickler Albert       | 1887–1963   | Maschinen- und Elektroingenieur   | Hirzel                | ZH     |

### Flusshydraulik, Hydraulik der beweglichen Sohle

1934 überraschte der Appenzeller Ingenieur und ETH-Professor **Eugen Meyer-Peter** (1883–1969) die Fachwelt mit seiner ersten *Geschiebetriebformel* [11]. Er entwickelte sie zusammen mit seinen Mitarbeitern aufgrund von theoretischen Überlegungen, zahlreichen Experimenten im Messkanal und hydraulischen Modellversuchen für den Alpenrhein. Sie galt zunächst nur für Geschiebe einheitlicher Korngrösse in geraden Gerinnen und für stationäre Verhältnisse. Doch wurde sie aufgrund von weiteren Experimenten und durch Vergleiche mit Naturmessungen verbessert und auf Geschiebemischungen erweitert. Auf diese Weise entstand 1948 die zweite *Geschiebetriebformel* [12]. Sie zeichnete sich dadurch aus, dass sie die gesetzmässige Geschiebebewegung auf den anschaulichen Ansatz des Franzosen *Du Boys* von 1879 für die Schleppspannung zurückführte [2]. Anschliessend verfeinerten Meyer-Peter und seine Mitarbeiter ihre Geschiebetheorie, indem sie Fragen der praktischen Anwendung lösten. So befassten sie sich beispielsweise mit der Ähnlichkeit geschiebeführender Modelle, der Erfassung dreidimensionaler und instationärer Naturzustände und der Berücksichtigung des Geschiebeabriebs. Die von Meyer-Peter als Gutachter begleitete und schliesslich erfolgreich abgeschlossene Korrektur des Alpenrheins lieferte dafür einen geradezu idealen Testfall. Diese abgerundete und praxisnahe Bearbeitung eines aktuellen Problems erfreute sich von Anfang an grosser Aufmerksamkeit und Anerkennung im In- und Ausland. Die zweite *Geschiebetriebformel* ist noch heute jedem Spezialisten unter der Bezeichnung *Meyer-Peter-* oder *ETH-Formel* geläufig und wird oft benutzt. Auffällig ist, dass sich Meyer-Peter erst ab 1920, als er Professor war, und vor allem ab 1930, als ihm die Versuchsanstalt für

Wasserbau zur Verfügung stand, mit Geschiebe befasste. Er hatte vorher als Ingenieur in einer renommierten Bauunternehmung zwar mehrere grosse Wasserbauten realisiert, aber keine einzige Flusskorrektur. Seine Motivation stammte also nicht daher; eine interessante Erklärung lieferte sein wohl engster Mitarbeiter in [13]:

«Erst viel später habe ich von Professor *Meyer-Peter* erfahren, warum er schon zu Beginn seiner Versuche gerade die schwierige Hydraulik mit beweglicher Sohle wählte. Er hatte in den ersten Jahren die Vorlesung über den Flussbau nur aus der Literatur neu aufbauen müssen und erkannte die mangelhaften quantitativen Angaben, die selbst das Bestehen eines gesetzmässigen Zusammenhangs zwischen den hydraulischen Gegebenheiten und der Geschiebeführung fraglich erscheinen liessen. Aber auch die als zuverlässig erkannten Zusammenhänge blieben ohne Gewicht, weil Professor *Meyer-Peter* im reinen Flussbau nicht tätig gewesen war. Nur eigene Versuche, in denen einwandfrei beobachtet und gemessen werden kann, konnten die fehlenden Grundlagen liefern.»

