

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 84 (1992)  
**Heft:** 11-12

**Artikel:** Numerische und physikalische Modellierung  
**Autor:** Volkart, Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940595>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Moderne Lösungswege in Hydraulik und Wasserbau: Numerische und physikalische Modellierung

Peter Volkart

*Numerische und physikalische Modelle sind Annäherungen an die Wirklichkeit. Grundsätzlich ändern weder höchste Rechenleistungen noch modernste Messverfahren etwas an dieser Ausgangslage. Erfolgversprechend ist letztlich nur das gut abgestimmte Zusammensehen beider Verfahren.*

*Numerical or hydraulic models still remain approximations compared with flow reality. This is a fact even though computers and measuring equipment have reached a remarkable level. For the future, only a well coordinated application of both methods will guarantee for success.*

*Les modèles numériques et physiques ne représentent qu'une approximation de la réalité. Ni les plus hautes performances de calcul, ni les procédés de mesure les plus modernes ne peuvent apporter un changement à cette situation donnée. Les meilleures chances de succès reposent finalement sur l'utilisation judicieuse et complémentaire des deux moyens d'investigation disponibles.*

## Unser Wasser kommt weder aus dem Labor noch aus dem Computer

Wir verdanken unsere Existenz nicht zuletzt der Tatsache, dass im Sonnensystem der Wasserdampf nur innerhalb einer schmalen Ringzone als Regen natürlich kondensiert. Diese Zone liegt zwischen 142 und 152 Mio km von der Sonne entfernt; die mittlere Entfernung der Erde beträgt 149,6 Mio km! An sich stellt der natürliche irdische Wasserkreislauf für 20 Milliarden Menschen Trink- und Bewässerungswasser zur Verfügung; leider sind die Vorkommen aber sehr ungleich verteilt: Die grössten Süßwasserströme Amazonas und Kongo führen durch praktisch unbewohnbare Gebiete, 98% des Süßwassers sind Grundwasser, wovon weltweit die Hälfte aus 400 bis 8000 m Tiefe gefördert werden muss.

Bereits dieser erste Überblick lässt begreifen, weshalb das Wechselspiel Wasser-Mensch noch vermehrt an lebenserhaltender Bedeutung gewinnt. Der Schutz vor dem Wasser und die verantwortungsvolle Nutzung des Wassers gehören weltweit noch immer und vermehrt zu den tatsächlich wesentlichen Aufgaben. Der Ingenieur, der sich mit den Methoden der Hydrodynamik auseinandersetzt, um Wasserbauten für Bewässerung und Trinkwassergewinnung, Hochwasserschutz oder Energieerzeugung zu planen, zu erstellen und betriebstauglich zu halten, sieht sich einer vielseitigen und anspruchsvollen Aufgabe gegenüber, die, wie man heutzutage so schön zu sagen pflegt, ein beträchtliches *Innovationspotential* in sich birgt.

Bis in die 50er Jahre dieses Jahrhunderts standen dem Ingenieur und Wissenschaftler Naturbeobachtungen, theoretische und empirische Formeln sowie die Möglichkeit hydraulischer Modellversuche zur Lösung seiner Probleme zur Verfügung. Dann schlug die Geburtsstunde der Computerhydraulik.

Erstmals wurde in den USA ein eindimensionales Computer-Programm zur Berechnung von Hochwasserabflüssen in Flüssen verwendet. Seither hat man auf allen Fronten grosse Fortschritte erzielt: ungeahnte Mess- und Vi-

sualisierungsverfahren wurden entwickelt und Computer zur Datenanalyse und numerischen Strömungssimulation erfolgreich eingesetzt. Die Nachfrage nach Lösungen im Wasserbau ist gross.

Darum soll hier etwas auf die Eigenheiten sowie Vor- und Nachteile der Methoden eingegangen und deren sinnvolles Zusammenwirken erklärt werden. Im Alltag des Problemlösers stehen sich in erster Linie numerische Modellierung auf dem Computer und physikalische Modellierung im Laborversuchsstand gegenüber.

## Numerische Modellierung

Grundsätzlich können bei der numerischen Behandlung von Fluidströmungen einzelne Schritte unterschieden werden. Normalerweise werden vorerst möglichst umfassende Grundgleichungen formuliert und danach angemessene numerische Prozeduren entworfen.

### 1. Schritt: Grundgleichungen, Randbedingungen

Die wahre Naturströmung wird durch Grundgleichungen beschrieben; diese verknüpfen physikalische Tatsachen mit Hilfe mathematischer Formulierungen. Je wirklichkeitsnäher, d.h. umfassender, die Gleichungssysteme sind, desto schwieriger kann deren mathematisch geschlossene Lösung in der Hydrodynamik sein. Der Grund liegt u.a. darin, dass Parameter wie örtliche Geschwindigkeit, Druck und – in der turbulenten Strömung – auch Viskosität eine Funktion des Ortes sind.

