

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

**Grundlagenpraktikum im Labor
für Hydromechanik und Wasserbau**
OpenLab HT22/WT23

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Phys. Andreas Malcherek
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Institut für Wasserwesen * Hydromechanik und Wasserbau
Werner-Heisenberg-Weg 39 * 85577 Neubiberg

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Ivo Baselt

Universität der Bundeswehr München

Institut für Wasserwesen

Lehrstuhl für Hydromechanik und Wasserbau

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Tel.: 089 / 6004-3844

Email: ivo.baselt@unibw.de

Web: www.unibw.de/ifw/HYDRO

Version: 3. November 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Das Erfassen der hydrostatischen Druckkraft	3
2	Die Untersuchung der Druckänderung einer plötzlichen Aufweitung in einem Rohr	5
3	Vertikaler Ausfluss aus einem Gefäß	8
3.1	Versuchsdurchführung	9
3.2	Versuchsauswertung	9
4	Wasserstandsschwingung zwischen zwei Behältern	11
5	Der Vergleich von Strömungszuständen beim Wechselsprung	14
6	Der Abfluss über das scharfkantige Pivot-Wehr	17
7	Normalabfluss	20
8	Das Filtergesetz von Darcy: Bestimmung der Durchlässigkeit einer Bodenprobe	24
9	Rheometrische Messungen	27
9.1	Platte-Platte-Rotationsviskosimeter	27
9.2	Platte-Konus-Rotationsviskosimeter	29
9.3	Systematische Messfehler in der Rotationsviskosimetrie	29
9.4	Durchführung des Praktikumsversuchs	30

Vorbemerkungen

1. Das Praktikum findet als OpenLab-Veranstaltung in Gruppen statt. Die einzelnen Versuchsstände werden nach Durchführung der Vorlesung zur Bearbeitung freigegeben. Ab diesem Zeitpunkt buchen sich die Gruppen selbstständig über die Online-Excel Tabelle <https://1drv.ms/x/s!ApiPPqrCoizRiD7XKtOK82VjP1J9?e=rSFw0q> in einen freien Slot beim jeweiligen Betreuer ein. Am gebuchten Termin kommt die jeweilige Gruppe dann ins Labor und absolviert den Versuchsstand.
2. Im Labor und besonders an den Versuchsständen gelten die uni-internen Hygienemaßnahmen. Kann der erforderliche Abstand zu einer anderen Person nicht eingehalten werden, wird eine Alltagsmaske getragen.
3. Vor dem jeweiligen Praktikumstermin ist die Theorie des Versuchs aus den Vorlesungen bzw. dem Skript vorzubereiten und die Aufgabenstellung durchzulesen.
4. Das Skript und die vorbereiteten Unterlagen sind zum Praktikum mitzubringen.
5. Es wird im Vorhinein eine Sicherheitsbelehrung zum Verhalten im Labor versendet. Bitte lesen Sie diese gewissenhaft durch. Am ersten Termin im Labor unterschreiben Sie dann die Belehrung auf einer Gesamtliste.
6. An den Versuchsständen erfolgt zu Beginn eine kurze Einweisung in die jeweiligen Geräte durch die Aufsicht.
7. Sie führen selbstständig die jeweiligen Versuche durch. Dokumentieren Sie ihr Vorgehen in einem Versuchsprotokoll, wozu ergänzend sich die Verwendung eines Laptops bewährt hat!
8. Vor dem Praktikumsende sind die Versuche und alle Gerätschaften in deren ursprünglichen Zustand zu bringen. Der Versuchsstand ist sauber zu hinterlassen.
9. Ihr Praktikum endet mit der Abmeldung bei der Aufsicht.
10. Die Praktikumsauswertung (Praktikumsbericht) ist selbstständig zu erstellen.
11. Die Ausarbeitungen sind schriftlich in elektronischer Form (Word, LaTeX als pdf) innerhalb von 1 Woche an den Verantwortlichen abzugeben.

Nach Eden und Gebhard¹ ergeben sich die Anforderungen an ein Versuchsprotokoll und an einen Laborbericht wie folgt:

„Ein Protokoll ist eine Mitschrift während einer Versuchsdurchführung. Das Protokoll enthält sämtliche Aufzeichnungen, die für die Auswertung des Experiments und für die Erstellung eines Laborberichtes relevant sein könnten. [...] Der Laborbericht wird in der Regel aus dem Versuchsprotokoll erstellt.“

„Das Ziel eines Laborberichts ist die vollständige Darstellung eines Experiments und die Darstellung der aus dem Experiment gewonnenen Ergebnisse. Grundsätzlich muss der Laborbericht daher auch immer alle relevanten Messdaten enthalten, ein alleiniger Verweis in das als Anhang immer anzufügende Messprotokoll ist unzulässig.“

¹EDEN, KLAUS und HERMANN GEBHARD: Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik: Messen - Auswerten - Darstellen - Protokolle - Berichte - Präsentationen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

Ein Laborbericht kann dabei wie folgt gegliedert sein:

1	Titelblatt	Das Titelblatt enthält mindestens die Versuchsbezeichnung, den Ort, das Datum und die Namen der Experimentatoren
2	Grundinformationen	Ziel, Art und Umfang der Messungen sowie eine Kurzdarstellung der zum Verständnis erforderlichen naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen.
3	Versuchsaufbau	Dieser Abschnitt enthält die genaue Beschreibung des Versuchsaufbaus. Für die meisten Experimente ist hier eine Skizze / ein Foto sinnvoll, um den genauen Aufbau und die Verbindung der Komponenten darzustellen.
4	Darstellung des Messablaufs	In diesem Abschnitt ist der Messablauf genau darzustellen. Neben Text sollten hier auch Skizzen oder maßstäbliche Abbildungen eingefügt werden. Die Darstellung muss so detailliert sein, dass bei nicht nachvollziehbaren Abweichungen von erwarteten Versuchsergebnissen der Versuchsablauf exakt reproduziert werden kann.
5	Auswertung der Messwerte	Die Auswertung umfasst die Berechnung der gesuchten Größen. Die aufgenommenen Messwerte sind wegen der besseren Übersichtlichkeit in Form einer Tabelle/ Grafik darzustellen. Die Tabellenköpfe sollen die Größe und die Einheiten enthalten, in den Tabellenfeldern finden sich dann nur noch Zahlen.
6	Äußere Bedingungen	Falls äußere Bedingungen in irgendeiner Weise einen Einfluss auf den Versuchsverlauf oder die Ergebnisse haben könnten, sind diese mit im Messprotokoll aufzuführen. Dies könnten z.B. Umgebungstemperatur, Luftdruck oder ähnliche Größen sein. Bei einer ausreichend großen Anzahl durchgeführter Messungen können zur Fehlerabschätzung statistische Verfahren heran gezogen werden. Bei wenigen Messungen ist alternativ der Fehler nach der Methode der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung oder durch eine sinnvolle Abschätzung bzw. Einschätzung anzugeben.
7	Bewertung der Ergebnisse	Hier sind die erzielten Ergebnisse mit anderen Messungen oder soweit vorhanden mit Literaturwerten zu vergleichen. Die verwendeten Messverfahren, der Messaufbau und die erzielten Ergebnisse sind kritisch zu betrachten. Falls sich aus den Messungen Verbesserungs-Ansätze ergeben, sind diese ebenfalls hier aufzuführen.

1 Das Erfassen der hydrostatischen Druckkraft

In dem in Abbildung 1 dargestellten Praktikumsversuch wirkt eine hydrostatische Druckkraft auf den Viertelkreisring, die abhängig von der Füllhöhe des Tanks ist. Mit Hilfe von Gegengewichten soll der Balancierbalken jeweils in die Waagerechte gebracht werden.

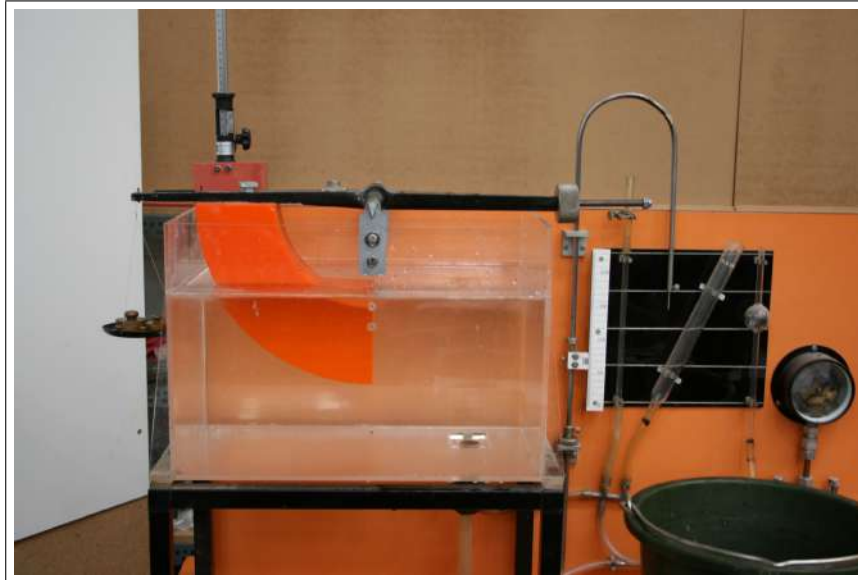


Abbildung 1: Praktikumsversuch zur Hydrostatik

Ob der Balancierbalken sich im horizontalen Gleichgewicht befindet, hängt davon ab, ob auf die in Abbildung 2 mit O bezeichnete Stelle ein Moment wirkt.

Die hydrostatischen Kräfte auf den Viertelkreisring haben drei Anteile. Von unten wirkt eine mit der Tiefe zunehmende Auftriebskraft, von oben die Gewichtskraft des darüber liegenden Wassers. Diese beiden Druckkraftanteile stehen senkrecht auf der Oberfläche des Kreisrings. Ihre Wirkungslinie geht immer durch den Ursprung O, so dass diese Anteile (glücklicherweise) kein Moment auf diesen Punkt ausüben. Der dritte Anteil wirkt auf die Stirnfläche des Viertelkreisrings. Hier handelt es sich um eine eingetauchte vertikale Rechteckfläche, für die wir die Druckkraft- und Angriffspunktberechnung kennen. Dieses Moment wird dann durch zusätzlich in die Waagschale aufzubringende Gewichte ausgeglichen.

