

Diploma Thesis

Flume experiments on the reacting forces of large wood in rivers

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Laborversuche zur Widerstandskraft von Flussholz in Gewässern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Alexander Hofmann

Matr.Nr.: 01127506

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. ir. PhD **Koen Blanckaert**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ingo Schnauder**

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich für Wasserbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/Stiege 1, 3. Stock, A-1040 Wien

Wien, im März 2021

Kurzfassung

Da die Strömung um einen Zylinder in der Hydromechanik ein klassisches Problem darstellt, gibt es dazu eine große Menge an durchgeführten Versuchen. Bis heute ist aber, unter anderem auf Grund der strukturellen Vielfalt und der Anwendung der Ansätze auch auf ökohydraulische Fragestellungen das Thema nach wie vor aktuell geblieben.

Beachtenswert ist, dass den meisten bestehenden Auswertungen Daten zugrunde liegen, welche durch Versuche in kleinen Maßstäben oder im Fall von hintereinanderliegenden Störkörpern, mit geringen Zwischenabständen gewonnen wurden. Das lässt die Frage offen, ob daraus abgeleitete Ansätze zur Berechnung verallgemeinerbar sind, also auch beispielsweise für Totholz in Fließgewässern gültig sind. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sind Laborversuche zum Thema Widerstandskraft von Totholz in Gewässern durchgeführt worden.

Dazu wurden 5 identische Zylinder in einer Versuchsrinne eingebaut. Bei Durchflüssen, welche eine turbulente Nachlaufzone am Zylinder hervorrufen wurden in weiterer Folge sowohl Kraftmessungen als auch Geschwindigkeitsmessungen umgesetzt. Der Aufbau, Ablauf und die Messergebnisse, sowie Erklärungsansätze dazu finden sich in dieser Diplomarbeit wieder.

Dabei zeigte sich, dass sich viele bekannte Einflussgrößen auf die Kräfte und Widerstandsbeiwerte umströmter Zylinder im Geschwindigkeitsprofil der Anströmung zusammenfassen lassen. Aus diesem Grund ist die Verwendung einer mittleren, aus dem Durchfluss ermittelten Geschwindigkeit zur deren Berechnung nur in Einzelfällen geeignet. Als wesentliche Parameter, welche nicht schon im Profil der Anströmgeschwindigkeit enthalten sind, bleibt der Verbaugrad, die Turbulenz der Anströmung, und die Zylinderrauheit.

Abstract

As flow around circular cylinders represents a classic problem in hydraulic engineering, there have been a variety of experiments concerning the topic. Up until today however, partly because approaches to describe the context largely depend on the individual setup for each experiment, understanding of key factors is still lacking.

It is to be noted that existing theories to characterize the subject are mostly based on data that was gained from experiments of either small scale or small spacing between objects. Therefore the question remains whether approaches derived from them are generalisable or not; for example if they can be used to calculate the influence of large wood debris. As a consequence, the boundary conditions of flow have been violated, and measurements are often not accurate enough to meet the requirements that are mandatory for drag estimates. In the context of this thesis, experiments that deal with the issue of drag along deadwood in flowing waters have been carried out.

For this purpose, 5 identical circular cylinders were placed into an experimental flume, and velocity measurements as well as drag measurements were then conducted. The setup, operation and the results of experiments that have been made, plus attempts to explain them are addressed in this Master thesis.

It was shown that many known influencing factors of drag force and drag coefficient can be summarized within the corresponding velocity profile. For this reason, the use of uniform flow to calculate them is limited to a few isolated cases.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Einleitung..... | 6 |
| 2. | Grundlagen..... | 7 |
| 2.1 | Einflussgrößen auf Kräfte und Widerstandsbeiwerte umströmter Körper..... | 7 |
| 2.1.1 | Geschwindigkeitsprofil der Anströmung..... | 8 |
| 2.1.2 | Turbulenz..... | 8 |
| 2.1.3 | Verbaugrad..... | 9 |
| 2.1.4 | Sohlrauheit..... | 10 |
| 2.1.5 | Zylinderrauheit..... | 11 |
| 2.1.6 | Wandrauheit..... | 12 |
| 2.1.7 | Oberflächenwellen..... | 12 |
| 2.1.8 | Abstand..... | 13 |
| 2.1.9 | Zylinderzahl bei Reihenanordnung..... | 14 |
| 2.1.10 | Zylinderabmessungen..... | 14 |
| 3. | Laborversuche..... | 16 |
| 3.1 | Versuchsrinne und Messaufbau..... | 16 |
| 3.2 | Wahl der Abstände und Durchmesser..... | 18 |
| 3.3 | Zulaufbedingungen..... | 20 |
| 3.4 | Kraftmessungen..... | 23 |
| 3.4.1 | Kalibriermethoden..... | 23 |
| 3.4.2 | Einflüsse beim Kalibriervorgang..... | 26 |
| 3.4.3 | Messablauf Kraftmessungen..... | 31 |
| 3.5 | Geschwindigkeitsmessungen..... | 31 |
| 3.5.1 | Einpunktmessungen..... | 31 |
| 3.5.2 | Vertikale Messprofile..... | 32 |
| 3.5.3 | Aufbau und Messpunkte..... | 33 |
| 3.6 | Auswertung der Messungen..... | 35 |
| 4. | Ergebnisse..... | 38 |
| 4.1 | Ergebnisse der Kraftmessungen..... | 38 |
| 4.2 | Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen..... | 40 |
| 4.2.1 | Punktmessungen..... | 40 |
| 4.2.2 | Vertikalprofile..... | 41 |
| 4.3 | Oberflächenwellen..... | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5. | Interpretation und Diskussion..... | 44 |
| 5.1 | Anströmgeschwindigkeit und Zylinderzahl | 44 |
| 5.2 | Verbaugrad | 47 |
| 5.3 | Rauheitseinflüsse..... | 49 |
| 6. | Zusammenfassung..... | 53 |
| 7. | Literaturverzeichnis..... | 54 |
| 8. | Zitate..... | 55 |
| 9. | Abbildungen und Tabellen | 56 |
| | Abbildungen | 56 |
| | Tabellen | 59 |

Verzeichnis der Formelzeichen

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---------------|----------------|---|
| A | m^2 | Querschnittsfläche |
| A_p | m^2 | Projizierte Fläche, normal zur Strömung |
| C_w | - | Widerstandsbeiwert von umströmten Körpern |
| F_w | N | Widerstandskraft, Strömungswiderstand |
| Fr | - | Froudezahl |
| g | m/s^2 | Erdbeschleunigung |
| H | m | Wasserspiegelhöhe |
| h | m | Wassertiefe |
| k_s | mm | Äquivalente Sandrauheit |
| Q | m^3/s | Mittlerer Durchfluss |
| q | m^3/s | Spezifischer Durchfluss |
| d | cm | Durchmesser |
| Re | - | Reynoldszahl |
| u | cm/s | Geschwindigkeit (in x- Richtung) |
| v | cm/s | Geschwindigkeit (in y- Richtung) |
| w | cm/s | Geschwindigkeit (in z- Richtung) |
| x,y,z | cm | Kartesische Koordinaten |
| x | cm | Koordinate in Stömungsrichtung |
| y | cm | Wandkoordinate (-abstand) |
| z | cm | Lagehöhe relativ zu einem Bezugsniveau |
| d_g | - | Schnitt einer Geraden mit der Ordinate |
| R^2 | - | Bestimmtheitsmaß |
| μ | - | Mittelwert |
| k | - | Steigung einer Geraden |
| U_Q | cm/s | Mittlere Geschwindigkeit aus dem Durchfluss errechnet |
| u_0 | cm/s | Spezifische Anströmgeschwindigkeit |

1. Einleitung

Anthropogene Eingriffe wie Fließregulierungen, Kraftwerksbau, Hochwassersicherheitsmaßnahmen, usw. führten durch Begradigung der ursprünglichen Linienführung, monotone Profilformen, Eliminierung der natürlichen Ufervegetation, zu geänderten Strömungs- und Substratverhältnissen sowie zu Vereinheitlichung der Verhältnisse des Flussbettes. Zudem unterscheiden sich die Fließgewässer in unseren Breiten von ihrer natürlichen Ausprägung, auch durch die nur noch in geringem Ausmaß erhaltene Menge an Totholz.

Derartige Veränderungen bewirken unter anderem qualitative sowie quantitative Beeinträchtigungen der aquatischen Biozöosen. Diese sind in der Abnahme bzw. im Verschwinden einzelner Arten, in der Verschiebung des Artenspektrums und generell in einer Reduktion der Bestände zu erkennen. Die Aufgaben der modernen Wasserwirtschaft orientieren sich neben der Nutzung von Fließgewässern und dem Hochwasserschutz in zunehmendem Maße auch an ökologischen Gesichtspunkten.