Es wird somit von einer mikroskopischen Betrachtungsweise des Fluids ausgegangen; der Massenpunkt steht am Ausgangspunkt der Überlegungen, erst dann wird der Schritt auf die Strömung in ihrer mehrdimensionalen Ausdehnung vollzogen. Die räumliche Begrenzung wird durch die Lage der geometrischen Ränder gesetzt – man denke etwa an eine Rohrwand, eine Flussohle oder an eine Meeresküste.

Zur mathematischen Formulierung dieser sogenannten «Randbedingungen» macht man dann beispielsweise davon Gebrauch, dass eine Wand undurchlässig und damit der örtliche Massenfluss und die Geschwindigkeit gegen diese Berandung Null sein muss oder dass im inkompressiblen Wasser die Dichte als konstant angesetzt werden darf.

Schliesslich ist unter dem physikalisch-mathematischen Begriff der «Anfangsbedingungen» einzubringen, wieviel Wasser beispielsweise am Anfang einer Kanalstrecke einfließt oder mit welchem Druck ein Fluid in eine Rohrleitung einmündet.

Handelt es sich bei unserem Strömungsproblem etwa um eine Extremfallprognose – gedacht sei an Hochwasser in Flüssen, an Sturmfluten oder an Regenabflüsse in die Kanalisation usw. –, so sind wir vielleicht angesichts der physikalischen Unsicherheit unserer Anfangsbedingungen bereits ein erstes Mal mit der Frage nach der notwendigen Genauigkeit der gesamten Prozedur konfrontiert: Soll man ausgehend von umfassenden Formeln und Randbedingungen sehr genau – aber aufwendig – rechnen und erst dann vereinfachen? Oder nimmt man das Risiko einer simpleren Prozedur auf sich, erfasst dann aber möglicherweise gewisse Eigenheiten der Strömung nicht mehr genau? Dieser zweite Fall ruft gewöhnlich nach zusätzlichen Informationen in Form von Messdaten.

### 2. Schritt: Numerische Prozedur

Nun zurück zur numerischen Lösung, die heutzutage auf dem Gebiet der Fluidodynamik schlicht als Computerberechnung bezeichnet werden kann. Diese sieht verschie-

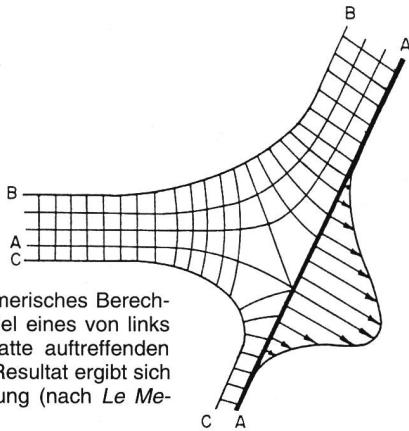


Bild 1. Einfaches numerisches Berechnungsnetz am Beispiel eines von links auf eine schräge Platte auftreffenden Wasserstrahles. Als Resultat ergibt sich u.a. die Druckverteilung (nach *Le Mehaute*).

dene Wege des Vorgehens, muss aber immer gewisse Vereinfachungen im Vergleich zu den «umfassenden» Grundgleichungen zugestehen. Möglichkeiten hiezu sind beispielsweise:

A: Verwenden vereinfachter Gleichungen; dies kann bedeuten, dass variable Größen als pseudo-konstant eingeführt werden.

B: Diskretisieren der mathematischen Funktionen durch Reduktion auf endliche Zeitschritte. Der stetige Strömungsvorgang wird von Zeit zu Zeit gewissermassen an gehalten, berechnet, wieder in Bewegung gesetzt und so weiter.

C: Man kann das gesamte Strömungsgebiet in kleine Flächen oder Raumelemente aufteilen und innerhalb dieser Teile die Strömungsgleichungen anwenden, wobei die Kontinuität des Fluidflusses dadurch sichergestellt wird, dass zwischen den einzelnen Elementen Verträglichkeitsbedingungen eingehalten werden müssen. Dies ist ein erster Schritt weg von der rein mikroskopischen Betrachtensweise.

D: Nicht zuletzt können Messdaten und eindeutige Rand- und Erfahrungswerte als wahre Stützwerte in die Berechnung eingespielen werden. Dies hält u.a. programminterne Prozeduren in vernünftigen Grenzen.

E: In diesem Sinne können schliesslich auch näherungsweise durch Erfahrung und Messung gefundene Koeffizienten eingeführt werden.

Man verlässt damit aber die mikroskopisch subtilere Betrachtensweise und wählt Mittelwertsbetrachtungen – bekannt ist die im Vor-Computer-Zeitalter fast unumgängliche Koeffizientenhydraulik, die keine eindeutigen Rück schlüsse auf die fluidinternen Vorgänge ermöglicht und die die Sensibilität einer Strömung unvollständig erfasst (was nota bene wieder nach Messwerten von realen Fluidströmungen verlangt).

Computerprogramme aller Leistungsklassen wenden die unter A bis E aufgeführten Prozeduren und Vereinfachungen meist kombiniert an.