Zur Versuchsdurchführung:

1. Messen Sie alle für die Auswertung erforderlichen geometrischen Größen aus!
2. Bringen Sie die Waage zunächst durch das Verstellen des Gegengewichts und Auflegen von M_0 auf die Waagschale in die Horizontale!
3. Füllen Sie Wasser bis zum unteren Scheitel des Viertelkreisrings in den Behälter. Stellen Sie nun den Pegel auf Null!
4. Stellen Sie insgesamt 8 Wasserstände ein, von denen mindestens 3 die Stirnfläche vollständig überdecken sollten. Messen Sie die Wassertiefe und balancieren Sie die Waage durch Aufbringen von Gegengewichten aus!
5. Leeren Sie den Behälter wieder und führen Sie die Messungen noch erneut 2-mal aus!

Zur Versuchsauswertung:

1. Stellen Sie in Ihrer Auswertung die notwendige Theorie zusammen!
2. Fertigen Sie eine Skizze zum Versuch und den gemessenen Größen an!
3. Vergleichen Sie das gemessene Gegengewicht mit dem theoretisch bestimmten!
4. Tragen Sie die Ergebnisse in entsprechenden Graphiken auf!

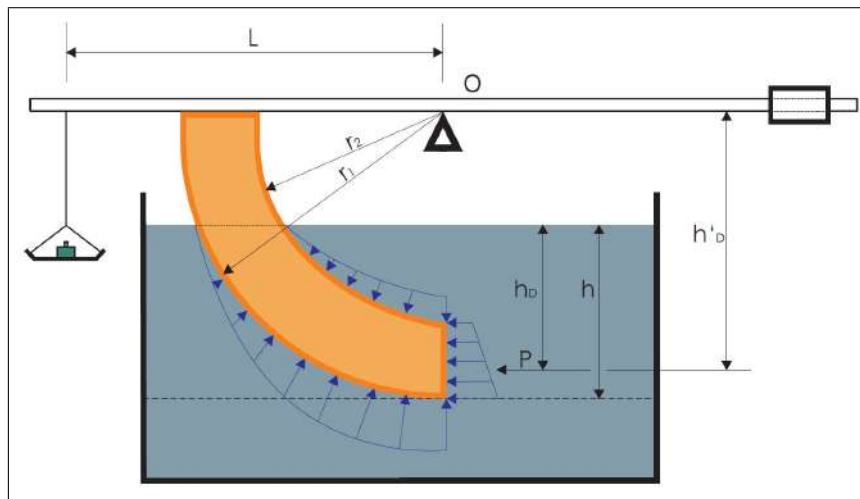


Abbildung 2: Praktikumsversuch zur Hydrostatik

Auswertung an marcus.mazur@unibw.de und sebastian.mueller@unibw.de

2 Die Untersuchung der Druckänderung einer plötzlichen Aufweitung in einem Rohr

Eine Strömung durch eine plötzliche Aufweitung verursacht eine Druckänderung Δp , da die Geschwindigkeit Q/A durch den größeren Fließquerschnitt reduziert wird. Die sich daraus ergebende Impulsänderung dl/dt bedingt eine Druckerhöhung stromabwärts der Aufweitung damit die Impulsänderung über das gesamte Kontrollvolumen ausgeglichen bleibt $dl/dt = 0$. Einzig für die plötzliche Aufweitung basiert der technische Stand zur Berechnung der Druckänderung auf der Impulsbilanz (Borda-Carnot), jedoch in idealisierter Form - und nicht auf empirischen Untersuchungen. Die Impulsbilanz für die Aufweitung wurde bereits im 18. Jh. von Jean-Charles de Borda (und später in der jetzt gebräuchlichen Form von Lazare Carnot) zur hydraulischen Beschreibung der Aufweitung angewandt und in die Bernoulli-Gleichung als Verlustterm integriert:

$$p_2 - p_1 = \Delta p = \rho \frac{Q^2}{A_2^2} \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) \quad (1)$$

mit A_1 als Querschnittsfläche des Rohres kleinen Durchmessers und A_2 als Querschnittsfläche des Rohres großen Durchmessers. Da sich der Druck über die Aufweitung erhöht, wird der Druck in der Aufweitungsebene p_1 vom stromabwärtigen Druck p_2 abgezogen um eine positive Druckänderung Δp zu erhalten.

Die in der Herleitung von Gl. 1 getroffenen Vereinfachungen führen jedoch zu Abweichungen, die insbesondere bei großen und kleinen Aufweitungsverhältnissen die Übereinstimmung zwischen Messergebnis und berechnetem Wert deutlich reduzieren. Der in Gl. 2 gegebene nicht-idealisierte Ansatz der Impulsbilanz berücksichtigt daher noch die Geschwindigkeitsverteilungen über die Querschnitte $A_{1,2}$ sowie den Verlauf des Druckes p_R auf der Aufweitungswand $A_2 - A_1$ (siehe Abb. 4). Damit ergibt sich folgende Gleichung der nicht-idealisierten Impulsbilanz für die Druckänderung über eine plötzliche Aufweitung für das in Abb. 4 gezeigte graue Kontrollvolumen:

$$\Delta p = \rho \frac{Q^2}{A_2^2} \left(\frac{A_2}{A_1} \beta_1 - \beta_2 + \frac{c_P}{2} \frac{A_2}{A_1} - \frac{c_P}{2} \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \quad (2)$$

mit

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,045 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0,203} + 1 \\ \beta_2 &= -0,414 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 + 0,404 \frac{A_1}{A_2} + 1 \\ c_P &= 0,035 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0,295} - 0,017 \end{aligned}$$

Dieser Ansatz soll in diesem Praktikum untersucht werden, indem die Ergebnisse des neuen Berechnungsansatzes für die Durchströmung einer plötzlichen Aufweitung mit den Messungen der Druckdifferenz zu vergleichen sind.

Zudem hängt der Ort des maximalen Druckes p_2 vom Durchfluss ab. Daher ist auch der Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Ort des maximalen Druckes p_2 über die 3 Messanschlüsse im stromabwärtigen Rohr zu ermitteln.

Die Messungen erfolgen an einem vorhandenen Prüfstand (Abbildung 3) bei verschiedenen Durchflüssen und einem festen Aufweitungsverhältnis. Zusätzlich ist die Stelle der maximalen Druckdifferenz stromabwärts der Aufweitung in Abhängigkeit des Volumenstroms zu ermitteln. Dazu stehen 3 umschaltbare Messanschlüsse zur Verfügung.

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einer Stahlrohrleitung (3) in der die Strömung beruhigt wird und der anschließenden Plexiglasrohrleitung (4) mit der plötzlichen Aufweitung (5). Der Durchfluss ist über das Stetigventil (2) einstellbar und wird mit dem induktiven Durchflussmesser (IDM) (1) erfasst. Zur Erfassung der Druckänderung über die Aufweitung ist ein Differenzdrucksensor mit 2 Messstellen (1x stromaufwärts der Aufweitung (6), 3x stromabwärts der Aufweitung (7)) verbunden, welcher die Druckdifferenz zwischen beiden Messstellen erfasst. Die Messungen sind für 3 frei wählbare Volumenströme Q zwischen 10 und 20 l/s an jedem Messanschluss der zweiten Messstelle durchzuführen. Der Messanschluss kann über einen Ventilblock umgeschaltet werden.

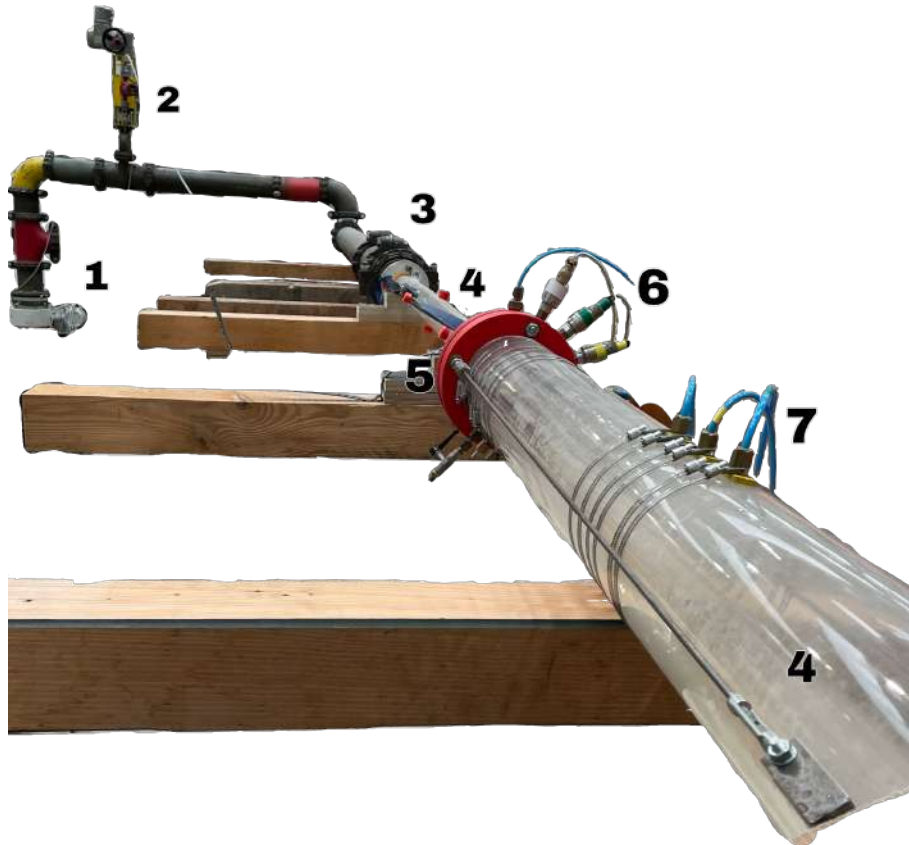


Abbildung 3: Prüfstands Aufbau plötzliche Aufweitung

Versuchsablauf:

- Starten Sie mit Unterstützung eines Labormitarbeiters die erforderliche Pumpe im Wasserkreislauf des Labors und öffnen Sie die für Ihren Versuch notwendigen Ventile!
- Betätigen Sie über den Bedien-Computer das Stetigventil, bis der erforderliche Volumenstrom erreicht ist! Der Volumenstrom wird erst nach einigen Sekunden einen stabilen Wert erreichen. Warten Sie bis keine Luftblasen durch das Plexiglasrohr strömen und der gesamte Bereich stromabwärts der Aufweitung mit Wasser gefüllt ist!
- Bevor die erste Messung aufgezeichnet wird, sind die Schlauchleitungen mit den am Differenzdrucksensor angebrachten Absperrarmaturen zu entlüften, bis ein durchgehender Wasserstrahl austritt.
- Messen Sie an jedem Messanschluss den Differenzdruck für die gegebenen Volumenströme (jeweils mindestens 3 Messungen)!