Dabei gilt es, neben der vordergründigen Erhaltung der naturnahen Fließgewässerstrecken, die notwendigen baulichen Maßnahmen möglichst behutsam zu gestalten und die bereits durch menschliche Eingriffe gestörten Gewässersysteme in einen naturnäheren Zustand rückzuführen. (Urbanek et al, 1999)

Das Ziel dieser Arbeit war durch Kraftmessung von hintereinanderliegenden Zylindern die Auswirkungen von Flussholz durch Laborversuche zu bestimmen, sowie die Basis für einen verbesserten Rechenansatz zu schaffen. Dazu wurden in einer Versuchsrinne zylinderförmige Körper mit veränderlicher Oberflächen- und Sohlrauheit eingebaut und anschließend Kraft- sowie Geschwindigkeitsmessungen bei variablem Durchfluss durchgeführt. Dadurch, dass die Obergrenze für die Froudezahl bei einem Durchfluss von 200 l/s aber bei etwa 0,5 lag, war bereits ein Einfluss von Oberflächenwellen gegeben. Der Durchmesser der Versuchszylinder betrug dabei 11cm für glatte bzw. 11,5cm für raue Zylinder und der abgedeckte Reynoldsbereich für den Zylinderdurchmesser reicht von etwa $3 \cdot 10^3$ bis $1 \cdot 10^5$. Damit ist jener Bereich, welcher für charakteristische Durchmesser von Totholz in Fließgewässern im Tiefland, als auch jener Bereich, welcher im alpinen Raum vorkommt, abgedeckt.

2. Grundlagen

In der Vergangenheit wurden zur Widerstandskraft von Zylinderförmigen Körpern in einer Strömung schon Versuche gemacht. Bereits vorhandene Daten können aber nur eingeschränkt für die vorliegende Thematik genutzt werden, da nur ein vergleichbarer Versuchsaufbau zu ähnlichen Daten führt. Ein Modell im Wasserbau kann nicht ohne weiteres skaliert werden, da die geometrischen Parameter auch mit den Eigenschaften der Flüssigkeit zusammenpassen müssen.

Allem voran ist in Abbildung 1 der Zusammenhang zwischen der Reynoldszahl und dem Widerstandsbeiwert dargestellt, wie in den durchgeführten Versuchen ebenfalls für sphärische Zylinder. Gut erkennbar ist, dass sich für den untersuchten Reynoldsbereich keine Karman'sche Wirbelstraße im Nachlaufbereich ausbildet. Auch jener Bereich, in dem der C_w – Wert rapide abfällt (in etwa bei $Re = 3 \cdot 10^5$) wird nicht erfasst. Zwischen diesen Bereichen liegt ein Plateau vor, an welchem der Widerstandskoeffizient rund um den Wert 1,0 schwankt. Diese Hypothese wird in der Literatur von einer Vielzahl an Quellen gestützt (siehe dazu Abbildung 1) und kann daher als fixe Größe angesehen werden, solange ähnliche Versuchsbedingungen vorliegen.

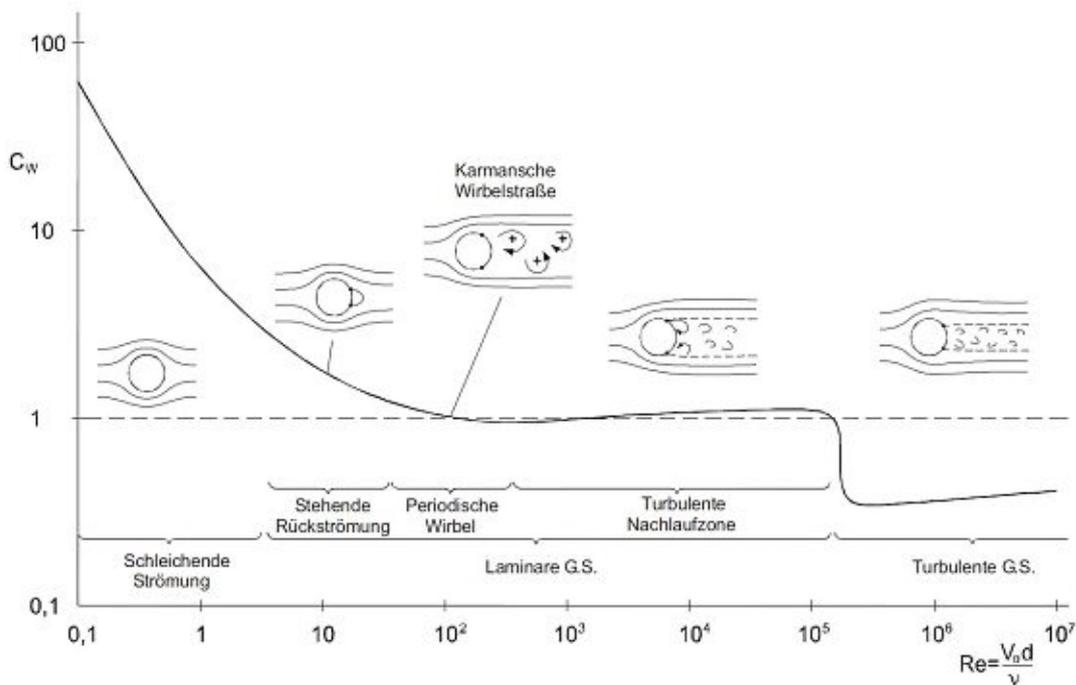


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Reynoldszahl und Widerstandsbeiwert für Kreiszyylinder. (Jirka, 2009)

2.1 Einflussgrößen auf Kräfte und Widerstandsbeiwerte umströmter Körper

Bei den durchgeführten Versuchen gibt es verschiedene Variablen, welche Einfluss auf die resultierende Kraft auf den Messzylinder haben. Neben der Geschwindigkeit der Anströmung sind auch die Turbulenz, der Verbaugrad, Oberflächenwällen und verschiedene Rauheiten, welche in weiterer Folge beschrieben werden, von Bedeutung.

2.1.1 Geschwindigkeitsprofil der Anströmung

Die resultierende Kraft auf einen Körper in der Strömung kann durch Gleichung 1 beschrieben werden:

$$F_w = C_w \rho \frac{u_0^2}{2} A_p \quad [1]$$

Es ist entscheidend, welche Geschwindigkeit zur Berechnung verwendet wird, da sich die Ergebnisse stark voneinander unterscheiden können, je nachdem ob im Staubereich oder davor gemessen wurde. Auch die durch den Körper hervorgerufene Querschnittsveränderung (bei Gerinnen) ändert lokal die Geschwindigkeit.

2.1.2 Turbulenz

Definition des Turbulenzgrades:

Der Turbulenzgrad ist eine statistische Größe, welche die Turbulenz der Anströmung kennzeichnet:

Der Turbulenzgrad bzw. die Turbulenzintensität definiert sich als Verhältnis der Standardabweichung turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen zu der gemittelten Geschwindigkeit in der Anströmung:

$$Tu_x = \frac{\sigma_x}{u} \quad [2]$$

Tabelle 1: Formelzeichen für die Definition der Turbulenz.

| mit | Tu_x | Turbulenzgrad der Strömung in Hauptströmungsrichtung |
|-----|------------|--|
| | σ_x | Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung |
| | u | Zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeit |

Abbildung 2 (Cheung & Melbourne 1983) zeigt den C_w - Wert für Zylinder in Abhängigkeit des Turbulenzgrades und der Reynoldszahl. Eindeutig erkennbar ist, dass in höheren Reynoldsbereichen (etwa bis 10^5 und knapp darunter) ein niedriger Turbulenzgrad in der freien Strömung zu einem wesentlich höheren C_w - Wert führt.

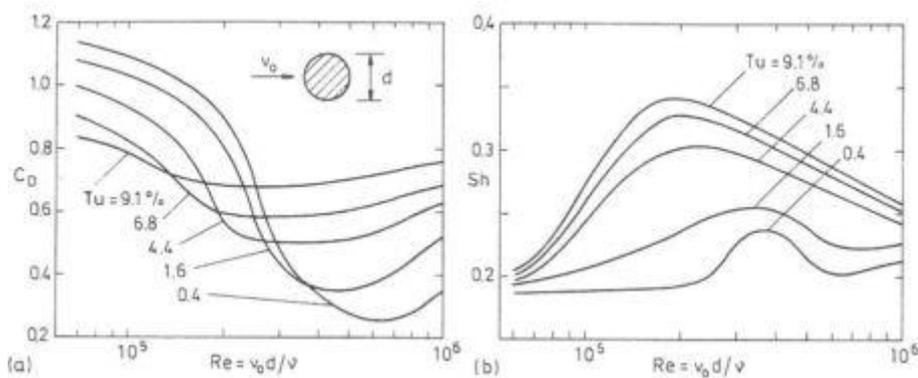


Abbildung 2. Turbulenzabhängigkeit des (a) C_w - Wertes und (b) der Strouhalzahl (Cheung & Melbourne, 1983).

2.1.3 Verbaugrad

Der Verbaugrad spielt eine wichtige Rolle, wenn es darum geht die Umströmung von Körpern in einem Rohr oder einem offenen Gerinne zu beschreiben. Er hat nicht nur Einfluss auf die Reynoldszahl des Körpers, sondern auch auf die Geschwindigkeit in dessen Einflussbereich.