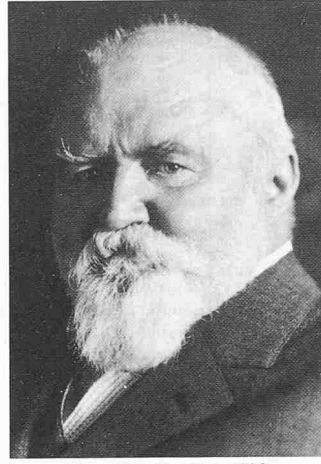
Einer der ersten Mitarbeiter von Meyer-Peter in der Versuchsanstalt für Wasserbau war der Zürcher Ingenieur **Hans-Albert Einstein** (1904–1973). Er führte ab 1931 die bereits erwähnten Experimente im Messkanal durch und war wesentlich an der Entwicklung der 1934 veröffentlichten ersten *Geschiebetriebformel* beteiligt [11]. Mit seiner gründlichen Forschungsarbeit, die sich unter anderem 1936 in einer Dissertation mit dem Titel «*Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem*» [14] niederschlug, legte er den Grundstein für eine eigene, 1942 bekanntgegebene, und später nach ihm benannte *Geschiebetriebformel*. Er wanderte 1938 nach den Vereinigten Staaten aus, wo er im Gebiet des Flussbaus und der Flusshydraulik eine überaus fruchtbare Tätigkeit als *Ingenieur, Forscher und Professor* entfaltete. Seine Fachpublikationen zeichneten sich durch Vielfalt und Tiefgang zugleich aus und verschafften ihm internationalen Ruf [15]. Am meisten



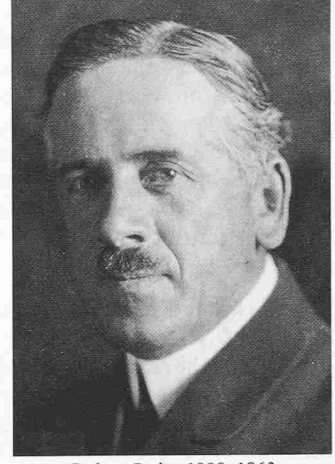
Hans-Albert Einstein, 1904-1973



Jules Michaud, 1848-1920



Franz Prasil, 1857-1929



Robert Dubs, 1880-1963



Jules Calame, 1891-1961



Othmar Schnyder, 1904-1974



Henry Favre, 1901-1966



Alfred Stucky, 1892-1969

Beachtung fand wohl sein Bericht von 1950 «*The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*» [16], der eine umfassende und wegweisende Beschreibung der Geschiebebewegung enthält. Hans-Albert Einstein wurde dementsprechend allgemein anerkannt, doch war er nicht ganz so berühmt wie sein Vater, der Nobelpreisträger Albert Einstein. Es zirkuliert aber folgende Anekdote: Albert Einstein liess sich einmal von seinem Sohn das Problem der Geschiebebewegung erläutern und riet ihm dann freundschaftlich davon ab, es weiter zu verfolgen; es sei *viel zu kompliziert!*

### Rohr- und Kanalhydraulik, instationäre Erscheinungen

1878 veröffentlichte **Jules Michaud** (1848-1920) von Yverdon unter dem Titel «*Coups de bélier dans les conduites; étude des moyens employés pour en atténuer les effets*» [17] eine Theorie über den Druckstoss in Wasserleitungen. Dabei stellte er jene Formel vor,

die noch heute zur Abschätzung der Druckstösse bei linearem, langsamem Schliessen oder Öffnen eines Schiebers, einer Turbine oder einer Pumpe verwendet wird. Sie wurde sehr viel später, nämlich 1904, vom Italiener *Allievi* erneut abgeleitet und veröffentlicht, allerdings im Zusammenhang mit einer viel umfassenderen Theorie. Deshalb wird sie oft als *Allievi-Formel* bezeichnet, manchmal aber auch als *Allievi-Michaud-Formel* [18]. Bemerkenswert ist, dass sie unmittelbar andeutet, wie ein Druckstoss in Grenzen gehalten werden kann. Zu den entsprechenden technischen Möglichkeiten gehören der Windkessel und das Überdruckventil, mit denen sich Michaud intensiv befasste und für die er zuhänden der Praxis Bemessungsformeln und Konstruktionsvorschläge entwickelte. In [17] beschreibt er unter anderem die Druckstösse, die im Wasserkraftwerk der Lausanne-Ouchy-Bahn Schäden verursachten. Das Zugseil dieser Bergbahn wurde nämlich von einem Turbinenlaufrad mit zwei Beschaukelungen, die den Umkehrbetrieb erlaubten, angetrieben. Demzufolge wurde das Trieb-