- Durch Betätigung der Schaltfläche **Stopp** am Bedien-Computer wird die Messung beendet und das Stetigventil geschlossen.

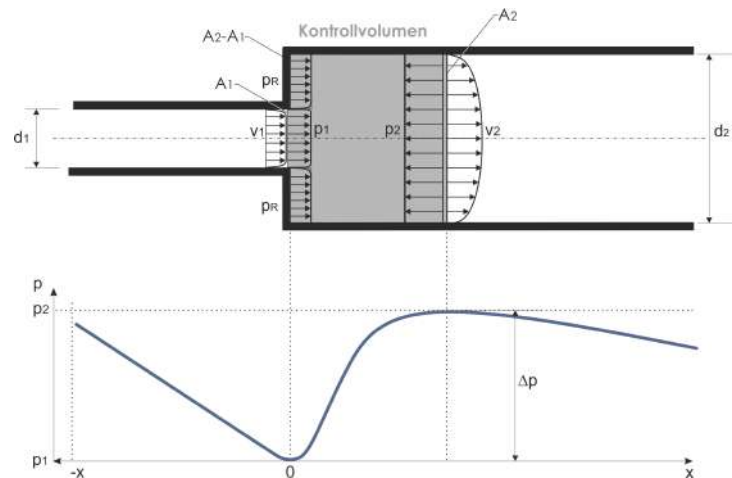


Abbildung 4: Kontrollvolumen für Impulsbilanz mit Druckverlauf entlang der Mittellinie

Versuchsauswertung:

- Vervollständigen Sie das Matlab-Skript zur Berechnung der Druckdifferenz zwischen Messstelle 1 (6) und Messstelle 2 (7).
- Vergleichen Sie die maximalen Messwerte mit beiden Berechnungen für alle Volumenströme und werten Sie den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Messanschluss mit dem maximalen Differenzdruck aus.
- Stellen Sie den Verlauf des Differenzdruckes über den Durchfluss für alle Messungen in einer Abbildung grafisch dar.

Daten:

- Innendurchmesser Rohr 1: $D_1 = 60,4 \text{ mm}$, Rohr 2: $D_2 = 140,92 \text{ mm}$
- Abstand Aufweitung - Messstelle 2: $L_2 = [5,5D_2, 6D_2, 6,5D_2] \text{ m}$

Auswertung an rafael.giersdorff@unibw.de und sebastian.mueller@unibw.de

3 Vertikaler Ausfluss aus einem Gefäß

Mit seinem Werk *Opera Geometrica* von 1644 schien Evangelista Torricelli das Ausflussproblem gelöst zu haben, was bis heute als eine der wichtigsten Errungenschaften der Strömungsmechanik angesehen wird. Vereinfacht besagt Torricellis Theorie, dass ein vertikal nach oben gelenkter Ausflusstrahl auf die Höhe steigt, die der Füllhöhe des Gefäßes entspricht aus dem der Strahl austritt. Physikalisch bedeutet dies, dass die Ausflussgeschwindigkeit v_A aus einem Gefäß mit vertikaler Öffnung gleich der Endgeschwindigkeit eines frei fallenden Wasserteilchens aus der Füllhöhe h ist.

$$v_A = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Bereits Torricelli wusste seinerzeit um die Diskrepanz zwischen der Theorie und den experimentellen Untersuchungen. Die Literatur zur heutigen Strömungsmechanik stellt die Ausflussformel von Torricelli in einer Form dar, in der die Abweichung zwischen Berechnung und experimentellen Ergebnissen durch den Ausflussbeiwert μ korrigiert wird.

$$v_A = \mu \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Abbildung 5 zeigt Ausflussbeiwerte für verschiedene Öffnungsformen und verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Ausflussgeschwindigkeit von der Form der Auslassöffnung.

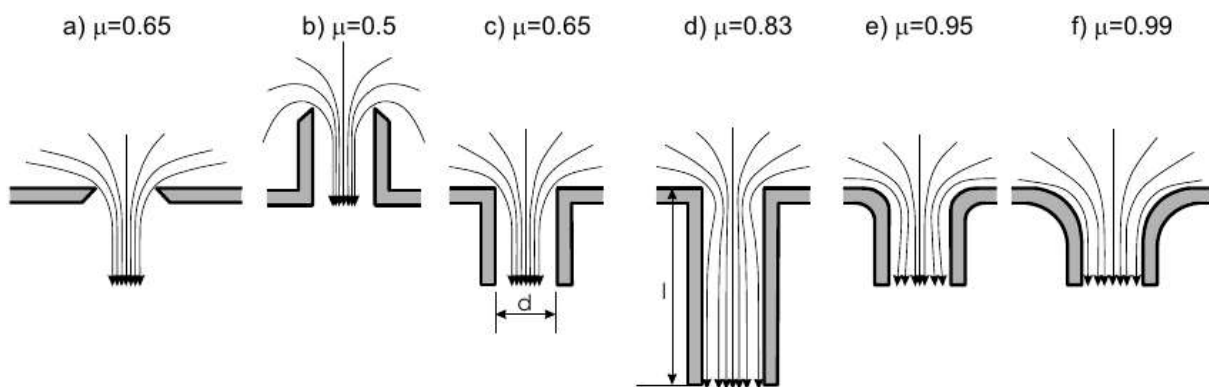


Abbildung 5: Ausflussbeiwerte der Torricelli-Formel für verschiedene Öffnungsformen nach Aigner und Bollrich, Handbuch der Hydraulik 2015

Die Gleichung der Ausflussgeschwindigkeit aus einem Gefäß mit vertikalem Ausfluss wird nach Malcherek über die Impulsbilanz hergeleitet. Dazu muss die Gravitationskraft, der Impulsfluss des ausströmenden Fluides und die Reaktionskraft des Gefäßbodens auf das Fluid berücksichtigt werden, womit man folgende Formeln der Änderung der Ausflussgeschwindigkeit $\frac{dv_A}{dt}$ und Höhe $\frac{dh}{dt}$ für den instationären Fall erhält:

$$\frac{dv_A}{dt} = g - \frac{v_A^2}{h} \cdot \left(\beta - \frac{A_A}{A} \right); \quad \frac{dh}{dt} = -\frac{A_A}{A} \cdot v_A$$

Für stationäre Strömungen vereinfacht sich die Formel des instationären Falls zu:

$$v_A = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\beta - \frac{A_A}{A}}}$$

wobei A die Grundfläche des Gefäßes, A_A die Fläche der Auslassöffnung und β der Impulskoeffizient ist.

3.1 Versuchsdurchführung

In dem in Abbildung 6 dargestellten Gefäß befindet sich in der Bodenplatte eine kreisförmige Öffnung, in welche unterschiedliche Blenden eingesetzt werden können. An diesem Gefäß sollen Sie unterschiedliche zeitliche Verläufe der Füllhöhe für verschiedene Flüssigkeiten und Blendengeometrien aufnehmen. Diese sollen Sie anschließend vergleichen und dem jeweiligen Impulskoeffizienten für die verwendete Blende ermitteln.

Aufgabe:

- Untersuchen Sie alle verfügbaren Blendengeometrien!
- Nutzen Sie zur Aufzeichnung des Experimentes ihr Smartphone, indem sie den sich bewegenden Wasserspiegel im Video aufzeichnen und die Zeit parallel stoppen! Dazu können Sie entweder ein zweites Handy mit einer Stoppuhr im Video aufzeichnen oder Sie verwenden entsprechende Apps (z.B. Video Stopwatch von Seconds Count - <https://play.google.com/store/apps/details?id=us.secondscount&hl=de>).

3.2 Versuchsauswertung

- Stellen Sie die gemessenen Wasserstände über der Zeit dar und vergleichen Sie diese!
- Vervollständigen Sie das Matlab-Programm zur Auswertung mit dem gekoppelten Differentialgleichungssystem für die Änderung des Füllstandes im Gefäß und der Ausflussgeschwindigkeit!
- Lösen Sie mit den jeweiligen experimentellen Anfangs- und Randbedingungen das Differentialgleichungssystem für den zeitlichen Verlauf des Füllstandes und der Ausflussgeschwindigkeit und vergleichen Sie den berechneten Verlauf des Füllstandes mit den experimentellen Werten! Mit welchem Impulskoeffizienten wird jeweils die beste Übereinstimmung erzielt?
- Beschreiben Sie jeweils zwei Ihrer Meinung nach relevante systematische und zufällige Messfehler!

Auswertung an julia.adamski@unibw.de und sebastian.mueller@unibw.de



Abbildung 6: Versuchsstand zum Ausfluss aus einem Gefäß

4 Wasserstandsschwingung zwischen zwei Behältern

Wir betrachten ein System, was aus einem zylindrischen Tank 1 und Tank 2 und einem Rohr zwischen ihnen besteht (Abbildung 7). Die Böden beider Tanks befinden sich auf gleicher geodätischer Höhe und das Verbindungsrohr ist horizontal ausgerichtet und verbindet die Tanks nahe an deren Böden. Füllen wir Tank 1 mit Wasser bis zu einer Höhe h_1 , belassen aber Tank 2 leer und öffnen wir dann den Kugelhahn im Verbindungsrohr, so wird die Flüssigkeit eine gedämpfte Schwingung um ihre Gleichgewichtslage vollführen bis schließlich beide Füllstände sich ausgeglichen haben.