Tendenziell steigt dabei der Aufwand, wenn

- wenig vereinfachte Grundgleichungen benutzt werden,
- feine örtliche und zeitliche Rechenschritte gewählt werden,
- komplizierte, also dreidimensionale und wirbelreiche Strömungen vorliegen,
- das Strömungsfeld im Vergleich zur Rechendichte ausgedehnt und inhomogen ist und wenn
- die Randbedingungen anspruchsvoll, d.h. zum Beispiel dreidimensional oder flexibel (elastischer Schlauch) oder zeitlich variabel (vibrierende Schütze, erodierende Flussohle, selbstabdichtendes poröses Medium usw.) oder gar durch die Strömung selbst definiert werden (freie Wasseroberfläche).

Vor allem der Fall der freien Oberfläche stellt heutzutage die Herausforderung für den Wasserbaumeriker dar.

Es erstaunt somit nicht, dass zwischen den Computerprogrammen zum Teil immense Unterschiede bezüglich Programmieraufwand, erforderlicher Rechenleistung und Realitätsnähe bestehen müssen.

Zur Verdeutlichung soll kurz auf die theoretischen Grundlagen der Strömungen eingegangen und deren geschichtliche Entwicklung gestreift werden.

Beispiel Flüssigkeitsdynamik : Navier-Stokes-Gleichungen

M. Navier, 1827, und S. D. Poisson, 1831, stellten erstmals die Bewegungsgleichungen eines kompressiblen, zähen Fluids auf, und zwar ausgehend von Wirkungen der intermolekularen Kräfte. Später leiteten B. de St. Venant, 1843, und G. G. Stokes, 1845, dieselben Gleichungen her. Allerdings bestand schon zu Beginn die Schwierigkeit, einen Zusammenhang zwischen Spannungszustand und Deformationszustand eines Fluids zu finden.

Für elastische Festkörper bedient man sich bekanntlich des Hookeschen Gesetzes, das aussagt, dass die Spannungen für den festen Körper proportional der Grösse der Verschiebung sind. In der Flüssigkeitsdynamik hingegen muss man die Verschiebung durch die Verschiebegeschwindigkeit ersetzen; der Schubmodul des Festkörpers wird zum Zähigkeitsbeiwert  $m$ . Dieses nach Stokes benannte Reibungsgesetz enthält die für den numerischen Mathematiker erschwerende Aussage, dass im allgemeinen Fall einer kompressiblen Strömung der Zähigkeitsbeiwert  $m$  als ortsveränderlich anzusehen ist, da  $m$  erheblich mit der Temperatur ändert. (Diese Aussage enthält letztlich wiederum eine molekulare Betrachtensweise.)

Führt man diesen Tatbestand in die Grund-Bewegungsgleichungen ein, erhält man die unter dem Namen Navier-Stokes-Gleichungen bekannten Differentialgleichungen, die die Grundlage der gesamten Strömungsmechanik bilden.

Diese sind im allgemeinen Fall der kompressiblen und nicht isothermen Strömung – Stichworte: Gasgesetze, Thermodynamik – durch eine Kontinuitätsbeziehung und eine Energiebilanzgleichung zu ergänzen.

Man kommt dann zu 7 Gleichungen mit den 7 Grössen

$u, v, w$ , wörtliche Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung  
 $p$  örtlicher Druck (Kraft pro Flächeneinheit)  
 $\rho$  Dichte (Masse pro Volumeneinheit)  
 $T$  Temperatur  
 $m$  dynamische Zähigkeit

Bereits für stationäre Strömung hat man es mit nichtlinearen, elliptischen Differentialgleichungen zu tun, die nach Grundenmann, 1984, dem Mathematiker in Form eines Anfangs-Randwertproblems erhebliche Schwierigkeiten bereiten, die im Falle dreidimensionaler Strömung bald sehr grosse Ausmasse annehmen können.

Im Falle isothermer Strömung können  $T$  und  $m$  als konstant gesetzt werden; für den inkompressiblen Fall – dazu gehört näherungsweise die Wasserströmung – benötigt man noch vier Gleichungen für  $u, v, w$  und  $p$ ; auch diese Ansätze sind nicht ohne weiteres lösbar.

Es ist nicht zu übersehen, dass der Stokessche Ansatz der Reibungskräfte eigentlich ein rein empirischer ist, der erst nach experimenteller Nachprüfung weitgehend verifiziert werden konnte. Dies ist zu beachten, wenn von der absoluten Allgemeingültigkeit der Navier-Stokes-Gleichungen die Rede ist.

Es ergab sich schon immer der Wunsch, die aufwendigen Gleichungen so zu vereinfachen, dass der verblei-

bende Rest dennoch den physikalischen Ansprüchen genügt. Die Einführung der Grenzschicht nach Prandtl, 1904, ist ein solches Beispiel. Hier wird bekanntlich angenommen, dass innerhalb einer wandnahen Strömungsschicht die Geschwindigkeitskomponenten normal zur Berandung wesentlich kleiner sind als in Hauptstromrichtung. Dies gilt insbesondere für turbulente Strömungen, wo das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskraft, die sogenannte Reynolds-Zahl  $Re$ , gross ist. Es sind nun genau diese Strömungen, die nicht nur im Anwendungsgebiet der Aerodynamik, sondern auch im Wasserbau eine wesentliche Rolle spielen.