Gleichung 3 zeigt einen Ansatz zur Berechnung des C_w – Wertes unter Rücksichtnahme auf den Verbaugrad. Der daraus ermittelte Wert $C_{d,BR}$ ist vom ursprünglichen C_w – Wert abhängig, als auch von einer Korrekturgröße B_R . (Gippel et al.)

$$C_{d,BR} = \alpha C_d (1 - B_R)^{-\beta} \quad [3]$$

Geht man nun wie beschrieben von einer Kontinuität und einer inkompressiblen Flüssigkeit aus, dann muss sich bei gleichbleibendem Durchfluss und zunehmender Verbauung also die Fließgeschwindigkeit erhöhen. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung im Reynoldsbereich nach oben, welche in Abbildung 3 dargestellt ist.

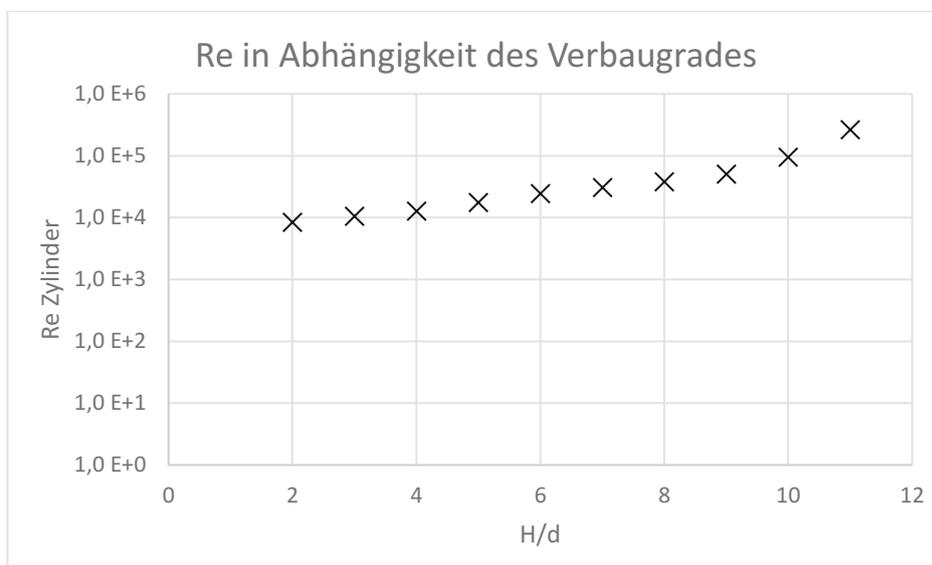


Abbildung 3: Veränderung des Reynoldsbereiches aufgrund wachsenden Verhältnisses von Durchmesser d des Zylinders und Abflusshöhe H .

2.1.4 Sohlrauheit

Durch den Einbau einer Noppenbahn, wie sie in Abbildung 4 zu sehen ist, wurde die Sohlrauheit erhöht. Die zugehörigen Abmessungen sind in Tabelle 2 angegeben.



Abbildung 4: Noppenbahn zur Vergrößerung der Sohlrauheit.

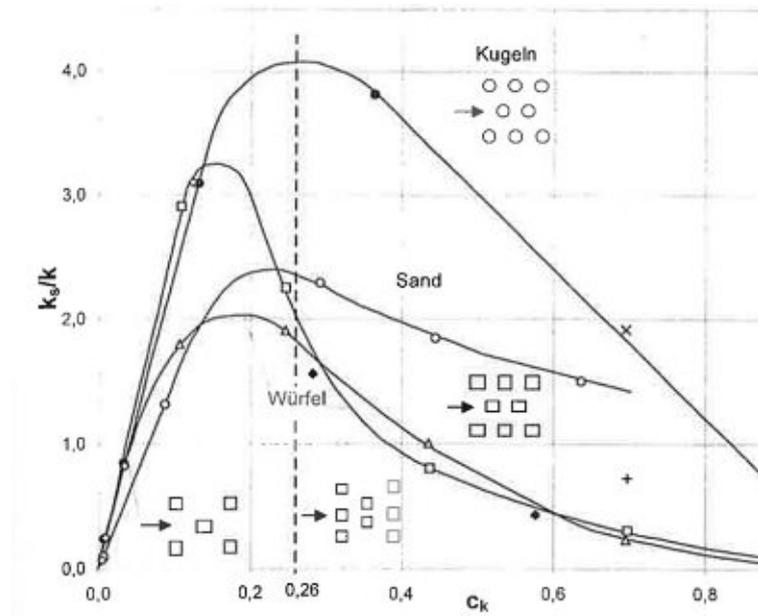


Abbildung 5: Datenzusammenstellung aus Dittrich (1998) zur Ermittlung der Sandrauheit.

Mit diesen Abmessungen lässt sich weiter ein Wert c_k bilden, Abbildung 6 zeigt wie die die Werte dafür zu ermitteln sind, N ist dabei die Anzahl an Körpern pro Laufmeter. Durch Vergleich mit den in Abbildung 5 dargestellten Auswertungen lässt sich schlussendlich die äquivalente Sandrauheit k_s ermitteln.

$$c_k = \frac{N}{A} * A_{\perp} \quad [4]$$

In Tabelle 3 sind die aus der Grafik ermittelten Werte zur äquivalenten Sandrauheit angeführt. Dadurch lässt sich schlussendlich feststellen, dass k_s zwischen 16mm und 24mm liegt und daher in weiterer Folge der Mittelwert aus den beiden Werten, also 20 mm angesetzt wurde.

Tabelle 2: Abmessungen der einzelnen Noppen und zugehörige Werte.

| | |
|--------------------|----------------------|
| H Noppe | 0,8 cm |
| B Noppe | 1,8 cm |
| Abst. Noppe | 2,5 cm |
| k= | 0,8 cm |
| A= | 6,25 cm ² |
| Alotr= | 1,22 cm ² |
| N= | 1 |
| ck= | 0,19584 |

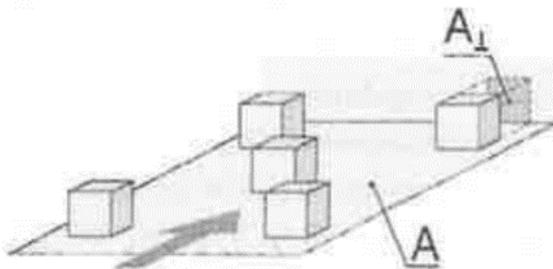


Abbildung 6: Darstellung zur Ermittlung der Flächen zur Berechnung von c_k . (Grafik Bezzola 2002)

Tabelle 3: Auswertung für verschiedene Formen von Störkörpern. Die äquivalente Sandrauheit ist der Mittelwert aus 1,6cm und 2,4cm, also 2cm.

| | Würfel/Dreieck | Würfel/Quadrat | Sand | Kugeln |
|---------|----------------|----------------|-------|--------|
| k_s/k | 2 | 3 | 2,3 | 3,9 |
| k_s | 1,6cm | 2,4cm | 1,8cm | 3,1cm |

2.1.5 Zylinderrauheit

Neben der Sohlrauheit ist auch die Rauheit des umströmten Körpers von Bedeutung, denn diese hat großen Einfluss auf den Ablösepunkt. Nicht immer gilt, dass glattere Oberflächen (wie zum Beispiel die Haut eines Fisches) gleichzeitig auch weniger Widerstand entgegen als raue Oberflächen. Versuche haben gezeigt, dass man durch das Anbringen eines Stolperdrahtes (engl. trip wire) bei kugelförmigen Körpern ein geringerer C_w – Wert erreicht werden konnte. Diesem Prinzip nach haben beispielsweise Golfbälle eine Vielzahl an Einkerbungen, welche deren Flugeigenschaften verbessern. Es kann also folglich keine pauschale Aussage darüber getroffen werden, ob und in welchem Maße eine höhere Oberflächenrauheit den C_w – Wert in einzelnen Fällen beeinflussen.