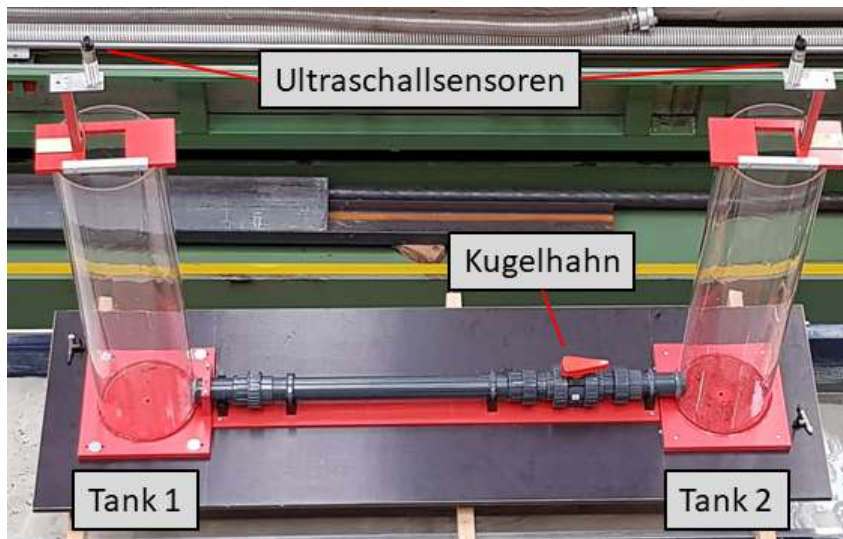


Abbildung 7: Praktikumversuch zur Wasserstandsschwingung zwischen zwei Behältern

Die Differentialgleichungen für den Wasserstand in den Tanks lauten

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{-Q(t)}{A_1} & \text{und} & & \frac{dh_2}{dt} &= \frac{Q(t)}{A_2} \\ \frac{dh_1}{dt} &= \frac{-A_{\text{Rohr}}}{A_1} v_{\text{Rohr}} & \text{und} & & \frac{dh_2}{dt} &= \frac{A_{\text{Rohr}}}{A_2} v_{\text{Rohr}} \end{aligned} \quad (3)$$

Die zeitliche Änderung des Druckes in den Behältern nehmen wir hydrostatisch an. Die Geschwindigkeitsänderung in den Tanks ist zunächst durch die Druckdifferenz (Unterschied in den Füllständen) $p_1 - p_2 = \rho g(h_1 - h_2)$ und durch den Reibungswiderstand im Rohr, ausgedrückt durch den Widerstandsbeiwert λ , gekennzeichnet.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho g(h_1 - h_2)}{\rho L} - \frac{\lambda}{2d_{\text{hyd}}} v |v| \quad (4)$$

Den Widerstandsbeiwert bestimmen wir nachfolgend mit dem Gesetz von Colebrook-White.

Wir können nun die 3 Differentialgleichungen 3 und 4 dazu verwenden das Problem mit Matlab zu lösen. Dazu ist der folgende Programmcode allerdings mit Lücken versehen, die Sie selber entsprechend des Versuchsstandes befüllen sollen.

Aufgabe 1: Berechnen Sie sich die Füllstände in den Behältern als auch die Geschwindigkeit im Verbindungsrohr über einen gewählten Zeitraum und stellen beides grafisch dar!

```

1 function Rohr2Tanks
2 % Parameter Behaelter
3 d1=; % Durchmesser 1. Tank
4 d2=; % Durchmesser 2. Tank
5 A1 = ; % Querschnitt 1. Tank
6 A2 = ; % Querschnitt 2. Tank
7 g = ;
8 h1 = ; % Wasserstand 1. Tank
9 h2 = ; % Wasserstand 2. Tank
10 % Parameter Verbindungsrohr
11 D = 0.0536; % Durchmesser Rohr
12 A = ; % Querschnitt Rohr
13 rho = ;
14 dhyd= ;
15 L = ; % Laenge des Verbindungsrohres
16 ks=1/1000; % Rauheit im Verbindungsrohr
17 % Parameter Fluid
18 v0 = ; % Anfangsgeschwindigkeit
19 nu=; % Viskositaet
20 dt = []; % Zeitspanne [t0 tend]
21 %
22 [T,F] = ode45(@Tanks,dt,[h1 h2 v0]);
23 %
24 wasserstand1 = F(:,1);
25 wasserstand2 = F(:,2);
26 geschw = F(:,3);
27 figure(1)
28 plot (T,wasserstand1),hold on,plot (T,wasserstand2),hold off
29 legend('Tank 1', 'Tank2'),xlabel (''),ylabel ('')
30 grid on
31 figure(2)
32 plot(T,geschw),xlabel (''),ylabel ('')
33 %
34 % DGL
35 function dfdt = Tanks(t,f) % Wonach wird abgeleitet, was wird abgeleitet
36     h1 = f(1); h2 = f(2); v = f(3);
37     dh1dt = ; % Hoehe erster Tank
38     dh2dt = ; % Hoehe zweiter Tank
39     p1p2 = rho * g * (h1 - h2);
40     lambda = colebrook_white(f(3)*D/nu,ks/D);
41     dvdt = ;
42     dfdt = [dh1dt ; dh2dt ; dvdt];
43 end
44 end

```

Als Vergleich zum analytischen Ansatz und zur numerischen Berechnung sollen Sie die Wasserstände

im Praktikum auch messen. Dazu sind über den Tanks zwei Ultraschallsensoren angeordnet. Ein Messrechner zeichnet die entsprechenden Spannungswerte auf, die Sie noch in metrische Einheiten umrechnen müssen.

Aufgabe 2:

- Schließen Sie den Kugelhahn im Verbindungsrohr und füllen Sie Tank 1!
- Lassen Sie die Wasseroberfläche sich beruhigen, bevor Sie die Messwertaufzeichnung starten und schlagartig den Kugelhahn öffnen!
- Beobachten Sie die Füllstandsschwankung und lassen Sie die Wasserspiegel bis zur Gleichgewichtslage einpendeln, bevor Sie die Messwertaufzeichnung beenden!
- Wiederholen Sie die Messungen mindestens 3mal!

Aufgabe 3: Fügen Sie die Messwerte in das Diagramm mit der analytischen Funktion ein und beurteilen Sie ihr Ergebnis! Gibt es Abweichungen? Wenn ja, was könnten die Gründe dafür sein?

Hilfe zur Auswertung der Daten: Die Ultraschallsensoren geben Ihnen zunächst nur Spannungswerte (Berolinks, Berorechts) aus, die in metrische Einheiten umgerechnet werden müssen. Dies geschieht durch diese Matlab-Zeilen:

```
1 m=(130-20)/8; % (130cm-20cm)/8V Steigung des Messgeraetes
2 U0links=9.0093; % Spannungs-Nullwert Sensor links
3 U0rechts=9.0214; % Spannungs-Nullwert Sensor rechts
4 hlinks=-m*(Berolinks-U0links)/100; % Wasserstand links
5 hrechts=-m*(Berorechts-U0rechts)/100; % Wasserstand rechts
```

Auswertung an benita.heybach@unibw.de

5 Der Vergleich von Strömungszuständen beim Wechselsprung

Der Wechselsprung ist ein bekanntes Phänomen in der Gerinnehydraulik, bei dem zwei Strömungszustände ineinander übergehen. Der Fließwechsel vom schießenden zum strömenden Abfluss erfolgt sprunghaft und meist mit sehr großer Turbulenz- und Wellenbildung. Dies führt zu hoher Dissipation an Strömungsenergie, was z.B. durch den Verlust an Energiehöhe ausgedrückt wird. Dies kann bei wasserbaulichen Bauwerken sogar erzwungen oder gewollt sein, z.B. im Tosbecken eines Wasserkraftwerkes. Mit dieser Form wollen wir uns in diesem Praktikum beschäftigen. Zur Beschreibung des Überganges von schießendem Abfluss (große Geschwindigkeit mit kleiner Wassertiefe) zu strömendem Abflusse (kleine Geschwindigkeit mit großer Wassertiefe) existieren bereits theoretische Betrachtungen, welche auf Basis der Energieerhaltungsgleichung (Bernoulli-Gleichung) hergeleitet wurden. Leider wurde dies jedoch rein aus Traditionsgründen mit dieser Methode vollzogen und die Unzulänglichkeit durch Beiwerte ausgeglichen. Mit der Impulsgleichung stellen wir die Beschreibung des Wechselsprungs auf eine fundierte physikalische Herleitung und validieren derzeit an unserem Lehrstuhl diese Theorie. Ihre Messungen im Praktikum fließen darin vollumfänglich ein.