Was noch immer ungelöst bleibt, ist eine abgeschlossene Kenntnis der Entstehung und Ausbreitung der Turbulenz in Fluidströmungen. Hierher gehört letztlich auch das Umschlagverhalten von laminarer zu vollturbulenter Strömung. Man weiss, dass die örtlichen Geschwindigkeiten innerhalb einer Strömung fluktuiieren; man kann unmöglich voraussagen, nach welchen exakten Gesetzen dies in einem konkreten Fall geschehen wird, da man ja noch keine Messwerte besitzt. Konkret liegen die Schwierigkeiten nach Liepmann, 1952, verstärkt bei

- der Existenz nichtlinearer Terme in den turbulenten Bewegungsgleichungen,
- dem Auftreten viskoser Dämpfungsterme und
- in der Dreidimensionalität der Strömungen.

Die vereinfachende Beschreibung der aufgeführten Phänomene begegnet uns in der numerischen Hydrodynamik in Form der Turbulenzmodelle. Diese sind Näherungen. Je mehr Erfahrung und Datenmaterial der Numeriker zur Verfügung hat, um so besser werden seine Berechnungen ausfallen.

Kurz und gut, es gilt wohl noch immer auch das Sprichwort:

«Good judgment is the result of experience; experience is the result of bad judgment.»

### *Physikalische Strömungssimulation im Labor*

Plant man eine wasserbauliche Anlage, so hat man trivialerweise noch keine Erfahrungsdaten ebendieses Bauwerkes. Und doch muss man unbedingt die extremen Beanspruchungen ausreichend beziffern können, die sich

beispielsweise durch Extremregen, Sturmwellen, Felsstürze, Ausfall von Maschinen, Erdbeben und menschliches Versagen usw. ergeben könnten.

Unumgänglich, aber nicht immer leicht ist es, sich die möglichen Strömungen überhaupt vorzustellen. Studium und Erfahrung sind hierbei notwendig, aber oft nicht ausreichende Voraussetzungen. Nun bringen es die Grösse der Bauwerke und die Ausdehnungen der massgebenden Strömungsabschnitte in der Natur mit sich, dass man viele Probleme mittels hydraulischer Modelle im Labor angehen kann. Es wird eine zur Natur ähnliche Strömung im Versuchsstand erzeugt.

Eine Natur- und eine Laborströmung wird als ähnlich bezeichnet, wenn sowohl die geometrischen als auch die charakteristischen physikalischen Grössen für entsprechende Punkte der beiden Strömungsfelder zur entsprechenden Zeit ein konstantes Verhältnis miteinander bilden. Geometrische Ähnlichkeit erzielt man somit – analog zum Abbild auf der Landkarte –, indem man alle Naturlängen um den sogenannten Modellmassstab verkleinert. Beispielsweise wird ein 100 m breiter Fluss im Modellmassstab von 1:50 im Labor noch 2 m breit.

Physikalische Ähnlichkeit setzt voraus, dass sowohl die Stoffgrössen als auch die den Strömungsverlauf bestimmenden mechanischen und thermodynamischen Grössen im selben Massstabsverhältnis reproduziert werden. Dies ist aber nur in einfachen Fällen möglich. Normalerweise muss man zu Beginn abschätzen, welche Stoffgrössen und Strömungskräfte das Strömungsfeld dominieren; erst dann erstellt man gezielt ein hydraulisches Modell.

Man bedient sich in der Modellplanung einzelner anerkannter dimensionsloser Kennzahlen; ist deren Wert in der Natur und im Modell identisch, so wird der in der Kennzahl erfasste physikalische Einfluss korrekt modelliert.

Reibungseinfluss: Die Reynolds-Zahl

$$Re = u \cdot L / n$$

mit  $u$  = eindimensionale Strömungsgeschwindigkeit (m/s),  $L$  = charakteristische Länge (m) (zum Beispiel Rohrdurchmesser, Querausdehnung Brückenpfeiler) und

$n$  = kinematische Viskosität ( $m^2/s$ ) wird als Verhältnis der Trägheits- zu den Zähigkeitskräften eines Fluids gedeutet. Betroffen sind Strömungsteile, bei



Bild 2. Am physikalischen Modell visualisierte Strömung unterhalb eines Flusskraftwerkes. Die numerische Modellierung ermöglicht zurzeit erste anwendbare Rechnungen für den Oberwasserbereich von Staustufen; der dargestellte Strömungstyp ist ein Problembeispiel für die nähere Zukunft.

denen die erwähnten Grenzschichten wesentlich sind. Korrekterweise ergäben sich jeweils sehr hohe Geschwindigkeiten in verkleinerten Modellen. In der Modellierung hydraulischer Bauwerke beschränkt man sich darauf, die Reynoldszahl mindestens so hoch zu halten, dass vollturbulente Strömung gesichert ist. Diese Bedingung begrenzt die vertretbaren Abmessungen eines Modells nach unten.