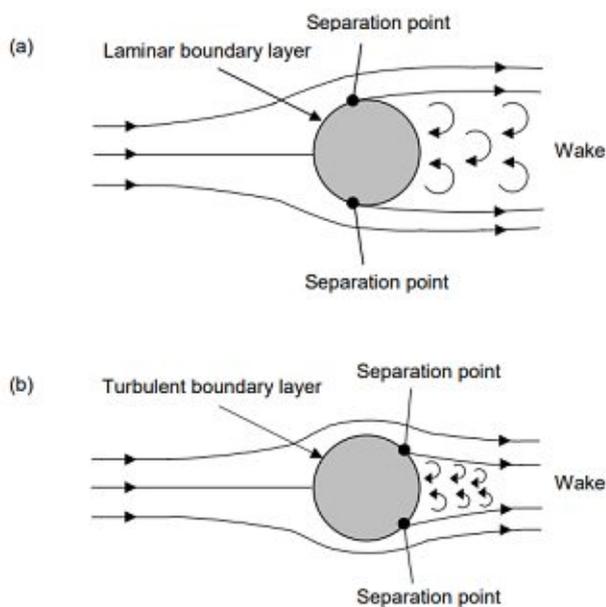


Abbildung 7: Skizze zweier Kreiszyylinder mit unterschiedlich angeordneten Ablösepunkten mit einer (a) laminaren und (b) turbulenten Grenzschicht. (Grafik Robertson, 2016)

Für nicht scharfkantige Störkörper (z.B. Würfel), wie es beispielsweise Zylinder sind, lässt sich kein fixer Ablösepunkt bestimmen. Eine größere Turbulenz fördert den Transport von sich schnell bewegender Flüssigkeit aus der freien Strömung hin zur Grenzschicht. Das wiederum ermöglicht eine längere Vorwärtsbewegung und verzögert die Trennung der Fließbereiche. Abbildung 7 zeigt die Umströmung eines Zylinders mit (a) laminarer Grenzschicht und (b) turbulenter Grenzschicht. Durch Erhöhung der Turbulenz in der Grenzschicht, beispielsweise durch eine Vergrößerung der Oberflächenrauheit, kann der Verlust im Nachlaufbereich reduziert werden und somit auch den Widerstand. (Robertson, 2016)

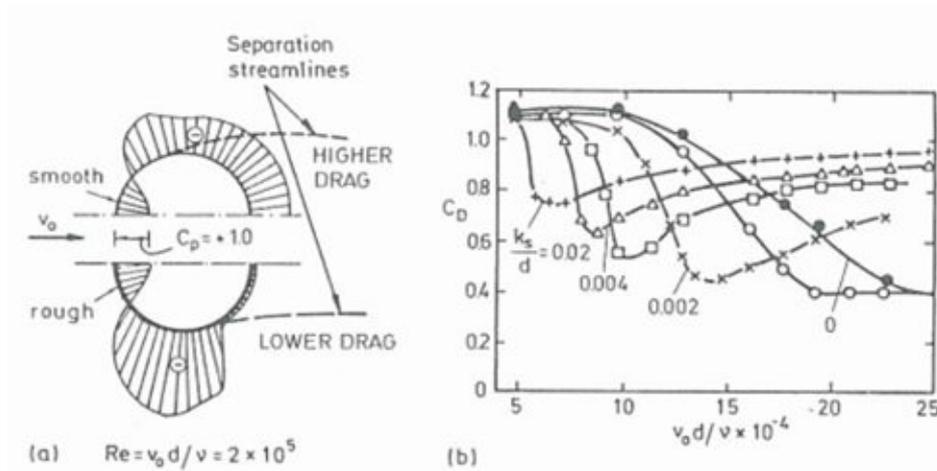


Abbildung 8: Einfluss der Zylinderrauheit auf die Druckverteilung (a) und den Widerstandskoeffizienten (b) nach Fage & Warsop (1929).

Abbildung 8 verdeutlicht, dass die Oberflächenrauheit des Zylinders jenen Punkt des Reynoldsbereiches, an dem es zu einer deutlichen Verringerung des Widerstandsbeiwertes kommt (engl. drag crisis) beeinflusst. Eine Berücksichtigung der Zylinderrauheit ist daher notwendig.

2.1.6 Wandrauheit

Neben der Sohlrauheit und der Zylinderrauheit spielt auch die Wandrauheit eine Rolle. Ähnlich dem Geschwindigkeitsprofil im Sohlbereich reduziert sich die Geschwindigkeit durch den Wandeinfluss. Abbildung 9 zeigt das Verhältnis der lokalen Geschwindigkeit u zur mittleren Geschwindigkeit V . Zusätzlich ist es abhängig von dem Seitenverhältnis, davon hängt weiters ab ob sich quer zur Strömungsrichtung Sekundärströmungen ausbilden (hier als Vektorpfeile dargestellt).

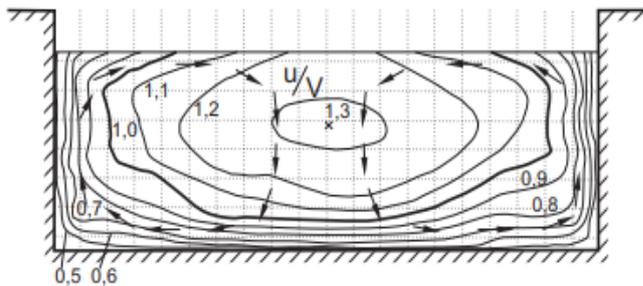


Abbildung 9: Sekundärströmungen und Isovelen u/V in geradlinigen gleichförmigen Gerinneströmungen begrenzter Breite (Grafik Jirka 2009).

2.1.7 Oberflächenwellen

Oberflächenwellen haben ebenfalls einen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert von Zylindern, vor allem, wenn diese in der Nähe der Wasseroberfläche platziert sind. Dabei ist das Verhältnis z/d ausschlaggebend, für den in Abbildung 10 dargestellten Zusammenhang beschreibt z den Abstand von der Zylindermitte zur freien Wasseroberfläche. Es zeigt sich, dass besonders bei geringer Überdeckung, oder entsprechend großem Zylinderdurchmesser der Einfluss am größten ist.

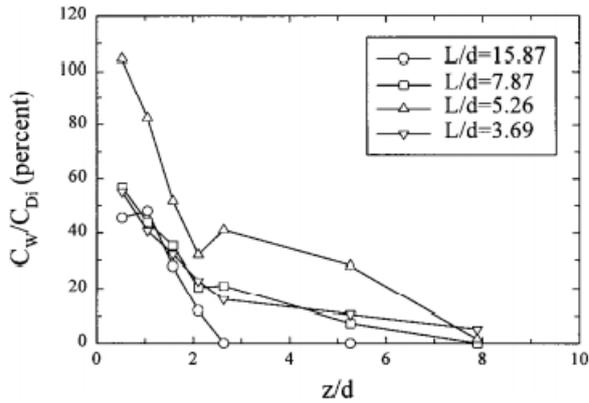


Abbildung 10: Einfluss von Oberflächenwellen auf den C_w -Wert in Abhängigkeit der Zylinderabmessungen L/d und der Einbauhöhe z/d . (Grafik Wallerstein, 2002)

2.1.8 Abstand

In Abbildung 11 ist erkennbar, welchen Einfluss das Verhältnis aus Abstand der Zylinder zu deren Durchmesser auf den C_w – Wert hat. Bei den durchgeführten Versuchen war der Abstand zueinander stets 150cm; es betrug der Durchmesser bei glatten Zylindern 11,0 cm und bei rauhen Zylindern 11,5 cm, was keiner großen Variation entspricht. Weiters muss beachtet werden, dass der Abstand der Schlitze, an denen die Messzylinder angebracht wurden, 150cm betrug. Da der Zylinder jedoch mittig an der Nut befestigt war, aber der Abstand im Diagramm sich auf die Oberfläche des Zylindermantels bezieht, muss einmal der Zylinderdurchmesser vom Abstand abgezogen werden. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von

$$\frac{150 - 11,5}{11,5} \cong 12$$

Zdravkovich beschreibt in Abbildung 12 welchen Einfluss das Verhältnis S/D auf den Widerstandsbeiwert hat. Für den Reynoldsbereich $5 \cdot 10^4$ etwa liegt bei gegebenen Abstandsverhältnis eine Reduktion des C_w – Wertes vom oberstromigen Zylinder zum Dahinterliegenden um rund 50% vor.

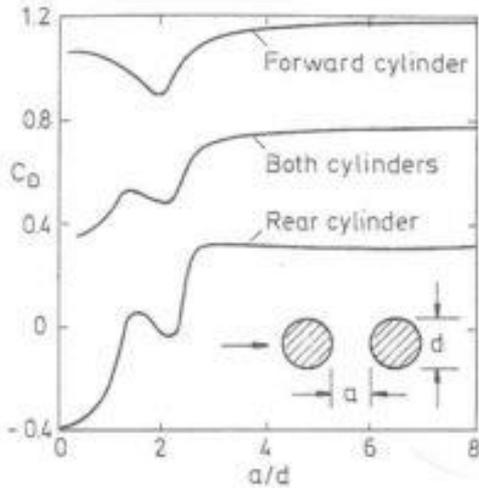


Abbildung 11: Einfluss von Abstand und Durchmesser für $Re = 10^5$ nach Brun (1963).