wasser beim Halten und Wiederanfahren der Bahn jeweils ab- und angestellt, was offenbar zu schroff geschah. Als Gegenmassnahme empfahl Michaud einige kleine Änderungen an den Schiebern, so dass das Betriebspersonal diese nicht schneller als in 6 Sekunden (!) schliessen oder öffnen konnte. Michaud hat seine Veröffentlichung von 1878 später noch einmal aufgegriffen und 1903 im wesentlichen bestätigt [19]. Eine weitere Massnahme gegen den Druckstoss stellt das *Wasserschloss* dar. 1908 erschienen dazu in der Schweizerischen Bauzeitung zwei Aufsätze: der eine, «*Wasserschlossprobleme*» [20], stammte von **Franz Prasil** (1857-1929), und der andere, «*Beitrag zur Bemessung des Inhalts von Wasserschlossern*» [21], von *Konrad Pressel*. Prasil wurde 1894 als Professor für Maschinenbau an die ETH Zürich berufen, wo er sich vor allem im Turbinenbau und in der damit zusammenhängenden Hydraulik einen Namen machte, beispielsweise durch die Anwendung des Stromliniennetzes auf Reaktionsturbinen und die Herausgabe eines Lehrbuches über technische Hydrodynamik [22]. Auch der erwähnte

Aufsatz über Wasserschlossprobleme trug zu seinem Ruf bei; er wurde 1914 unter dem Titel «*Surge Tank Problems*» ins Englische übersetzt und 1922 in einer zweiten, revidierten Auflage nochmals herausgegeben. Er enthält im wesentlichen die noch heute gültige Theorie des Schachtwasserschlosses. Prasil ist in Radkersburg in Österreich (Steiermark) geboren und hat sich 1900 in Zürich eingebürgert [23]. *Pressel* stellte in seinem gleichzeitig erschienenen Aufsatz ein Verfahren zur schrittweisen Berechnung der Wasserschlossschwingung vor, auf das hier nicht näher eingegangen werden soll. Denn *Pressel* ist zwar in der Schweiz (Olten) geboren und unterhielt zu dieser die besten Beziehungen, war aber nicht Schweizer, sondern Sohn württembergischer Eltern und beruflich vor allem in Deutschland tätig, so ab 1906 als Professor für Tunnelbau an der Technischen Hochschule in München.

Nachfolger von Prasil als Professor für Maschinenbau war ab 1926 **Robert Dubs** (1880–1963) von Birmensdorf. Er befasste sich bereits in jungen Jahren in einer bekannten Zürcher Turbinenfabrik mit instationären Erscheinungen. So übersetzte er 1909 zusammen mit *Bataillard* [24] die 1904 von *Allievi* in italienisch veröffentlichte Theorie des Druckstosses ins Deutsche und erweiterte sie durch ein Kapitel über Wasserschlossberechnung [25]. Diese Theorie wurde unter anderem von *Albert Strickler* (siehe Abschnitt «Zusammendrückbarkeit und Reibung»), der damals Assistent von Prasil war, aufgrund von Versuchen 1914 und 1915 verifiziert [27]. Im übrigen profilierte sich *Dubs* vor allem im Turbinenbau, insbesondere im Modellbau. Seine wohl am meisten beachtete Veröffentlichung war das 1947 erschienene Buch über «*Angewandte Hydraulik*»; es ist sehr klar und praxisnah abgefasst.

1913 gab *Allievi* unter dem Titel «*Teoria del colpo d'ariete*» eine verbesserte Fassung seiner Druckstosstheorie heraus. Dieses hinsichtlich mathematischer und grafischer Behandlung des Problems meisterliche Werk wurde bald in mehrere Sprachen übersetzt, ins Französische beispielsweise 1921 vom Maschineningenieur *Daniel Gaden*, der auf ihr seine wegweisenden Arbeiten über Turbinenregelung aufbaute. Zusammen mit **Jules Calame** (1891–1961) gab er 1926 ein vielbeachtetes und in der Folge vielzitiertes Buch heraus mit dem Titel «*Théorie des chambres d'équilibre*» (Theorie der Wasserschlösser) [28]. *Gaden* war ein gebürtiger Franzose von Bordeaux, verbrachte aber fast sein ganzes Berufsleben in der Schweiz. Er arbeitete unter anderem mit *Calame*