Schwereeinfluss: Die Froude-Zahl

$$Fr = u / (g \cdot L)^{1/2}$$

mit  $u$  = eindimensionale Strömungsgeschwindigkeit (m/s),  $g$  = Erdbeschleunigung ( $m/s^2$ ) und

$L$  = charakteristische Länge (m) (bei freiem Spiegel: Wassertiefe)

ist das Kriterium für die Ähnlichkeit von Strömungen, die im wesentlichen unter dem Einfluss der Schwerkraft stehen. Dazu gehört die Mehrzahl der Wasserbaumodelle mit freier Oberfläche. Die Froude-Zahl  $Fr$  kann auch als Verhältnis von kinetischer zu potentieller Energie beschrieben werden. Modellversuche müssen unbedingt von erfahrenen Leuten begleitet werden, die die Grenzen der Übertragbarkeit kennen. Dies gilt u.a. für folgende Anwendungsgebiete: Sedimenttransport, Wellen bewegter Schiffe, Lufteintrag und Kavitation, kleine Wassertiefen (Filmströmungen) oder instationäre Phänomene usw.

Grenzflächenspannung: Die Weber-Zahl

$$We = r \cdot u^2 \cdot L / s$$

mit  $r$ , Dichte des Fluids ( $kg/m^3$ ),

$u$  = eindimensionale Strömungsgeschwindigkeit (m/s),

$L$  = charakteristische Länge (m) (zum Beispiel Dicke Strömungsfilm, Blasenradius usw.) und

$s$  = Grenzflächenspannung ( $N/m$ )

erfasst den Einfluss der Kapillarität. Während etwa für Schwerwellen das Froudesche Gesetz massgebend ist, muss im Falle der durch Oberflächenspannungen hervorgerufenen Kapillarwellen das Webersche Ähnlichkeitsgesetz erfüllt werden. An kleinen Froude-Modellen sind manchmal Kapillarscheinungen zu beobachten, die in der Grossausführung entweder gar nicht oder in anderer Größenordnung auftreten.

Instationäre Strömung: Die Strouhal-Zahl

$$Sr = L / u \cdot t$$

mit  $L$  charakteristische Abmessung eines Körpers in der Strömung (m) (z.B. Dicke eines Rechenstabes),

$u$  = eindimensionale Strömungsgeschwindigkeit (m/s) und

$t$  = Zeit (s)

ist bei instationären Vorgängen zu beachten. Im Wasserbau handelt es sich meist um mehr oder weniger periodische Vorgänge, wie etwa strömungsinduzierte Vibratoren von Schützen und Schleusentoren oder Schwingungen von Rechenstäben und Messprofilen.

Weitere Kennzahlen sind:

die Euler-Zahl  $Eu = p / r \cdot u^2$  (Druckstossprobleme), die Machzahl  $Ma = u/c$  (Dichteinfluss, Gasströmung mit  $c$  = Schallgeschwindigkeit)

sowie die Peclet-Zahl (Wärmeübergangsprobleme) oder die Eckert-Zahl (Wärmekapazität).

Dieser kurze Überblick lässt bereits erahnen, dass auch die physikalischen Modelle immer nur Annäherungen an die Realität sind. Der Interpretation der Messergebnisse kommt deshalb eine entscheidende Bedeutung zu. Hierbei sind Daten aus Naturausführungen sehr wertvoll.

Da sich die Messtechnik und die numerische Analyse der Datensets in den letzten Jahren stark entwickelt haben, sind die Möglichkeiten physikalischer Modelle stark

gestiegen. Die guten alten Bilder, wo Versuchsingenieure mit weissen Labormänteln auf verkleinerten Staumauermodellen herumturnen, den Stechpegel hunderte von Maßen ansetzen und ablesen, sollten eigentlich der Vergangenheit angehören. Heute ist es üblich, Zuströmungen zu Modellen computergesteuert zu variieren und modernste Messmethoden wie Laser oder Ultraschall usw. einzusetzen.

Am Labormodell kann man Größen messen, die in der Natur praktisch nicht zu erheben sind, sei dies wegen der enormen Messkosten, der Unzugänglichkeit oder des seltenen Eintreffens eines Ereignisses.

### Moderne Modellierstrategien

Numerische Modelle können heutzutage eine Fülle von Daten verarbeiten. Die Berechnungsnetze, als Ersatz für die reale Strömung gelegt, werden feiner und feiner. Die Parameter können in ungeahnter Vielfalt variiert und permutiert werden. Strömungsganglinien ganzer Natur-Jahre werden in kurzer Zeit simuliert. Kurven und Tabellen werden im Nu in druckreifer Qualität erstellt, und dies alles, ohne einen Tropfen Wasser in Bewegung zu setzen.