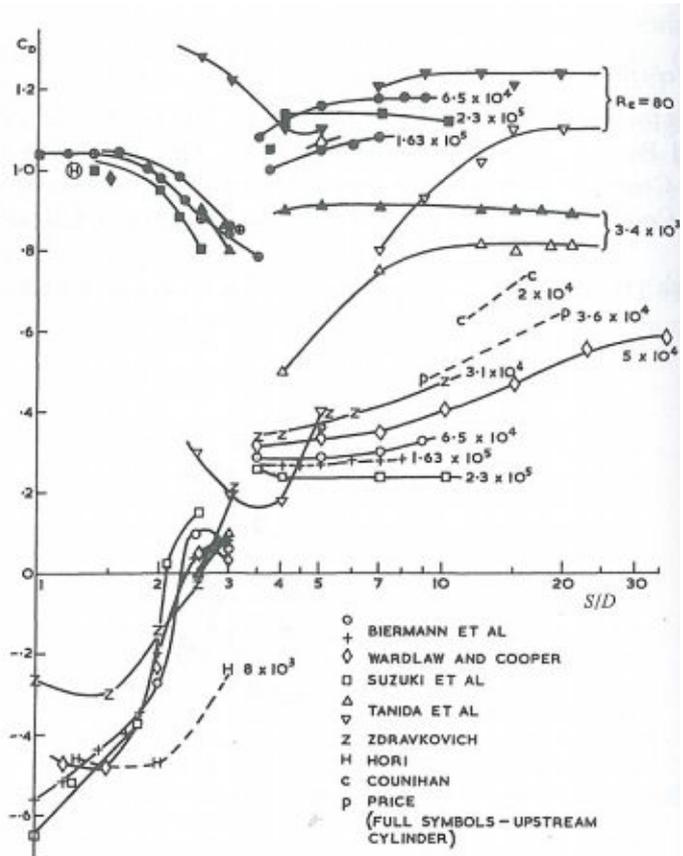


Abbildung 12: Einfluss des Abstands für zwei hintereinander liegende Zylinder. S beschreibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder, D ist der Zylinderdurchmesser (Zdravkovich).

Der Anstieg des C_w – Wert des hinteren Zylinders mit zunehmendem Abstand bzw. Verhältnis aus Abstand zu Durchmesser (schließlich bleibt der Durchmesser konstant, also steigt auch das Verhältnis bei zunehmendem Abstand) ist dadurch gegeben, dass sich nach einer gewissen Distanz allmählich wieder ein normales Anströmprofil einstellt. Dieses liegt auch bei der Anströmung des ersten Zylinders vor, folglich müssen die C_w – Werte einander ähnlich sein.

2.1.9 Zylinderzahl bei Reihenanordnung

Die Zylinderzahl beschreibt die individuelle Position bei in Reihe geschalteten Zylindern. Durch Änderungen des Geschwindigkeitsprofils in der Anströmung wie in Kapitel 3.5 beschrieben ergibt sich ein Einfluss auf die resultierende Kraft.

2.1.10 Zylinderabmessungen

Die Abmessungen der Zylinder spielen hinsichtlich deren Widerstandsbeiwertes eine wichtige Rolle, hierfür wird als entscheidende Größe das Verhältnis von Zylinderlänge zu Zylinderdurchmesser gebildet.

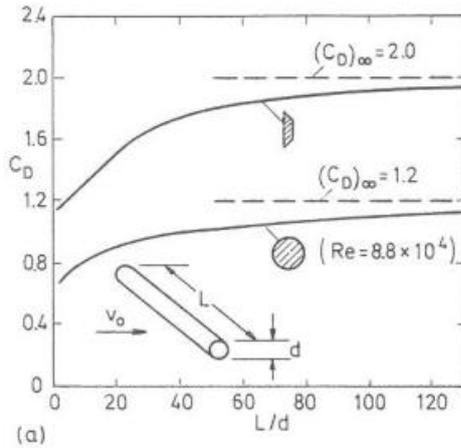


Abbildung 13: Einfluss des Seitenverhältnisses auf den C_w -Wert nach Prandtl et al. (1923).

Prandtl et al. stellten 1923 die Behauptung auf, dass für ein zunehmendes Verhältnis L/d der C_w – Wert gegen einen fixen Wert von 1,2 konvergiert (Abbildung 13). Wichtig ist vor allem auch, dass sich ihnen zufolge im Bereich $L/d < 40$ der Widerstandsbeiwert bei wachsendem L/d besonders schnell erhöht, als Konsequenz davon lassen sich für diese Zylinderabmessungen kleinere C_w – Werte erwarten.

3. Laborversuche

3.1 Versuchsrinne und Messaufbau

In weiterer Folge sind Bezeichnungen für Zylinder bzw. die entsprechenden Durchflüsse in Beschreibungen und Diagrammen wie in Tabelle 4 dargestellt zu verstehen.

Tabelle 4: Versuchskennung

| | |
|-----------|--|
| SS | Glatte Sohle und glatter Zylindermantel (Smooth/Smooth) |
| SR | Glatte Sohle und rauher Zylindermantel (Smooth/Rough) |
| RS | Raue Sohle und glatter Zylindermantel (Rough/Smooth) |
| RR | Raue Sohle und rauher Zylindermantel (Rough/Rough) |
| - | Dazu die entsprechende Durchflussmenge, Angabe in l/s |

Zur besseren Übersicht sind die wesentlichen Merkmale des Aufbaus im Labor in Tabelle 5 zusammengefasst:

Tabelle 5: Parameter der Versuche.

| Setup | Fließbedingungen Versuchsrinne | | | | | | Fließbedingungen Zylinder | | | |
|--------------|--------------------------------|--------|-----------|---------|------|---------|---------------------------|---------|---------|-------------|
| | Q (l/s) | h (cm) | UQ (cm/s) | Reh | Frh | ks (mm) | D (cm) | ReD | ks (mm) | Wellen [mm] |
| SS20 | 36 | 45 | 16,7 | 7,5E+05 | 0,08 | 2 | 11,0 | 1,8E+04 | 0,001 | 0 |
| SR20 | 36 | 45 | 16,7 | 7,5E+05 | 0,08 | 2 | 11,5 | 1,9E+04 | 2,00 | 0 |
| RS20 | 36 | 45 | 16,7 | 7,5E+05 | 0,08 | 20 | 11,0 | 1,8E+04 | 0,001 | 0 |
| RR20 | 36 | 45 | 16,7 | 7,5E+05 | 0,08 | 2 | 11,5 | 1,9E+04 | 2,00 | 0 |
| RS30 | 68 | 45 | 30,1 | 1,4E+06 | 0,14 | 20 | 11,0 | 3,3E+04 | 0,001 | 0 |
| RR30 | 68 | 45 | 30,1 | 1,4E+06 | 0,14 | 20 | 11,5 | 3,5E+04 | 2,00 | 0 |
| SS39 | 90 | 45 | 41,7 | 1,9E+06 | 0,20 | 2 | 11,0 | 4,6E+04 | 0,001 | 0 |
| SR39 | 90 | 45 | 41,7 | 1,9E+06 | 0,20 | 2 | 11,5 | 4,8E+04 | 2,00 | 0 |
| RS39 | 90 | 45 | 41,7 | 1,9E+06 | 0,20 | 20 | 11,0 | 4,6E+04 | 0,001 | 0 |
| RR39 | 90 | 45 | 41,7 | 1,9E+06 | 0,20 | 20 | 11,5 | 4,8E+04 | 2,00 | 0 |
| RS50 | 116 | 45 | 53,2 | 2,4E+06 | 0,25 | 20 | 11,0 | 5,9E+04 | 0,001 | 0 |
| RR50 | 116 | 45 | 53,2 | 2,4E+06 | 0,25 | 20 | 11,5 | 6,1E+04 | 2,00 | 0 |
| SS75 | 148 | 45 | 67,6 | 3,0E+06 | 0,32 | 2 | 11,0 | 7,4E+04 | 0,001 | 16 |
| SR75 | 148 | 45 | 67,6 | 3,0E+06 | 0,32 | 2 | 11,5 | 7,8E+04 | 2,00 | 15 |
| RS75 | 148 | 45 | 67,6 | 3,0E+06 | 0,32 | 20 | 11,0 | 7,4E+04 | 0,001 | 19 |
| RR75 | 148 | 45 | 67,6 | 3,0E+06 | 0,32 | 20 | 11,5 | 7,8E+04 | 2,00 | 17 |
| RS100 | 198 | 45 | 90,3 | 4,1E+06 | 0,43 | 20 | 11,0 | 9,9E+04 | 0,001 | 40 |
| RR100 | 198 | 45 | 90,3 | 4,1E+06 | 0,43 | 20 | 11,5 | 1,0E+05 | 2,00 | 38 |

Die 5 Zylinder wurden entlang zweier Nuten, eine auf der Rückseite der Rinne, welche aus Messing gefertigt war, und die andere auf der verglasten Seite in die Rinne eingebracht, und so gegen jegliches Verrutschen gesichert.

In Abbildung 15 ist ein geöffneter Zylinder abgebildet, wie Abbildung 14 zusätzlich zeigt, wurde darauf geachtet, dass keine Kraftübertragung infolge der Verspannung vom Messzylinder auf die Wände übertragen werden konnte. Nur so war sichergestellt, dass auch die gesamte Kraftwirkung vom Messzylinder erfasst wird.