Tabelle 2. Pioniere der Hydraulik

| Name                 | Lebensjahre | Studium, Beruf              | Bürgerort, Geburtsort | Kanton |
|----------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|--------|
| Einstein Hans-Albert | 1904–1973   | Bauingenieur                | Zürich                | ZH     |
| Michaud Jules        | 1848–1920   | Maschineningenieur          | Yverdon               | VD     |
| Prasil Franz         | 1857–1929   | Maschineningenieur          | Zürich                | ZH     |
| Dubs Robert          | 1880–1963   | Maschineningenieur          | Birmensdorf           | ZH     |
| Calame Jules         | 1891–1961   | Maschinen- und Bauingenieur | La Chaux de Fonds     | NE     |
| Stucky Alfred        | 1892–1969   | Bauingenieur                | Oberneunforn          | TG     |
| Favre Henry          | 1901–1966   | Bauingenieur                | Genf                  | GE     |
| Schnyder Othmar      | 1904–1974   | Maschineningenieur          | Kriens                | LU     |

zusammen in einer bekannten Turbinenfabrik in Genf und war im Nebamt Professor für Regelungstechnik an der Ecole Polytechnique von Lausanne (heute EPFL). *Calame* stammte aus La Chaux de Fonds, studierte zuerst Bau- und dann Maschineningenieurwesen und war anschliessend als beratender Ingenieur und in der Industrie tätig. Er zeichnete sich im Gebiet der Wasserkraftnutzung durch eine Fülle von Anregungen und Publikationen aus. Neben weiteren Aufsätzen über Wasserschlossschwingungen schrieb er 1932 auch eine Arbeit mit dem Titel «*Calcul de l'onde de translation dans les canaux d'usines*» (Berechnung der Schwall- und Sunkwellen in Triebwasserkanälen) [29]. Er gehört damit zu den Pionieren der Hydraulik instationärer Strömungen.

1929 veröffentlichte der Maschineningenieur **Othmar Schnyder** (1904–1974) von Kriens unter dem Titel «*Druckstösse in Pumpensteigleitungen*» [30] den ersten Beitrag einer bis etwa 1940 fortgesetzten Reihe über Druckstossprobleme. Schon am Anfang und insbesondere 1932 präsentierte er für die Berechnung der örtlichen und zeitlichen Entwicklung des Druckstosses ein leistungsfähiges grafisches Verfahren [31]. Dieses wurde 1933 ebenfalls vom Franzosen *Bergeron* veröffentlicht und in der Folge verallgemeinert, weshalb es meist mit ihm in Verbindung gebracht wird; die zugehörige Grafik heisst im französischen Sprachbereich schlicht «*Le Bergeron*». Doch spricht man anderswo gewöhnlich vom Verfahren von *Schnyder-Bergeron*.

In nur 10 Jahren, nämlich von 1928 bis 1938, leistete der Genfer Bauingenieur **Henry Favre** (1901–1966) mehrere wesentliche Beiträge zur Hydraulik. Er war damals stellvertretender Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich unter Meyer-Peter (siehe Abschnitt «Flusshydraulik») und beteiligte sich intensiv an der Erforschung des Geschiebetriebes [11, 32]. Daneben widmete er sich mit Erfolg den *diskontinuierlichen Strömungen* in Rohren

und Kanälen, insbesondere bei Vereinigungen und Verzweigungen. Am meisten bekannt machte ihn seine 1935 erschienene Habilitationsschrift mit dem Titel «*Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts*» (theoretische und experimentelle Studien über die Schwall- und Sunkwellen in offenen Kanälen) [33]; sie gilt im Gebiet der instationären Strömungen als Standardwerk. Aber auch seine 1938 erschienene Arbeit mit dem Titel «*Théorie des coups de bélier dans les conduites à caractéristiques linéairement variables le long de l'axe*» (Druckstosstheorie für Leitungen mit längs der Achse linear veränderlichen Eigenschaften) [34] fand Anerkennung. So vergleicht sie *Bergeron* im zugehörigen Vorwort mit der grundlegenden Arbeit von *Allievi* [24]. Leider hörte aber mit ihr die so fruchtbare Tätigkeit *Favres* in der Hydraulik auf. Er wurde 1938 zum Professor für Technische Mechanik an der ETH Zürich ernannt und wandte sich in der Folge der Festkörpermechanik und der Spannungsoptik zu. Es blieb einem seiner Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Wasserbau vorbehalten, die Forschungsarbeiten über instationäre Strömungen fortzusetzen und ihnen Weltgeltung zu verschaffen [35].