Dem steht gegenüber, dass die auf notwendigen Vereinfachungen der Grundgesetze und Randbedingungen basierenden Berechnungen einer Überprüfung bedürfen, denn grundlegende Fehler könnten zu katastrophalen Auswirkungen führen. Dem leitenden Planer und Ingenieur, der die Verantwortung für die sachgemäße Ausführung einer Schleuse, Wasserkraftanlage oder Flussanierung übernehmen muss, ist es leider praktisch unmöglich zu kontrollieren, ob ein benutztes Computerprogramm Fehler enthält oder unzulässige Vereinfachungen verwendet. Hier liegt die Achillesferse. Kommt dazu, dass konkurrenzfähige und leistungsstarke Programme spezialisierte Fachkräfte voraussetzen. Der sowohl in Strömung und Wasserbau erfahrene und gleichzeitig mit allen Kniffen der numerischen Modellierung vertraute Ingenieur ist und bleibt naturgemäß eher die Ausnahme als die Regel.

Auf der anderen Seite die physikalischen Modelle, die die Strömung mit Wasser wiedergeben. Bei eingehaltener geometrischer Ähnlichkeit gibt es keine Unstetigkeiten im Strömungsverlauf und kein Wasser, das unverhofft aufwärts fliesst. Der Betrachter aller Bildungsstufen und Spezialisierungsgrade, sei er Student, Wissenschaftler, Politiker



Bild 3. Die Aufästelung eines eher flachen Flusses in Seitenarme an einem physikalischen Modell. Eine rein numerische Annäherung dürfte schwierig sein. Ist der anschliessende Flussabschnitt seitlich begrenzt, könnten die Labordaten im numerischen Modell verwendet werden.

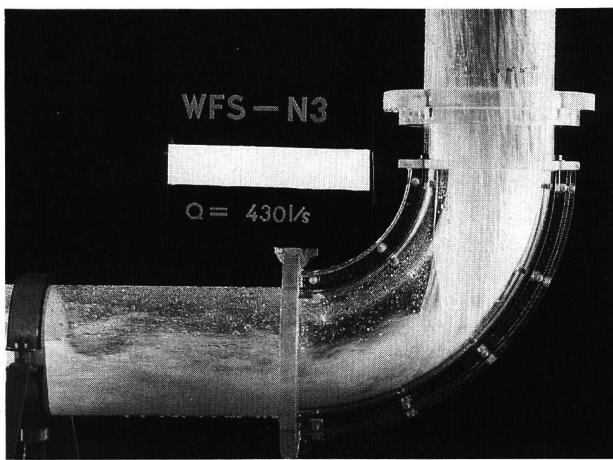


Bild 4. Umlenkung eines fallenden Wasserstrahles in einem Rohr. Es wird Luft mitgerissen und auch ins Wasser eingetragen. Das physikalische Modell kann brauchbare Anfangswerte liefern für die Berechnung der Strömung im horizontalen Rohrstück nach der Krümmung.

ker, Schiffsführer oder Landanstoß, sieht die Strömung weitgehend so, wie sie sich dannzumal einstellen wird. Dem Versuchingenieur stehen fast unbegrenzte Möglichkeiten der Messwerterfassung und -verarbeitung zur Verfügung.

Nur, die Modelle beanspruchen Platz und Wasser. Beides kann die Modelliergrösse im Labor derart begrenzen, dass gewisse Ähnlichkeitskriterien nur noch ungenau eingehalten werden. Jede Änderung der Randbedingungen bedarf eines manuellen Umbaus. Ist eine Untersuchung vermeintlich abgeschlossen, wird das Modell abgebaut; weitere Testläufe sind nicht mehr möglich.

Es gibt immer wieder Anwendungsfälle, wo der eine der beiden Modelltypen – numerisch oder physikalisch – durchaus genügt. Im Zuge der modernen Entwicklung im Wasserbau werden die Ingenieurprobleme aber zunehmend komplizierter und vernetzter.

Gründe dafür sind etwa:

- Renovieren und Modernisieren einer Anlage ist technisch meist anspruchsvoller als ein Neubau,
- die Belange des Umweltschutzes bringen berechtigterweise wesentlich neue Dimensionen und Rahmenbedingungen in die Forschung und Planung,
- Sicherheit, d.h. Senken des Restrisikos, ist im Zeichen steigenden Schadenspotentials vorrangig,
- und schliesslich sind heute Lösungsmethoden greifbar, die früher nicht zur Verfügung standen.

Diese Zusammenhänge wurden vielerorts erkannt. Der Autor hatte wiederholt die Möglichkeit, als Chairman der Section on Experimental Methods and Physical Modelling des IAHR (International Association on Hydraulic Research) Fachgesprächen beizuwöhnen und Labors zu besuchen. International wird anerkannt, dass nur ein ausgewogenes Zusammensetzen der beiden wesentlichen Verfahren der Modellierung Erfolg bringen wird. Gedacht wird an die zeitgemäße Ausbildung der Studenten, an die Strategien der Forschung und an ressourcenschonende, aber dennoch risikoarme Bauwerke in und am Wasser.