Schnitt Messzylinder

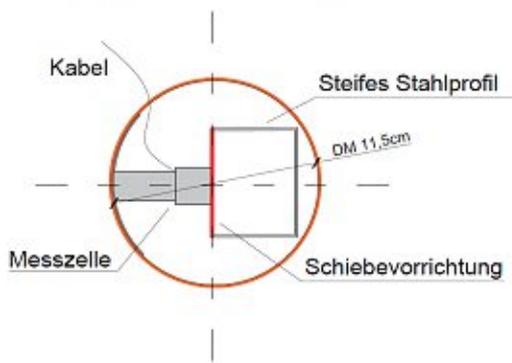


Abbildung 14: Schnitt durch einen Messzylinder mit rauem Mantel (d=11,5cm).



Abbildung 15: Innenbereich eines Messzylinders mit Schiebevorrichtung.

Die Zylinder hatten einen Durchmesser von 11cm im glatten Zustand bzw. 11,5cm wenn sie eine zusätzliche rauhe Ummantelung bedeckten, sowie eine Länge von 50cm. Bei allen Versuchen waren sie genau auf halber Wassertiefe fixiert, sodass der Mittelpunkt auf einer Höhe von 22,5 cm über der Sohle war. In Abbildung 16 ist die geflutete Versuchsrinne mit eingebauten Zylindern zu sehen.

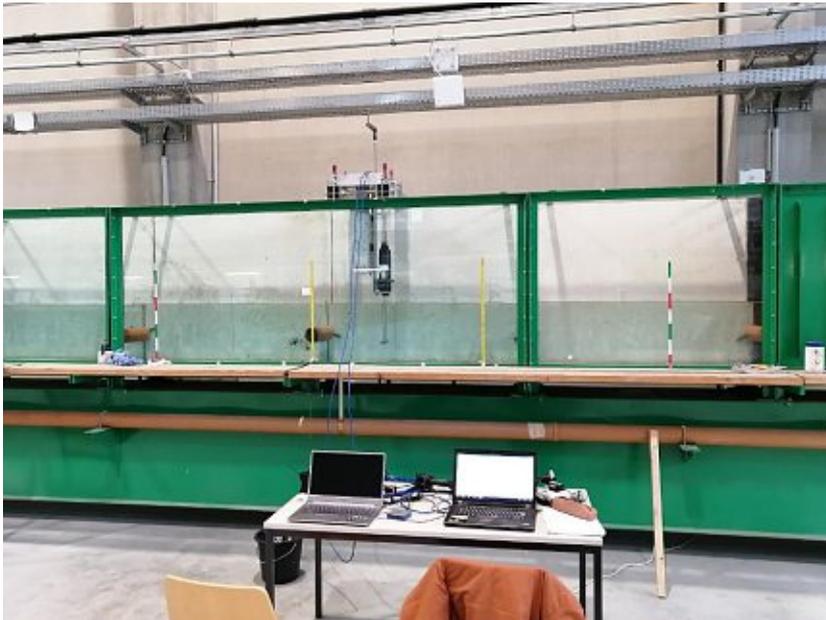


Abbildung 16: Übersicht von der Versuchsrinne und dem Arbeitsplatz. Zu sehen sind die eingebauten Zylinder und das Geschwindigkeitsmessgerät.

Durch das Erfordernis einer Nut waren die Abstände auf 1,5m limitiert (Abbildung 17), da ansonsten keine weiteren Schlitze in der Wand vorhanden waren. Bei jenen Zylindern, welche eingebaut waren, aber keine Messelektronik enthielten, war man nicht auf eine Befestigung in einer Nut angewiesen. So konnte man hier beliebige Abstände einstellen und die Zylinder mithilfe von schmalen Keilen, welche kaum Einfluss auf die Strömung hatten, anbringen.

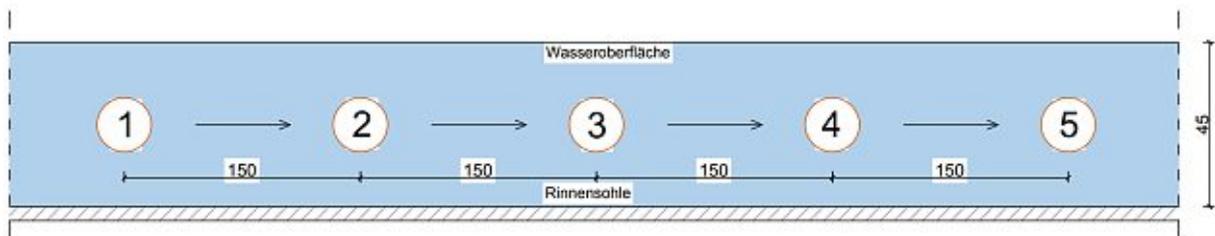


Abbildung 17: Anzahl und Abstände der Zylinder. Längenangaben in cm.

In Abbildung 18 ist ein Schnitt durch die Versuchsrinne dargestellt, in diesem Fall ist ein rauher Zylinder mit einem Durchmesser von 11,5cm eingebaut. Die konstante Abflusstiefe von 45cm wurde, wenn notwendig, iterativ durch Neigung der Versuchsrinne hergestellt.

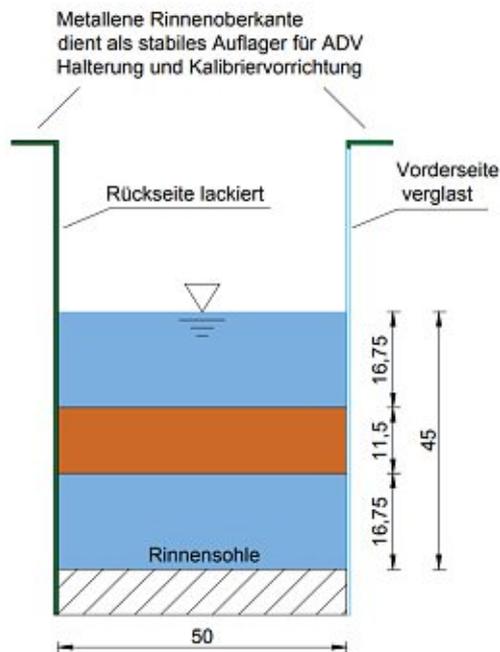


Abbildung 18: Schnitt durch die Versuchsrinne.

3.2 Wahl der Abstände und Durchmesser

Während man in der Praxis im Tiefland mit Geschwindigkeiten von etwa 0,3- 1,0m/s rechnen kann, muss im alpinen Bereich mit bis zu 3,0m/s gerechnet werden. Die erhöhte Geschwindigkeit ist in der Regel auf das steilere Sohlgefälle, als auch auf den Untergrund, welcher meist frei von Wasserpflanzen ist, zurückzuführen.

Fasst man nun diese Beobachtungen in Tabelle 6 zusammen, so lässt sich daraus ein Reynoldsbereich definieren, welchen es bei den Versuchen abzubilden galt.

Tabelle 6: Angenommene Geschwindigkeiten und Durchmesser.

| | Tiefland | Hochland | Alpin |
|-----------|----------|----------|-------|
| v [m/s] | 0,1 | 1 | 3 |
| d [m] | 1 | 1 | 0,1 |

Die Reynoldszahl berechnet sich auch dem Verhältnis aus Geschwindigkeit mal Durchmesser zu der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit, also

$$Re_d = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\nu} \quad [4]$$

Da es ausschließlich um Gewässer geht, wurde an Stelle von ν die Viskosität von Wasser eingesetzt, welche $1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beträgt, und an Stelle von ρ ebenso die Dicht von Wasser, 1 kg/dm^3 .

Als Variablen bleiben schließlich nur noch die Geschwindigkeit u und der charakteristische Durchmesser d . Nun lässt sich in weiterer Folge eine Matrix erstellen, welche den relevanten Reynoldsbereich für die Versuche zeigt.

$$Re_d = 1 \cdot 10^6 \cdot \begin{pmatrix} 0,1 \\ 1,0 \\ 3,0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,1 \\ 1,0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 10^4 & 1 \cdot 10^5 \\ 1 \cdot 10^5 & 1 \cdot 10^6 \\ 3 \cdot 10^5 & 3 \cdot 10^6 \end{pmatrix}$$

Dabei aber ist zu beachten, dass im alpinen Raum Stammdurchmesser von 1m eine Seltenheit sind, zusammen mit einer Geschwindigkeit von 3,0m/s stellt dies einen Extremfall dar und ist daher als Obergrenze für den ausgewiesenen Reynoldsbereich zu verstehen.

Der gewünschte Reynoldsbereich ist bekannt; ebenfalls lassen sich aus den maximalen Kapazitäten der Rinne bzw. der Leistung der Pumpen weitere Randbedingungen ableiten. So war seitens der Pumpe der Durchfluss auf 30 bis 250l/s begrenzt. Um Immer die gleiche Wasserspiegellage bei variablem Durchsatz einzustellen, musste mithilfe eines Schiebers am Ende der Rinne der Wasserstand reguliert werden. Dabei war es wichtig darauf zu achten, dass sich infolge des Schiebers nicht eine verändertes Anströmprofil ergab. In Abbildung 19 ist zu sehen, welche Auswirkungen ein hochgefahrener Schieber bei verhältnismäßig geringer Versuchsrinnenlänge haben kann.