Schliesslich bleibt noch zu erwähnen, dass sich auch der bekannte Wasserkraftwerk- und Talsperrenbauer **Alfred Stucky** (1892–1966) intensiv mit der Berechnung und Bemessung von Wasserschlossern auseinandersetzte. Als Professor für Wasserbau der Ecole Polytechnique de Lausanne veröffentlichte er 1936 seine «*Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre*» (Beitrag zur experimentellen und theoretischen Untersuchung von Wasserschlossern) [36] und später seine einschlägige Vorlesung, zuerst 1958 in Französisch und dann 1962 in Deutsch [37]. Letztere stellt eine klare und praxisnahe Synthese der damals vorhandenen Literatur sowie ergänzender Untersuchungen seiner Mitarbeiter dar [38].

## Literatur

- [1] *Vischer Daniel*: «Daniel Bernoulli zum 200. Todestag». Zeitschrift Wasser, Energie, Luft, 74. Jg., Heft 5/6, Baden, 1982
- [2] *Rouse Hunter, Simon Ince*: «History of Hydraulics». Dover Publications, New York, 1963
- [3] *Speiser David*: «Daniel Bernoulli (1700–1783)». Helvetica Physica Acta (H.P.A.), Vol. 55, 1982
- [4] Naturforschende Gesellschaft in Basel, verschiedene Autoren: «Die Werke von Daniel Bernoulli». Birkhäuser-Verlag, Basel-Boston-Stuttgart, 8 Bände ab 1982
- [5] *Szabo Iscvan*: «Über die sog. «Bernoullische Gleichung der Hydromechanik»; die Stromfadentheorie Daniel und Johann Bernoullis». Technikgeschichte Bd. 37, Nr. 1, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1970
- [6] Euler-Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft; verschiedene Autoren: «Leonhard Euler – Opera Omnia». Teubner-Verlag Leipzig, Berlin; Orell Füssli-Verlag, Zürich; Birkhäuser-Verlag, Basel-Boston-Stuttgart, 74 Bände ab 1911
- [7] *Speziali Pierre*: Charles-François Sturm (1803–1855); documents inédits. Verlag Université de Paris, Palais de la découverte, D 96, 1964
- [8] *Des Gouttes Edouard*: «Daniel Colladon». Petite Bibliothèque Helvétique, 2e série, no 5, Verlag H. Robert, Genf, 1894
- [9] *Williams Garnett P.*: «Manning formula – a misnomer?» Journal of the American Society of Civil Engineering (ASCE), HY 1, Januar 1970
- [10] *Strickler Albert*: «Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen». Mitteilung des Amtes für Wasserwirtschaft, Nr. 16, Bern 1923 Auszug unter dem gleichen Titel in der Schweizerischen Bauzeitung, Bd. 83, Nr. 23 vom 7. Juni 1924
- [11] *Meyer-Peter Eugen, Favre Henri, Einstein Hans-Albert*: «Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 103, Nr. 13, Zürich, 1934
- [12] *Meyer-Peter Eugen, Müller Robert*: «Formulas for Bed-Load Transport». Bericht zur zweiten Tagung des Internationalen Verbandes für wasserbauliches Versuchswesen, Anlage 2, Stockholm, 7.–9. Juni 1948
- [13] *Müller Robert*: «Flussbauliche Studien an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH». Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. E. Meyer-Peter am 25. Februar 1953. Vorauszug der Schweizerischen Bauzeitung, Zürich 1953
- [14] *Einstein Hans-Albert*: «Der Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem». Dissertation Nr. 902 der ETH Zürich, 1936
- [15] *Shen Hsien W.*: «Hans A. Einstein's Contributions in Sedimentation». Journal of the American Society of Civil Engineers, HY 5, May 1975
- [16] *Einstein Hans-Albert*: «The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows». Technical Bulletin 1026, Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, Sept. 1950
- [17] *Michaud Jules*: «Coups de bélier dans les conduites; étude des moyens employés pour en atténuer les effets». Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes, Lausanne, No. 3 et 4, 1878
- [18] *Mosonyi Emil*: «Wasserkraftwerke» Bd. II, Hochdruckanlagen, Kleinstkraftwerke und Pumpspeicheranlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1966
- [19] *Michaud Jules*: «Intensité du coup de bélier dans les conduites d'eau». Bulletin technique de la Suisse Romande no 29, Lausanne 1903