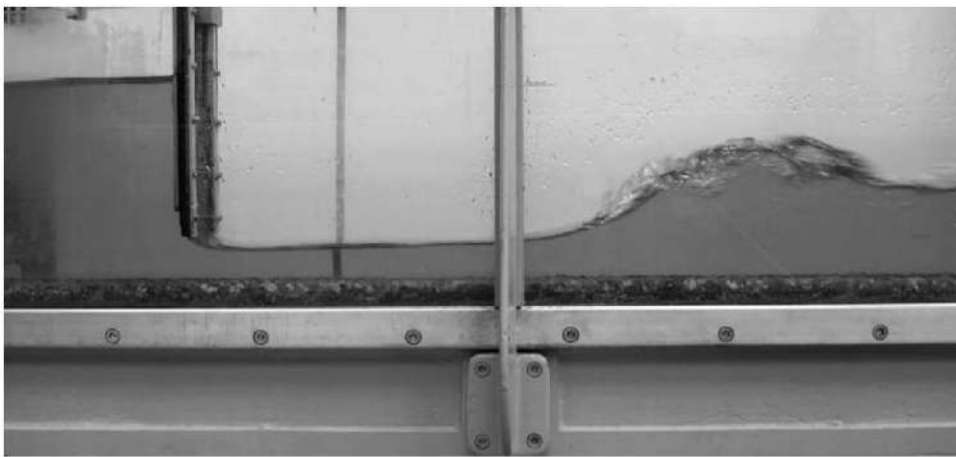


Abbildung 8: Wechselsprungsversuch in einer Kipprinne

Wir stellen für eine stationäre Strömung in einem horizontalen Gerinne die Impulsgleichung auf.

$$\frac{dI}{dt} = Mg \frac{z_{s,1} - z_{s,2}}{L} + \rho A_1 v_1^2 - \rho A_2 v_2^2 - \lambda M \frac{1}{d_{\text{hyd}}} \frac{v^2}{2}$$

Wir betrachten dabei einen Abschnitt des Gerinnes der Länge L , in dessen Mitte sich der Wechselsprung befindet. Auf dem recht kurzen Abschnitt nehmen wir an, dass die kontinuierlichen Verluste nicht sehr ausschlaggebend ins Gewicht fallen und vernachlässigen diese. Für die stationäre Strömung sind alle Zeitableitungen Null. Da sich der Wechselsprung in der Mitte von L befindet, berechnet sich die Wassermasse zu $M = \rho L B (h_1 + h_2) / 2$. Beim horizontalen Boden mit einer konstanten Breite ist $z_s = h$ und $A_1 = B h_1$ bzw. $A_2 = B h_2$. Führen wir dann noch die Froudezahl im Oberwasser

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g h_1}},$$

ein, so erhalten wir eine quadratische Gleichung für das Wassertiefenverhältnis

$$\frac{h_2^2}{h_1^2} + \frac{h_2}{h_1} = 2Fr_1^2.$$

Damit kann eine Beschreibung der sogenannten konjugierten Wassertiefen gefunden werden, die uns das Verhältnis der Wassertiefen vor und hinter dem Wechselsprung beschreibt.

Versuchsaufbau

In einer horizontal eingestellten Kiprinne (Abbildung 9) wird durch den Einbau eines Schützes ein schießender Abfluss erzeugt. Gleichzeitig wird mit einem am Ende der Rinne installierten Wehr ein Rückstau verursacht, der einen Wechselsprung, respektive den unstetigen Übergang von schießenden zu strömenden Fließverhältnissen, bewirkt. Für verschiedene Durchflüsse und Wehrstellungen sollen Sie sich zunächst die Charakteristik des Wechselsprunges erschließen, bevor anschließend die einzelnen Messdaten erhoben und ausgewertet werden.

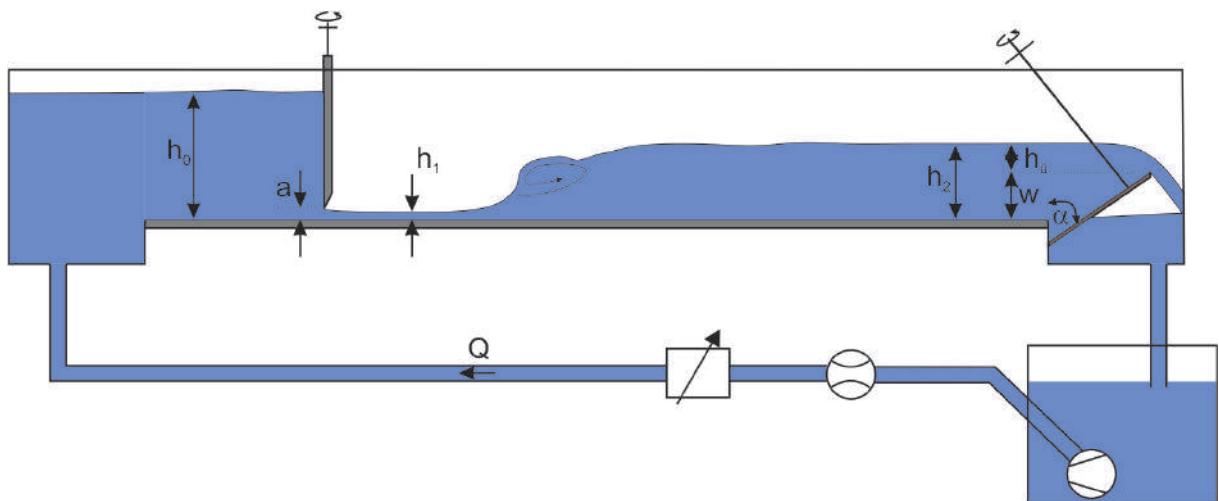


Abbildung 9: Skizze des Wechselsprungversuchs in einer Kiprinne mit der Länge 3m und der Breite 0.1m

Aufgaben:

1. Stellen Sie eine Schützenhöhe a Ihrer Wahl ein, bei welcher Sie einen Wechselsprung erzeugen können!
2. Stellen Sie das Wehr zunächst in die tiefste Stellung und wählen sich einen ersten Durchfluss Q !
3. Drehen Sie danach das Wehr solange nach oben, bis der Wechselsprung von unterstrom in das Gerinne eintritt! Messen Sie nun die Größen h_0 , a , h_1 , w , h_2 und α ! Beachten Sie, dass $h_1 \neq a$ gilt, da der Wasserstrahl sich nach dem Schütz noch ein wenig kontrahiert! Beachten Sie weiterhin, dass der Wechselsprung soweit in der Rinne liegt, dass Sie am Ende der Rinne noch die Möglichkeit haben h_2 sicher zu erfassen!
4. Wiederholen Sie nun die Messungen für mindestens 5 weitere Wehrhöhen w , jedoch noch bei gleichem Q und a !
5. Variieren Sie danach Q und wiederholen Sie die vorangegangenen Aufgaben für 5 weitere Durchflüsse!
6. Stellen Sie alle Messdaten in einer Gesamttabelle zusammen!
7. Stellen Sie für alle Messungen die Wassertiefe h_2 als Funktion von h_1 dar!
8. Werten Sie weiterhin das gemessene Wassertiefenverhältnis h_2/h_1 graphisch als Funktion der Froudezahl Fr_1 aus und vergleichen dies mit dem theoretischen Ansatz für die konjugierten Wassertiefen!

Auswertung an Auswertung in Englisch an yonas.balcha@unibw.de

6 Der Abfluss über das scharfkantige Pivot-Wehr

In einem Praktikumsversuch soll die Strömung über ein Überfallwehr (Abbildung 10) beobachtet und untersucht werden. In diesem Fall handelt es sich um ein sogenanntes scharfkantiges Pivot-Wehr. Das Pivot-Wehr ist ein planares neigungsvariables Wehr, welches sich in Fließrichtung neigen lässt. Dabei rotiert es um den in der Sohle verankerten Fuß des Wehres (s. Abb. 11, Punkt P).



Abbildung 10: Modell eines neigungsvariablen Überfallwehres (Pivot-Wehr)

Zum initialen Verständnis der Aufgabenstellung betrachten wir Abbildung 11 und stellen die Impulsbilanz in Strömungsrichtung für das markierte Kontrollvolumen auf. Der Einlaufquerschnitt (Index u) wird in einer Entfernung von ca. 3 bis 4mal der Wehrbreite vom Wehr definiert. Der Auslaufquerschnitt (Index 'u) befindet sich unmittelbar über der Wehrkrone.

$$\frac{dl}{dt} = M g J + \int_{A_u} p_u dA_u - \int_{A'_u} p'_u dA'_u + \int_{A_u} \rho v_u^2 dA_u - \int_{A'_u} \rho v_u'^2 dA'_u - \lambda M \frac{1}{d_{hyd}} \frac{v|v|}{2} + F_s$$

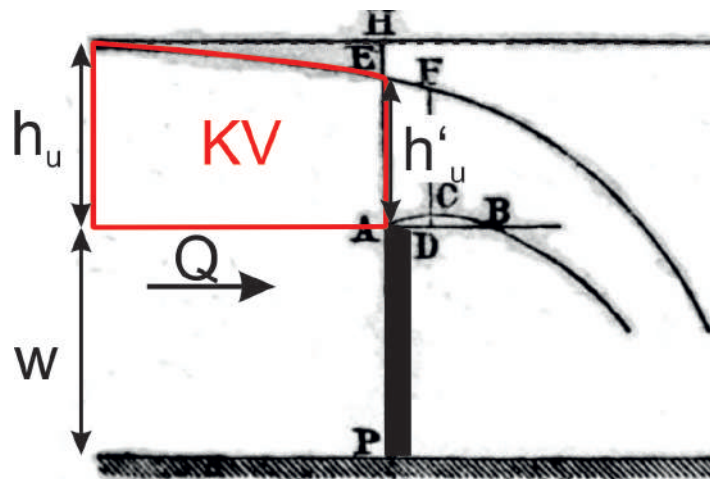


Abbildung 11: veränderte Prinzipskizze des scharfkantigen Wehrüberfalls nach Bazin

Für den hier vorliegenden Fall betrachten wir nur die horizontale Strömungsrichtung, weshalb der Gravitationsterm für diese Betrachtung verschwindet. Die Strömung sei zudem stationär, d.h. alle Zeitableitungen

entfallen. Da das Kontrollvolumen nicht entlang geschlossener Ränder verläuft und die viskose Reibung zwischen Luft und oberem Rand des Kontrollvolumens in guter Näherung vernachlässigbar ist, hat die viskose Reibkraft keinen Einfluss auf die Impulsbilanz. Dieser Term kann daher vernachlässigt werden. Der vertikale Einstrom über den unteren Rand des Kontrollvolumens (insbesondere bei einem geneigten Wehr) wird bislang nur durch die weiteren Kräfte F_S berücksichtigt. Um diesen Anteil zu berücksichtigen aber die Impulsbilanz nicht unnötig zu verkomplizieren, wenden wir folgenden Trick an: alles was in das Kontrollvolumen einströmt, strömt auch durch den Querschnitt des Kanals A_0 . Daher ersetzen wir $\int_{A_u} \rho v_u^2 dA_u + F_S$ durch $\int_{A_0} \rho v_0^2 dA_0$.