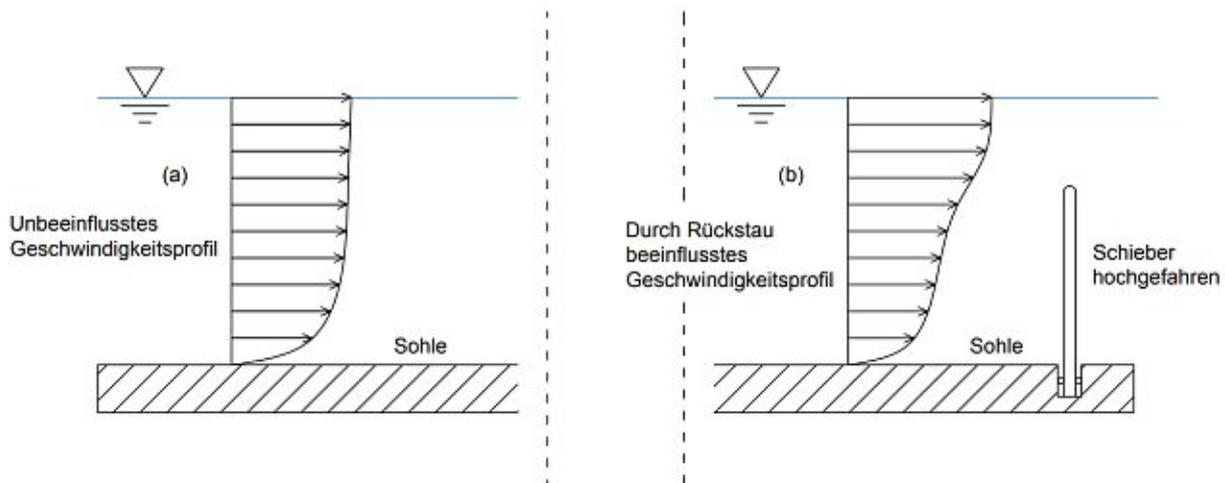


Abbildung 19: Unbeeinflusstes Geschwindigkeitsprofil (a) und Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils durch einen Schieber (b).

Um solche Einflüsse zu verhindern, wurden bereits im Vorfeld Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden mit einem Messgerät Geschwindigkeiten in verschiedenen Höhen und an unterschiedlichen Schnitten innerhalb der Versuchsrinne ermittelt und analysiert. Als begleitende Kontrolle kam auch während den Kraftmessungen ein Geschwindigkeitsmessgerät zum Einsatz, wie in Abbildung 20 zu sehen ist. Dadurch wird auch eine bessere Grundlage für die Auswertung geschaffen, Ungleichförmigkeiten können dadurch besser erkannt werden.



Abbildung 20: Zylinder mit Geschwindigkeitsmessgerät und Abstandhalter.

Daraus geht hervor, dass nicht ein beliebig geringer Durchfluss mit einem Schieber auf eine Wasserspiegellage von 0,45m eingestaut werden kann, ohne dabei eine maßgebliche Veränderung im Anströmprofil hervorzurufen.

3.3 Zulaufbedingungen

Der Zulauf der Versuchsrinne musste adaptiert werden, um eine gleichmäßige Wasserzugabe und ruhige Fließbedingungen sicherzustellen. Anhand von vorlaufenden Versuchen zu den Bedingungen in der Versuchsrinne wurde festgestellt, dass es zu folgenden Problemen kam:

- Erhöhter Turbulenzgrad, welchen man sich nicht in einer freien Strömung erwarten würde, zusätzlich wurde das Geschwindigkeitsprofil durch den Zulauf beeinflusst.
- Keine ausreichend glatte Oberfläche.
- Eine Ungleichmäßige Wasserzugabe.

Um diesen ungewünschten Nebeneffekten gerecht zu werden wurden im Einlaufbereich verschiedene Zusatzeinbauten getestet und bei entsprechender Verbesserung auch eingebaut. Diese Einbauten sind in Abbildung 21 zu sehen.

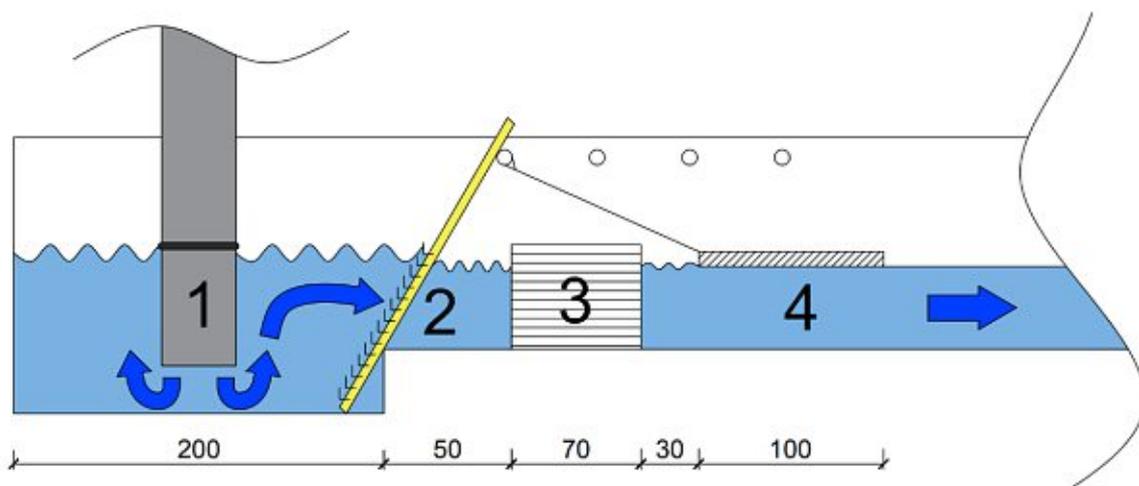


Abbildung 21: Einlaufbedingungen mit entsprechenden Anpassungen: 1. Verlängerungsstutzen, 2. Lamellenblech, 3. Gleichrichter, 4. Hartschaumplatte. Längenangaben in cm.

Ergänzend dazu sind in Abbildung 22 die Abmessungen des Einlaufbauwerks dargestellt.

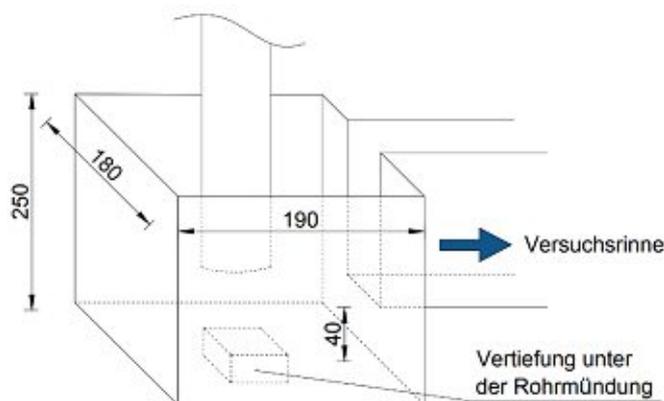


Abbildung 22: Einlaufbauwerk im Detail. Längenangaben in cm.

Unter der Rohrmündung befindet sich eine Vertiefung, deren Abmessungen nicht genau bestimmt werden konnten, jedoch betrug die Tiefe mindestens 50cm.

Zuerst wurde das Rohr, durch welches das Wasser in die Versuchsrinne gelangt, mithilfe eines Verlängerungsstutzens bis unter die Wasseroberfläche verlängert. Zusätzlich wurde ein um 45° geneigtes Lamellenblech (Abbildung 25) sowie ein Gleichrichter (Abbildung 24) eingebaut. Zuallerletzt wurde noch eine Platte aus Hartschaum (Extrudiertes Polysterol) angehängt, welche zur Oberflächenglättung diente. Die Messungen sollten unter Normalabfluss stattfinden, also jenem Abfluss, welcher sich über längere Fließstrecken ohne Änderung einstellt.



Abbildung 23: Zulaufbereich, von links nach rechts sind zu sehen: Die Hartschaumplatte, der Gleichrichter und das Lamellenblech.

Zur Kontrolle des Wasserstandes wurde auf der verglasten Seite der Versuchsrinne eine Markierung dafür angebracht und die Positionen des Schiebers dokumentiert. So konnte sichergestellt werden, dass die gewünschte Wassertiefe auch tatsächlich korrekt eingestellt war.

Abbildung 23 zeigt eine Aufnahme vom Einlaufbereich, gut darauf zu erkennen ist die zunehmende Beruhigung der Wasseroberfläche nach dem Lamellenblech und dem Gleichrichter.