- [20] *Prasil Franz*: «Wasserschlossprobleme». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 52, Nr. 21, 23, 24 und 25, Zürich 1908
- [21] *Franke Paul-Gerhard*: «Franz Prasil und Konrad Pressel». Zeitschr. Wasserwirtschaft 72, Nr. 7/8, 1982
- [22] *Prasil Franz*: «Technische Hydrodynamik». 1. Auflage, Springer Verlag Berlin, 1913
- [23] *Wyssling W.*: Franz Prasil (1857–1929)». Nekrolog. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, S. 316–326, Zürich 1929
- [24] *Allievi Lorenzo*: «Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione». Annali della Società degli Ingegneri ed architetti italiani, Milano 1903
- [25] *Dubs Battaillard*: «Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen». Verlag Springer, Berlin 1909
- [26] *Dubs Robert*: «Angewandte Hydraulik». Rascher Verlag, Zürich 1947
- [27] *Strickler Albert*: «Druckschwankungen in Turbinenleitungen bei teilweisen Belastungsänderungen». Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 12. Jg., H. 20, München und Berlin, 20. Juli 1915
- [28] *Calame Jules, Gaden Daniel*: «Théorie des chambres d'équilibre». Verlag Gauthier-Villars, Paris 1926
- [29] *Calame Jules*: «Calcul de l'onde de translation dans les canaux d'usines». Verlag Gauthier-Villars, Paris 1932
- [30] *Schnyder Othmar*: «Druckstöße in Pumpensteileitungen». Schweizerische Bauzeitung Bd. 94, Nr. 22, Zürich, 30. November 1929
- [31] *Schnyder Othmar*: «Druckstöße in Rohrleitungen». Zeitschrift Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Nr. 5 und 6, 1932
- [32] *Meyer-Peter Eugen, Favre Henry, Müller Robert*: «Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 105, Nr. 9 und 10, Zürich, 1935
- [33] *Favre Henry*: «Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts». Verlag Dunod, Paris 1935
- [34] *Favre Henry*: «Théorie des coups de bélier dans les conduites à caractéristiques linéairement variables le long de l'axe». Revue Générale de l'Hydraulique no 19 à 24, Paris 1938
- [35] *Jaeger Charles*: «Théorie générale du coup de bélier, application au calcul des conduites à caractéristiques multiples et des chambres d'équilibre». Verlag Dunod, Paris 1933. Ausgehend von dieser Dissertation veröffentlichte Jaeger noch eine Fülle von Arbeiten über Druckstöße und Wasserschlossschwingungen und wurde durch sein in mehrere Sprachen übersetztes Lehrbuch «Technische Hydraulik», Verlag Birkhäuser Basel 1949, weltbekannt.
- [36] *Stucky Alfred*: «Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre». Bulletin Technique de la Suisse Romande, no 20 et 22, Lausanne 1936
- [37] *Stucky Alfred*: «Chambres d'équilibre». Verlag Feissly, Lausanne 1958. Sowie: Druckwasserschlosser von Wasserkraftanlagen, Verlag Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962
- [38] *Gardel André*: «Chambres d'équilibre. Analyse de quelques hypothèses usuelles; méthodes de calcul rapide». Verlag Rouge (Librairie de l'Université), Lausanne 1956

## Schlusswort

Der Verfasser ist sich bewusst, dass er sich bei dieser Darstellung der Schweizer Pioniere der Hydraulik fast zuviel zumutet. Es ist eigentlich unmöglich, so unterschiedliche Persönlichkeiten wie *Jean-Daniel Colladon*, *Wilhelm Kutter*,

*Franz Prasil*, *Eugen Meyer-Peter* und die andern sozusagen im gleichen Atemzug zu nennen und erst noch zusammen mit *Leonhard Euler*. Der Verfasser bittet daher um Nachsicht beziehungsweise um ergänzende oder korrigierende Hinweise; vielleicht hat er sogar einige nennenswerte Persönlichkeiten übersehen. Er bittet vor allem auch um Ver-

ständnis dafür, dass die noch lebenden Pioniere der Hydraulik, und solche gibt es durchaus, unerwähnt bleiben.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. D. Vischer, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, 8092 Zürich.