Gedacht wird eindeutig an Rechenprogramme, die an physikalischen Modellen und Naturdaten geeicht werden und im Laufe der Zeit vor allem Standardfälle abdecken. Gedacht wird aber auch an Labormodelle, an denen schlecht simulierbare Teilphänomene – Sedimenttransport, Luftblasen in Wasser, Kapillarwellen, Flockungsvor-

gänge in Klärbecken usw. – entweder in einer zweiten Testanlage ausschnittsweise modelliert werden oder die Ergebnisse automatisch durch Programme korrigiert werden, die die zusätzlichen physikalischen Gesetze berücksichtigen.

## Ausblick

Anstelle eines bis in letzte aufgeschlüsselten Vergleiches pro und contra Rechnung und Messung sei auszugsweise eine Liste von typischen Problemen im Wasserbau vorgestellt, die einen Teil derjenigen künftigen Aufgaben des Wissenschaftlers und des Ingenieurs im Wasserbau wiedergeben, die bis über das Ende des 2. Jahrtausends hinaus nur gemeinsam mit numerischen und experimentellen Methoden soweit lösbar sind, dass der Mensch die volle Verantwortung für seine Bauwerke tatsächlich übernehmen kann:

### Flusskraftwerke

Kombinierte Zuströmung im Oberwasser bei allen möglichen Betriebsfällen. Hydraulik im Unterwasser.

### Gerinneströmung

Einbauten wie Pfeller, Baugruben usw. Seitliches Überströmen bei schiessendem oder geweittem Abfluss sowie unregelmässigen Dammkörpern.

### Regulierorgane

Kombiniertes Über- und Unterströmen insbesondere bei asymmetrischer Anströmung; strömungsinduzierte Vibratoren im dreidimensionalen Fall, insbesondere bei Berücksichtigung der elastischen Deformation der Struktur.

### Rohrhydraulik

Übergang von Teil- zu Vollfüllung mit Lufteinschlüssen, alle Verluste und Instabilitäten; Integration in die Kanalnetzprogramme, die heute hydraulisch noch stark vereinfacht sind.

### Wasser-Luft-Strömungen

Luftaufnahme und -abgabe in Schussrinnen, an Belüftern, nach Sprungschanzen, aber auch in Absturzbauwerken oder in Rauhbettgerinnen usw.

### Wellen

Wellen durch Fels- und Eisstürze in Seen, Überschwappen von Talsperren. Sandtransport durch Wellen an Gründen und Ufern von Binnenseen.

### Kläranlagen

Dreidimensionale Strömung in Absetzbecken in Belebtschlammalagen unter Berücksichtigung der Flockung.

### Elastische Berandung

Strömung in elastischen Schläuchen, über Gummiwehren, durch Schlauchdrosseln; Anwendung in Apparatebau und Medizin.

### Flüsse

Dynamische Flussmodelle: nicht stationärer Sedimenttransport bzw. Erosion, Parameter der In- und Exfiltration (Kolmatierung) und der Wasserfauna usw.

### Literatur

De St. Venant B. (1843)

«Note à joindre en mémoire sur la dynamique des fluides». Comptes rendus 17, 1240–1244.

Grundmann R. (1984)

«Grenzschicht und grenzschichtähnliche Strömung», Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DFVLR-FB 84-46.

Le Méhauté B. (1976)

«An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves», Springer New York.

*Liggett J. A. (1990)*  
 «Computation – Investigation, Education and Application».  
*J. Hydr. Engr.* 116, No. 12, 1436–1453.

*Navier M. (1827)*  
 «Mémoire sur les lois de mouvement des fluides» Mém. de l'Acad. d. Sci. 6, 389–416  
*Poisson S. D. (1831)*  
 «Mémoire sur les équations générales de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques et des fluides», J. de l'Ecole polytechn. 13, 139–186  
*Prandtl L. (1904)*  
 «Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung»

Verhandlung III Internat. Math. Kongress, Heidelberg, 484–491

*Schlichting H. (1951, 1965)*  
 «Grenzschichttheorie», G. Braun Verlag, Karlsruhe.

*Stokes G. G. (1845)*  
 «On the theories of the internal friction of fluids in motion and of the equilibrium and motion of elastic solids» Trans. Cambr. Phil. Soc. 8, 287–305.

Adresse des Verfassers: Dr. Peter Volkart, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW), CH-8092 Zürich.

## Hausanschlüsse an tiefliegende Sammelkanäle

### Hydraulische und sedimentologische Modellversuche und bauliche Realisierung

Karl-Christian Taubmann

#### Résumé

Ce rapport traite des études sur modèle de type hydraulique-sédimentologique concernant la jonction des égouts des habitations aux égouts principaux surbaissés. Partant du problème technique posé par les eaux usées et leur courant, on propose deux solutions différentes. Les résultats de cette expérience sont ensuite discutés sur le plan de leurs limites en tant que technique de canalisation.

#### Summary

Set within the field of hydraulics and sedimentology, this paper deals with model studies for branch lines from buildings to deep main sewers. Technical problems of sewers and flow are considered and two different solutions are then presented based on model and prototype tests. Finally, the results are discussed as regards to the limits of their suitability in canalisation technique.