Die Auswertung der Impulsflüsse ist für reale Anwendungen oft aufwendig, da die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt nicht bekannt ist. Mit der Einführung des Impulskoeffizienten β kann das Integral der Geschwindigkeit über den Querschnitt durch den Mittelwert der Geschwindigkeit \bar{v} ersetzt werden.

$$\int_A v^2 dA = \beta \bar{v}^2 A$$

Der Impulskoeffizient β wird in der Regel durch numerische Simulationen ermittelt und liefert die physikalisch exakte Ersetzung des Integrals der Geschwindigkeit durch die mittlere Geschwindigkeit. Die Impulsbilanz für den Wehrüberfall ergibt nun

$$0 = \int_{A_u} p_u dA_u - \int_{A'_u} p'_u dA'_u + \rho \beta_u v_0^2 A_0 - \rho \beta'_u v_u'^2 A'_u. \quad (5)$$

Im Einlaufquerschnitt herrscht hydrostatische Druckverteilung über der Vertikalen ($\int_{A_u} p_u dA_u = \frac{1}{2} \rho g h_u^2 B$). Im Strahl über der Wehrkrone wird angenommen, dass der Druck im gesamten Querschnitt Luftdruck entspricht ($\int_{A'_u} p'_u dA'_u = 0$). Da wir im Experiment den Durchfluss messtechnisch erfassen, führen wir diesen noch mit $Q = v_0 A_0 = v'_u h'_u B_P$ und $A_0 = (h_u + w) B$ ein.

$$0 = \frac{1}{2} \rho g h_u^2 B + \rho \beta_u \frac{Q^2}{(h_u + w)B} - \rho \beta'_u \frac{Q^2}{h'_u B_P}$$

Umgestellt nach dem Durchfluss ergibt sich somit folgender Zusammenhang

$$Q = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} g B^2 h_u^2}{\beta'_u \frac{1}{h'_u} \frac{B}{B_P} - \beta_u \frac{1}{h_u + w}}}. \quad (6)$$

Im Laborversuch ist der Durchfluss Q bereits durch die internen Messeinrichtungen des Wasserkreislaufes bekannt. Weitere Größen wie die Breite der Rinne B , die Breite des Pivotwehres $B_P = 2,0$ m, die Wehrhöhe w , die Wehrneigung α und die beiden Höhen h_u und h'_u lassen sich messtechnisch erfassen. Im Auslaufquerschnitt über der Wehrkrone können wir den Impulskoeffizient zu $\beta'_u \approx 1$ abschätzen. Damit verbleibt als alleinige Unbekannte der Impulskoeffizient β_u . Durch den in Gleichung 5 angewandten Trick muss β_u auch den Einstrom über den unteren Rand des Kontrollvolumens in selbiges berücksichtigen, der durch die vertikale Strömung vor dem Wehr erzeugt wird. Somit ist die Ersetzung des Geschwindigkeitsintegrals und der weiteren Kräfte F_S physikalisch korrekt. Tatsächlich gibt es zwar Vermutungen wie groß der Impulskoeffizient β_u in etwa sein sollte, exakte Ergebnisse auf Basis aktueller Messungen und der neuen Impulstheorie sind allerdings noch nicht vorhanden. Dies wird nun Ihre Aufgabe sein.

Aufgabe 1 In einer ersten Aufgabe sollen Sie für 5 verschiedene Abflüsse Q ($90 \frac{1}{s}$, $75 \frac{1}{s}$, $60 \frac{1}{s}$, $45 \frac{1}{s}$ und $30 \frac{1}{s}$) die beiden Höhen h_u und h'_u ausmessen und daraus zusammen mit den festen Parametern den

Impulskoeffizienten im Zulauf β_u mit Gleichung 6 bestimmen. Ihre Wehrneigung α [°] ergibt sich anhand ihrer Gruppennummer i und der Anzahl aller Gruppen n zu

$$\alpha = 90 - 60 \frac{i - 1}{n - 1} \quad (7)$$

und ist in 5er-Schritten auf die erste Stelle vor dem Komma zu runden. Die verschiedenen Durchflüsse stellen Sie zusammen mit Ihrem Praktikumsbetreuer am Schaltschrank des Wasserbaulabors ein. Berechnen Sie zudem das Verhältnis h'_u/h_u ! Stellen Sie alle Parameter und Ergebnisse in einer Auswertetabelle zusammen!

Aufgabe 2 Henri Bazin hat in einer Reihe von 6 gleichnamigen Arbeiten mit dem Titel „Experiences Nouvelles sur l'Écoulement en D'eservoir“ in den Jahren 1888, 1890, 1891, 1894, 1896 und 1898 den Zusammenhang zwischen dem Abfluss Q und der Überfallhöhe h_u in sorgfältig dokumentierten Messreihen untersucht. Wir konnten bereits Bazins dargestellte Messdaten nutzen und seine Experimente für ein Wehr mit $w = 0,35$ m und für ein weiteres mit $w = 1,13$ m nachrechnen. Die neue Impulsbilanz trifft nahezu exakt die Messergebnisse von Bazin. Erstaunlicherweise ist dies aber der Fall, wenn wir davon ausgehen, dass der Wasserspiegel von der Überfallhöhe h_u NICHT auf h'_u über der Wehrkrone absinkt. In Gleichung 6 setzen wir daher $h'_u = h_u$ und finden

$$Q = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}gB^2h_u^2}{\beta'_u \frac{1}{h_u} \frac{B}{B_P} - \beta_u \frac{1}{h_u+w}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}gB^2h_u^3}{\beta'_u \frac{B}{B_P} - \beta_u \frac{h_u}{h_u+w}}} \quad (8)$$

Berechnen Sie nun unter Ausnutzung der bereits gemessenen Abflüsse und der Überfallhöhe h_u aus Aufgabe 1 den Impulskoeffizienten im Zufluss β_u mit Gleichung 8 und diskutieren Sie die Unterschiede!

Aufgabe 3 In der Literatur wird angenommen, dass direkt über der Wehrkrone die Strömung von einem strömenden in einen schießenden Abfluss übergeht. Warum dies aber tatsächlich passiert, ist noch unklar. Wenn dem so ist, dann sollte die Froudezahl

$$Fr_u = \frac{v'_u}{\sqrt{gh'_u}}$$

direkt über der Wehrkrone den Wert Eins annehmen. Kontrollieren Sie diese These für Ihre Messungen aus Aufgabe 1!

Wie Sie sehen, gibt es auch bei gängigen wasserbaulichen Bauwerken immer noch Forschungsbedarf. Hier besteht daher, neben anderen Versuchen, die Möglichkeit eine Bachelor-/Masterarbeit anzufertigen.

Auswertung in Englisch an manaye.tsige@unibw.de

7 Normalabfluss

In diesem Praktikum wollen wir anhand eines aktuellen Projektes die Thematik des Normalabflusses und der Normalwassertiefe behandeln. Dazu werden Sie sowohl ein Rechteckprofil, als auch ein Trapezprofil mit der Böschung 1/m betrachten (Abbildung 12).

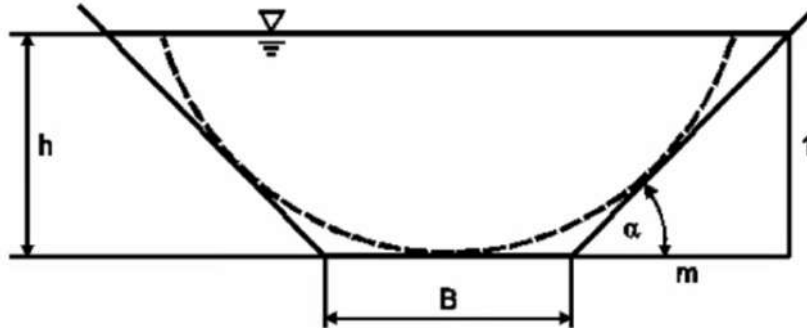


Abbildung 12: Querschnitt eines Trapezprofils

Gehen wir davon aus, dass sich entlang eines Gerinneabschnittes der Querschnitt nicht ändert und der Abfluss zeitlich konstant bleibt. Es wird sich dann im Gerinne als Gleichgewichtszustand der Normalabfluss mit der Normalwassertiefe einstellen. Für diesen Spezialfall der ungleichförmigen Strömung stellen wir die Impulsbilanz auf. Bei stationären Verhältnissen und gleichförmigen Bedingungen (konstante Breite und Höhe) ergibt sich das Gleichgewicht

$$\underbrace{\frac{z_{s,1} - z_{s,2}}{L}}_{J_s} = \underbrace{\frac{\lambda}{8g} \vec{v} |\vec{v}|}_{J_e} = \frac{\lambda}{d_{\text{hyd}}} \frac{|\vec{v}|^2}{2g}. \quad (9)$$

Wir erkennen, dass unter diesen besonderen Bedingungen die Neigung der Wasseroberfläche J_s gleich dem Energieliniengefälle J_e ist. Da sich die Breite und die Wassertiefe ebenfalls nicht ändern, sind beide Neigungen parallel zur Sohlneigung J_{s0} . Um daraus den Durchfluss zu berechnen, ersetzen wir $v = Q/A(h_N)$

$$Q = \sqrt{\frac{2g J d_{\text{hyd}} A^2}{\lambda}} \quad (10)$$

mit dem Widerstandsbeiwert λ nach Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.71 d_{\text{hyd}}} \right],$$

worin Q auch in der Reynoldszahl enthalten ist. Wir müssen hier also iterativ vorgehen. Dies wird umso intensiver, wenn wir die Normalwassertiefe h_N bei einem gegebenen Durchfluss berechnen wollen. Die Normalwassertiefe kommt in der Querschnittsfläche A , dem hydraulischen Durchmesser und in λ vor. Wenn wir dies für ein Trapezprofil lösen, dann können wir dies auch für den Spezialfall eines Rechteckgerinnes ($m = 0$). Die Querschnittsfläche und der hydraulische Durchmesser eines Trapezes nach Abbildung 12 ist

$$A = Bh + mh^2 \quad \text{und} \quad d_{\text{hyd}} = \frac{4(Bh + mh^2)}{2h\sqrt{1 + m^2} + B}.$$

Den Durchfluss berechnet man sich dann zu

$$Q = \sqrt{\frac{8gJ}{\lambda} \frac{(Bh_N + mh_N^2)^3}{2h_N\sqrt{1+m^2} + B}}$$

Nach recht aufwendiger Umstellung, erhält man auch daraus ein Polynom sechsten Grades für die Normalwassertiefe

$$0 = m^3 h_N^6 + 3Bm^2 h_N^5 + 3B^2 m h_N^4 + B^3 h_N^3 - \frac{2\lambda Q^2}{8gJ} \sqrt{1+m^2} h_N - \frac{\lambda Q^2}{8gJ} B. \quad (11)$$

Sofern ein Gerinne bereichsweise unterschiedliche äquivalente Sandrauheiten k_s aufweist muss ein gewichteter Mittelwert gebildet werden, um die Rauheit des Gerinnes zu beschreiben. Im Fall eines Rechteckgerinnes erfolgt die Wichtung lediglich über den benetzten Umfang U

$$\bar{k}_s = \frac{\sum_i k_{s,i} U_i}{\sum_i U_i}. \quad (12)$$

Hingegen müssen bei gegliederten Profilformen (z.B. Trapezprofil, kombiniertes Trapez-Rechteckprofil) auch die dazugehörigen Teilfließquerschnitte A_i mit berücksichtigt werden und die Wichtung der mittleren Rauheit über die hydraulischen Durchmesser $d_{hyd,i}$ erfolgt.