#### 1. Problemstellung

Das baselstädtische Kanalsystem im Mischsystem besitzt zu 75% Kanaldurchmesser bis zu 1 m und zu 25% Grosskanäle mit mehr als 1 m äquivalentem Durchmesser. Der Kreisquerschnitt der Grosskanäle in Stahlbeton ist durch eine mit Steinzeug verkleidete Trockenwetter-

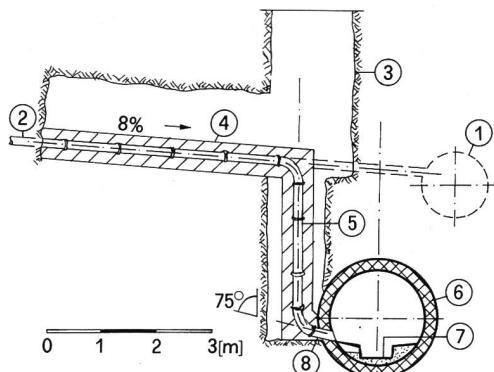


Bild 1: Typisches Pressrohr-Grosskanalprofil mit Trockenwetterrinne, Banketten und Hausanschluss des Grundtyps «Krümmer» als Modellgrundlage. 1 durch Pressrohr ersetzter Sammelkanal, 2 bestehender Hausanschluss, 3 gespriesster Aushub für Hausanschluss, 4 Stollenvortrieb, 5 vertikales Fallrohr, 6 vorgepresstes Rohr als neuer Sammelkanal, 7 Sohlschale, 8 Anschluss Hausanschluss an Sammelkanal.

Tabelle 1. Versuchsparameterübersicht zum Hausanschluss-Grundtyp «Krümmer».

Bauteilparameter	Naturmassebereich
Achsdistanz zwischen Fallrohr und Trockenwetterrinne des Sammelkanals	$1,5 \leq a \leq 4,5$ m
Krümmer-Formstücke	$75^\circ \leq \varphi_k \leq 90^\circ$
Anschlussrohr-Längsgefälle	$3\% \leq J_a \leq 26\%$
Sohlenabsturzhöhe zwischen Anschlussrohr und Bankett-Halbschale	$10 \leq \Delta z \leq 20$ cm
Bankett-Halbschalen-Durchmesser	$15 \leq d_b \leq 30$ cm
Bankett-Halbschalen-Sohlengefälle	$1 \leq J_b \leq 3\%$

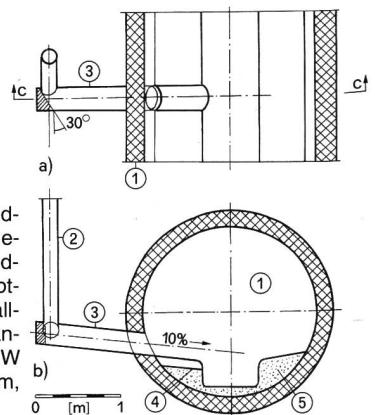


Bild 2. Hausanschluss Grundtyp «Wirbeltrommel» an tiefliegende Kanalisation. a) Grundriss, b) Schnitt c-c. 1 Haupt-sammelkanal NW 2000, 2 Fallleitung NW 150, Hausanschluss, 3 Wirbeltrommel NW 200, 4 Schale  $r = 150$  mm, 5 Bankett.

Tabelle 2. Versuchsparameterübersicht zum Hausanschluss-Grundtyp «Wirbeltrommel».

Bauteilparameter	Naturmassebereich
Achsdistanz zwischen Fallrohr und Wirbeltrommel	$0 \leq a_w \leq 0,5$ m
Wirbeltrommel-Durchmesser	$200 \leq d_w \leq 315$ mm
Wirbeltrommel-Länge	$1,0 \leq l_w \leq 1,7$ m
Wirbeltrommel-Längsneigung	$J_w = 10\%$
Längsachsendistanz zwischen Wirbeltrommel und Bankettschale	$7,5 \leq \Delta z_a \leq 10$ cm
Sohlenabsturzhöhe zwischen Wirbeltrommel und Bankett-Halbschale	$15 \leq \Delta z \leq 20$ cm
Bankettschalen-Halbmesser	$r = 15$ cm
Bankettschalen-Sohlengefälle	$J_b = 10\%$
Bankettschalen-Tiefe	$t_b = 10$ cm

rinne gegliedert. Diese weist ein U-förmiges Profil auf, in welchem auch bei Trockenwetter sowohl die Fliesstiefe als auch die Fließgeschwindigkeit für den Abwasserfeststofftransport genügend gross sind. Dies bedingt jedoch einen nicht ganz unproblematischen Anschluss von Grundstücksentwässerungsleitungen in Form der Anpassung von Hausanschlüssen [1, 5]. Bild 1 zeigt neben dem typischen Grosskanalprofil einen derartigen Hausanschluss an den tiefliegenden Mischwasserkanal.