Im Folgenden sollen Sie diese theoretischen Überlegungen mit Messungen am physischen Modell Bayrischzell (Abbildung 13, Maßstab 1:10) kontrollieren. Dazu sind folgende Aufgaben zu bearbeiten:

1. Messen Sie die Wasserstände im Wendelsteinbach im Trapezquerschnitt bei Flusskilometer 0+407, sowie in einem Rechteckquerschnitt zwischen Flusskilometer 0+385 und 0+360 für mindestens drei verschiedene Durchflüsse (z.B. HQ10, HQ50, HQ100, Tab. 1)!
2. Berechnen Sie mit Gleichung 11 die Normalwassertiefen für die Durchflüsse und vergleichen Sie die Ergebnisse! Vervollständigen Sie dazu das untere Matlab-Script!
3. Bewerten Sie die Ergebnisse aus der Messung und der Berechnung!

Tabelle 1: Hochwasserabflüsse

Hochwasserereignis	HQ ₅	HQ ₁₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀
Abfluss $\left[\frac{l}{s}\right]$	22,4	29,2	47,7	56,5

Die zur Messung verwendeten Sensoren geben die Messwerte in Spannung $X_{roh}[V]$ aus. Deshalb ist nötig dies erst mittels der Sensorsteigungen S und Nullwerte N umzurechnen

$$X = S (X_{roh} \pm N), \quad (13)$$

wobei Sie die Nullwerte messen müssen und die Sensordaten der Tabelle 2 entnehmen können.



Abbildung 13: Querschnitt eines im physischen Modell Bayrischzell

Tabelle 2: Sensordaten

Sensortyp	Nr.	Positionsbeschreibung	Inventarisierungsnummer	Steigung [$\frac{\text{cm}}{\text{V}}$], [$\frac{\text{l/s}}{\text{V}}$]
Ultraschall	5	Wendelsteinbach Oberstrom des 1. Sohlabsturzes	072827000	-2,9564
Ultraschall	1	Wendelsteinbach Messtraverse linke Außenseite (in Fließrichtung)	085290000	-2,9712
Ultraschall	2	Wendelsteinbach Messtraverse mittig links (in Fließrichtung)	08529200	-2,9467
Ultraschall	3	Wendelsteinbach Messtraverse mittig rechts (in Fließrichtung)	072936000	-2,9428
Ultraschall	4	Wendelsteinbach Messtraverse rechte Außenseite (in Fließrichtung)	072485000	-2,9848
IDM	1	Zufluss Wendelsteinbach		12,5

```

1  %% Berechnung der Normalwassertiefe mit Trapezprofil
2  clear all;clc
3  Q = ; % Durchfluss [m^3/s]
4  B = ; % Breite Boden [m]
5  J = ; % Laengsneigung
6  m = ; % Boeschungsneigung
7  g = ; % Erdbeschleunigung [m/s^2]
8  nu = ; % kinematische Viskositaet [m^2/s]
9  ks_Trapezprofil = 1/100; % Rauheit [m]
10 ks_Wand = ;
11 ks_Sohle = ;
12 ks = [ks_Trapezprofil ks_Wand ks_Sohle];
13 hn=normalwassertiefe(Q,B,J,ks,m)
14 % Berechnung der Normalwassertiefe
15 function hn=normalwassertiefe(Q,B,J,ks,m)
16 %Anfangswerte
17 hn0=0;
18 hn=1;
19 while max(abs(hn-hn0)) > 1e-6
20     hn0 = hn;
21     if m ~= 0
22         ks_ = ks(1); % Trapezprofil
23     else
24         ks_ = (2*ks(2)*hn0+ks(3)*B)/(2*hn0+B); % Rechteckprofil
25     end
26     A = ;
27     dhyd = ;
28     lambda = colebrook_white(Q/A*dhyd/nu,ks_/dhyd);
29     poly = [];
30     hn = max(real(roots(poly)));
31 end
32 end

```

Auswertung an michael.steinegger@unibw.de und miriam.maximini@unibw.de

8 Das Filtergesetz von Darcy: Bestimmung der Durchlässigkeit einer Bodenprobe

Henry Darcy wurde 1803 in Dijon geboren. Nach seiner Ausbildung an der École des Ponts et Chaussées sollte er 1826 die Trinkwasserversorgung für Dijon bauen. Das Projekt umfasste 2 Reservoirs, 5,5 km Äquidukt, 11 km Rohrleitung, mehrere Fontänen und besonders 120 öffentliche Trinkwasserbrunnen. Die Trinkwasserversorgung wurde 1840 in Betrieb genommen. Um Filterversuche mit porösen Medien durchzuführen, konzipierte Darcy einen Versuchsstand, den wir heutzutage wie folgt aufbauen würden.

Darcy untersuchte den Fließwiderstand in einem Rohr, wenn dieses mit einem porösen Medium (i.d.R. Bodenmaterial, Sediment, Sand) gefüllt ist. Seine Frage war, welchen Druckverlust erzeugt eine Bodenprobe einer bestimmten Länge, wenn ein gewisser Durchfluss durch diese geht? Wird in einem mit gesättigtem Sediment gefülltem Rohr der Druck an einer Stelle 1 und an einer, entlang der Rohrrichtung entfernten Stelle L, zweiten Stelle 2 gemessen, so beobachtete Darcy einen Druckabfall der größer als der bekannte Verlust der Rohrreibung war (Abbildung 14).

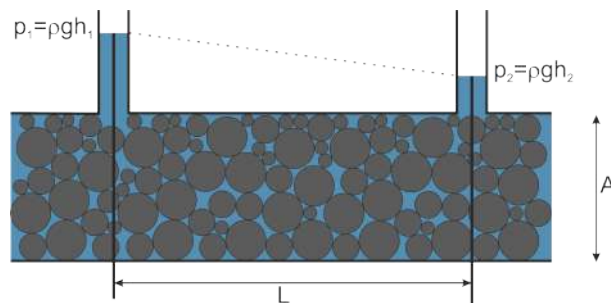


Abbildung 14: Messaufbau von Darcy zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit

In einem solchen Fall ist die Filtergeschwindigkeit

$$v_f = \frac{Q}{A} < v_{mol}$$

kleiner als die Geschwindigkeit eines einzelnen Wassermoleküls v_{mol} , was sich zwischen den Körnern bewegen kann. Anders gesagt: Die Körner verblocken den Rohrquerschnitt und reduzieren diesen, wodurch die folgende Geschwindigkeit deutlich kleiner wird. Darcy hatte den Abfall des Wasserstandes in den Standröhrchen gemessen und ins Verhältnis zum Rohrstück L gesetzt. Da dies die Einheit Eins hat, setzte er davor einen Vorfaktor mit der Einheit m/s, damit sich eine Geschwindigkeit ergibt. Diese Geschwindigkeit nennen wir Filtergeschwindigkeit

$$v_f = k_f \frac{h_1 - h_2}{L} = -k_f \frac{dh}{dx} = -k_f \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx}. \quad (14)$$

Der Vorfaktor k_f ist der Durchlässigkeitsbeiwert (Permeabilität) des Bodens, für den nach DIN 18130-1 (Versickerungsfähigkeit) folgende Richtwerte angesetzt werden können.

$10^{-2} \text{ m/s} < k_f$	...	sehr stark durchlässiger Boden
$10^{-4} \text{ m/s} \leq k_f \leq 10^{-2} \text{ m/s}$	...	stark durchlässiger Boden
$10^{-6} \text{ m/s} \leq k_f \leq 10^{-4} \text{ m/s}$	...	durchlässiger Boden
$10^{-8} \text{ m/s} \leq k_f \leq 10^{-6} \text{ m/s}$	...	schwach durchlässiger Boden
$k_f < 10^{-8} \text{ m/s}$	...	sehr schwach durchlässiger Boden

Für das Darcy-Gesetz gilt in alle Raumrichtungen

$$\vec{v}_f = -k_f \text{grad} \frac{p}{\rho g}. \quad (15)$$

Würden wir die Filtergeschwindigkeit lediglich in z-Richtung betrachten, beträgt der hydrostatische Druck

$$p = \rho g(z_{\text{GWS}} - z)$$

und so würde dies zu

$$w_f = -k_f \frac{\partial p}{\partial z} \frac{1}{\rho g} = k_f$$

führen. Demnach würde das Grundwasser stets in den ungesättigten Bodenbereich aufsteigen, was es allerdings nicht tut. Das Darcy-Gesetz gilt nämlich nicht in vertikaler Richtung (weshalb der Darcy-Versuch mit einem horizontalen Rohr durchgeführt wird). Dafür muss ein erweitertes Darcy-Gesetz

$$\vec{v}_f = -k_f \text{grad} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \quad (16)$$

geschrieben werden. Denn dann ist diese in vertikaler Richtung $w_f = 0$.

Sie sollen in diesem Praktikum das Darcy-Gesetz zur Bestimmung der Durchlässigkeit verschiedener Bodenproben anwenden. Dazu sind folgende Aufgaben zu bearbeiten:

1. Schauen Sie sich zunächst das Lehrvideo an, um noch tiefer in die Thematik einzusteigen: <https://www.youtube.com/watch?v=QAUCWY0dXZw&t=760s>!
2. Führen Sie am Versuchsstand (Abbildung 15) eigene Untersuchungen durch und bestimmen Sie sich die Durchlässigkeit von min. 2 Bodenproben! Eine Anleitung zur Bedienung des Apparates liegt am Versuchsstand.
3. Ordnen Sie den jeweiligen untersuchten Böden hinsichtlich der Versickerungsfähigkeit nach DIN 18130-1 ein!
4. Bewerten Sie die Ergebnisse aus den Messungen!

Auswertung in Englisch an abebe.toni@unibw.de und yvonne.koepe-kreissig@unibw.de



Abbildung 15: Versuchsstand zum Darcy-Gesetz im Sedimentlabor der UniBw

9 Rheometrische Messungen

Der Couetteversuch stellt das Messprinzip, durch welches die Viskosität definiert ist, anschaulich dar. Zur exakten Bestimmung der Viskosität eignet er sich wegen der unregelmäßigen Geometrie allerdings nicht. Lange Zeit wurde die Viskosität mit Kapillarrheometer bestimmt. Hier fließt die Testflüssigkeit aus einem Behälter durch ein Röhrchen aus. Gemessen wird dann die Zunahme der Flüssigkeit im Auffangbehälter mit der Zeit.

Beim Couette-Viskosimeter ist die Testflüssigkeit zwischen zwei konzentrischen Zylindern angebracht. Bei den meisten Anordnungen rotiert dabei der innere gegen den äußeren Zylinder und man misst das erforderliche Drehmoment, um die Rotation aufrecht zu erhalten.

Im folgenden sollen die heutigen Rotationsviskosimeter genauer beschrieben werden. Neben der reinen Viskositätsbestimmung eignen sich Rheometer auch dazu, das Verhalten viskoelastischer Fluide zu analysieren.

9.1 Platte-Platte-Rotationsviskosimeter

Das Problem des Couette-Vesuchs besteht also darin, dass einen der Scherspannung ausgelieferten Bereich und einen freien Bereich gibt. Dies kann verhindert werden, wenn man das Messprinzip von einer Translation auf eine Rotation bzw. Torsion überträgt. Ein solches Torsionsviskosimeter ist in Abbildung 16 dargestellt.

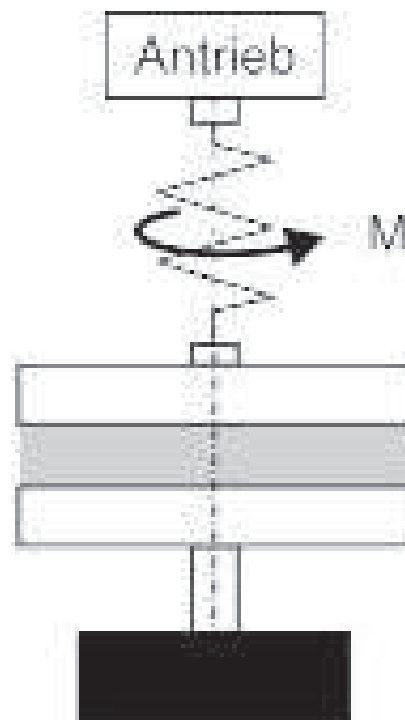


Abbildung 16: Ansicht des MCR 51-Rheometers der Firma Anton Paar. Beim Platte-Platte-Rotationsversuch befindet sich die Flüssigkeit zwischen zwei kreisförmigen Scheiben, deren eine sich über der anderen dreht. Angetrieben wird die obere Platte durch das Drehmoment M , welches die Rotationsgeschwindigkeit ω erzeugt.

Durch die Rotation der oberen kreisförmigen Platten bildet sich dort ein Geschwindigkeitsfeld aus, welches dem der Abbildung 17 entspricht. Hier ist es allerdings vorteilhaft die Anordnung in Polarkoordinaten

zu beschreiben. Darin werde mit u_r die Radialgeschwindigkeit bezeichnet, von der angenommen werden kann, dass sie Null ist. u_θ bezeichne die Umlaufgeschwindigkeit. Sie ist an der unteren, ruhenden Platte Null und steigt zur oberen Platte auf deren Rotationsgeschwindigkeit an:

$$u_\theta(r, \theta, z) = \omega r \frac{z}{h}$$

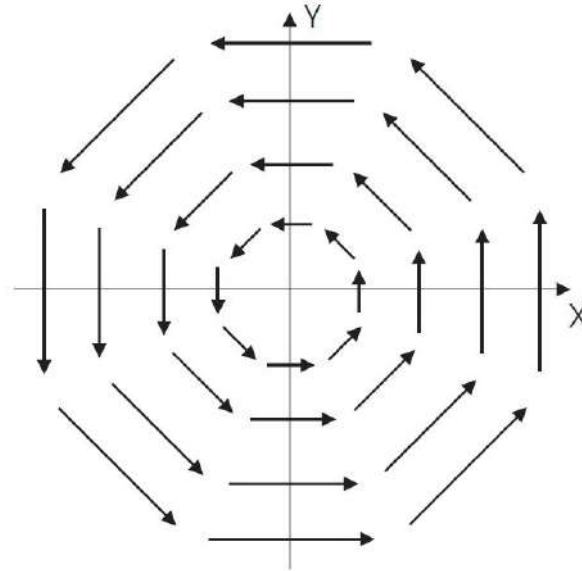


Abbildung 17: Kreisförmiges Vektorfeld. Länge und Richtung der einzelnen Vektoren gelten jeweils in ihrer Mitte.

Hier ist h der Abstand zwischen der oberen und der unteren Platte. Somit bildet sich eine Scherung in Umlaufrichtung aus, deren Scherrate mit

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{\omega r}{h}$$

vom Mittelpunktsabstand r abhängig ist. Nach der Definition der Viskosität ist damit die Scherspannung

$$\tau_{z\theta} = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{\omega r}{h}$$

verbunden. Darin muss die Viskosität allerdings keine Konstante sein, sondern kann selbst von der Scherrate abhängen.

Diese Scherspannung wird durch das Drehmoment M des Antriebs überwunden. Die mit diesem Moment verbundene Kraft ergibt sich durch Integration der Scherspannung $\tau_{z\theta}$ über die Kreisfläche:

$$M = \int_0^R \int_0^{2\pi} r \tau_{z\theta} 2\pi r d\theta dr = \int_0^R 4\pi^2 r^2 \tau_{z\theta} dr$$

Ist nun die Viskosität über die gesamte Kreisfläche konstant (Newtonsches Fluid) dann folgt:

$$M = \int_0^R 4\pi^2 r^2 \mu \frac{r\omega}{h} dr = \frac{\pi^2 R^4 \mu \omega}{h},$$

womit sich diese als

$$\mu = \frac{Mh}{\pi^2 R^4 \omega}$$

bestimmt.

Im allgemeinen Fall eines nichtnewtonschen Fluids kann man aus dem Verlauf des Drehmoments M als Funktion der Kreisfrequenz ω auf die Viskositätskurve durch eine Integraltransformation schließen.

Natürlich muss man mit dieser Anordnung prüfen, ob die sich einstellende Strömung tatsächlich linear ist. Dazu kann man das Experiment z.B. beim halben Plattenabstand wiederholen und verifizieren, ob man die gleichen Viskositätswerte erhält.

9.2 Platte-Konus-Rotationsviskosimeter

Die Variabilität der Scherrate bei der Platte-Platte-Anordnung lässt sich ganz einfach beheben, wenn man die obere Platte durch einen Konus mit dem Öffnungswinkel α ersetzt. Dieser Winkel beträgt etwa 1° , ist also sehr klein. Dann ist der Abstand zur oberen Platte vom Radius abhängig, $h(r) = r \tan \alpha$. Die Scherrate

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\tan \alpha}$$

ist dann ebenfalls vom Radius unabhängig.

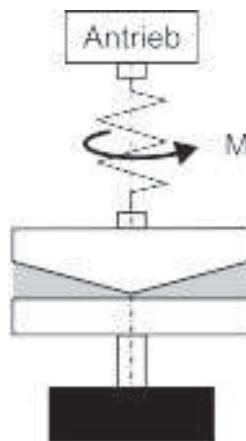


Abbildung 18: Platte-Konus-Torsionsrheometer

9.3 Systematische Messfehler in der Rotationsviskosimetrie

In der Praxis darf die Spitze des Konus natürlich mit der unteren Platte nicht in Berührung kommen und auf ihr rotieren. Daher wird die Spitze einfach abgeschnitten, wodurch zwischen der oberen und unteren Platte ein Spalt entsteht. Bei der Rheometrie granularer Suspensionen ist zu beachten, dass der Korndurchmesser wesentlich kleiner als dieser Spaltabstand (max. $1/5$ des Spaltabstands) ist, damit diese sich nicht verkanten. Bei einem Spaltabstand von $50 \mu\text{m}$ sollte das suspendierte Korn kleiner als $10 \mu\text{m}$ sein.

Ferner sollte die Messzeit für jeden Datenpunkt mindestens bei $T_{\text{mess}} = 1/\dot{\gamma}$ liegen.

Erkennt man in der Fließkurve (und nur dort) eine Abnahme der Scherspannung mit zunehmender Scherrate, so ist zu überprüfen, ob eine Spaltentleerung stattgefunden hat.

9.4 Durchführung des Praktikumsversuchs

1. Bestimmen Sie die Viskosität von Öl und einer weiteren Flüssigkeit bei den Temperaturen 10°C, 15°C, 20°C, 25°C und 30°C! Verwenden Sie die CSR -Methode!
2. Stellen Sie die Messergebnisse graphisch dar!

Auswertung an yvonne.koeppe-kreissig@unibw.de