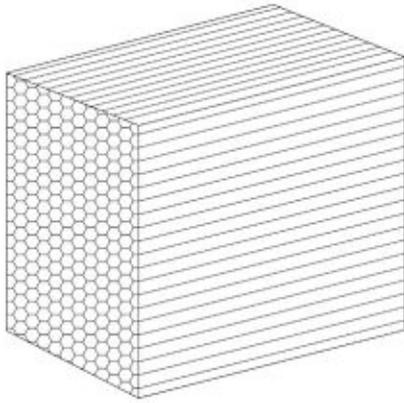


Abbildung 24: Detail Gleichrichter. Die im Schnitt dargestellten Röhren sind hexagonal und haben eine Breite von etwa 5cm.

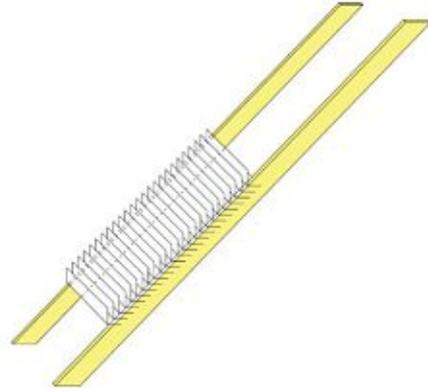


Abbildung 25: Detail Lamellenblech. Lamellen ausgebildet als L- Winkel, überlappende Anordnung. Die Breite wurde den Abmessungen der Versuchsrinne angepasst.

In Summe wurden also für die in dieser Arbeit gefahrenen Versuche folgende Einbauten im Zulauf verwendet:

1. Verlängerungsstutzen Einlaufrohr
2. Lamellenblech
3. Gleichrichter
4. Hartschaumplatte (Extrudiertes Polystyrol) zur Oberflächenglättung

3.4 Kraftmessungen

3.4.1 Kalibriermethoden

Um eine ausreichend genaue Kalibriermethode zu finden, wurden unterschiedliche Methoden zur Kraftaufbringung, sowie zur weiteren Erstellung einer Kalibriergerade getestet. Es wurden Gewichtskräfte, Federkräfte und Lastaufbringung mittels eines Schraubstockes untersucht.

3.4.1.1 Kalibrierung mittels Gewichtskraft

Im Falle der Gewichte wurde so wie Abbildung 26 zeigt mit einer Schnur über Umlenkrollen eine Gewichtskraft auf den Zylinder aufgebracht. Wichtig war dabei, dass die Schnur genau mittig am Zylinder befestigt war, da ansonsten eine Kraftkomponente, welche nicht in der Horizontale wirkt, entsteht und diese vom Kraftmesser nicht erfasst wird. Es wurden mehrere Gewichte in folgender Reihenfolge angebracht, dabei wurde die Last jedes Mal verdoppelt: Zuerst 250g, dann 500g, 1000g und schließlich 2000g.

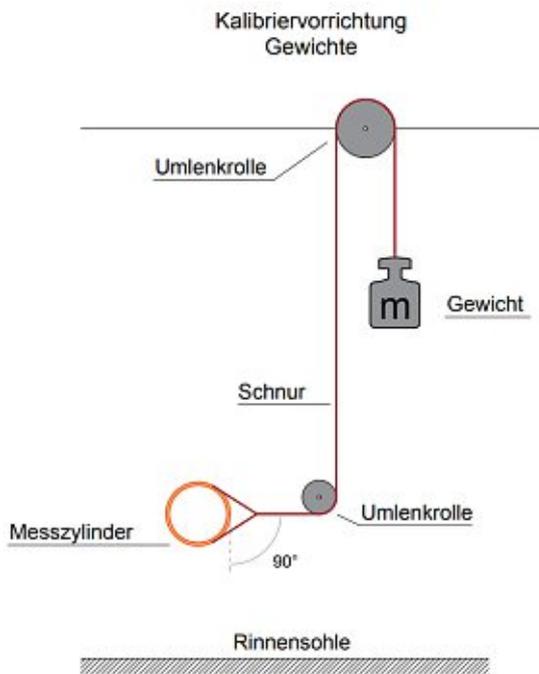


Abbildung 26: Gewichtskraft zur Kalibrierung.

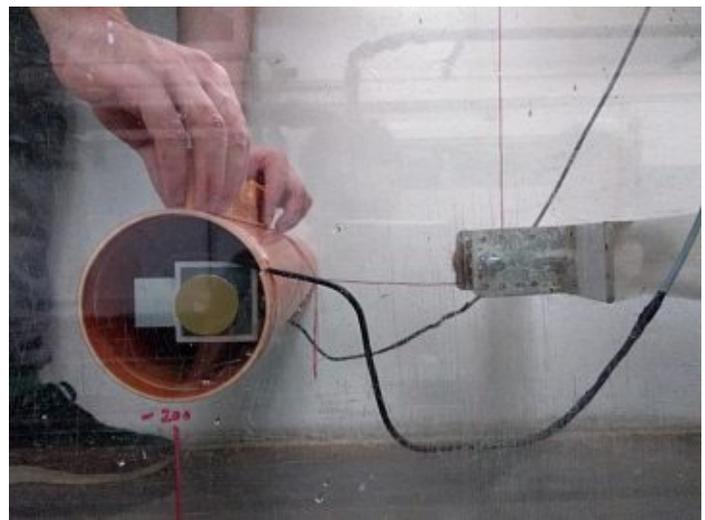


Abbildung 27: Mit einer Wasserwaage wird die Einbaurichtigkeit bestätigt. Zu sehen ist außerdem der Faden, über welchen die Gewichtskraft auf den Zylinder übertragen wird.

So konnte anschließend eine Kalibriergerade auf Grundlage von 4 Punkten ermittelt werden. Das Problem bei dieser Methode war aber, dass der Kalibriervorgang ausschließlich im Trockenen erfolgen konnte. Zusätzlich gestaltete sich das Aufbringen der Gewichte als mühsam und zeitkonsumierend. Der ausschlaggebende Nachteil aber war, dass eine Kalibriergerade mit nur 4 Punkten erstellt werden musste, was bei den Auswertungen zu Ungenauigkeiten führen kann.

Dieser Prozess gestaltete sich auch deshalb als mühsam, weil nicht nur die richtige Lage des Messzylinders kontrolliert werden musste, sondern auch von den Verbindungsschnüren, sowie den Umlenkrollen. In Abbildung 27 ist eine Kontrolle mithilfe einer Wasserwaage zu sehen. Hier wird gerade festgestellt, ob der Zylinder beim Einbau eine Schrägstellung erfahren hat.

3.4.1.2 Federkraft

Bei der Kalibrierung mittels Federn wurde anders als bei den Gewichten nicht mit Gewichtskräften, sondern mit Federkräften gearbeitet. Es standen 5 verschiedene Federn mit unterschiedlichen Steifigkeiten zur Verfügung. Der Aufbau hierfür ist in Abbildung 28 dargestellt.

Von einer Plattform, welche auf der Oberkante der Versuchsrinne montiert war, konnte man bei laufendem Betrieb die Federn auf die Zylinder aufbringen. Da der Abstand zwischen den Zylindern konstant gehalten wurde, konnte eine Vorrichtung mit fixer Länge eingebracht werden. Dazu wurde eine Feder zwischen dem zu kalibrierenden Zylinder und einem danebenliegenden Zylinder an einer Schnur gespannt. Der Federweg war dabei immer der Gleiche; nämlich 4cm. Dadurch dass man aber verschiedene Federn mit unterschiedlichen Steifigkeiten einsetzen konnte, kam man zu mehreren Laststufen und folglich auch Punkten auf der Kalibriergerade.

Großer Vorteil bei dieser Methode gegenüber jener mit den Gewichten war, dass der Kalibriervorgang auch möglich war, während die Versuchsrinne geflutet war.

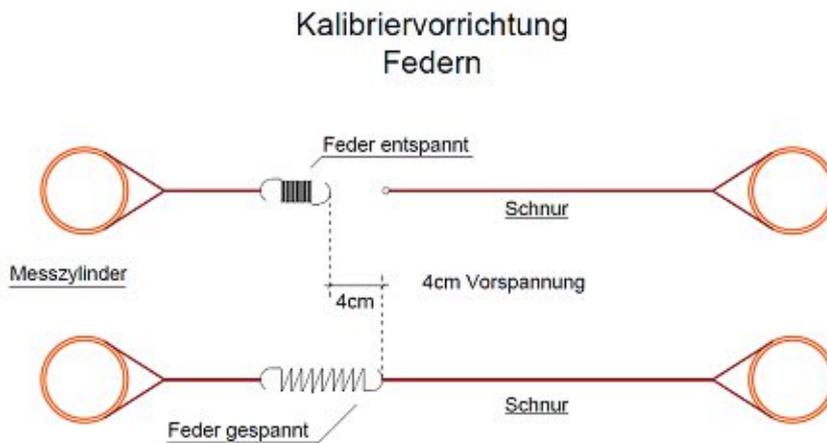


Abbildung 28: Kalibrieren durch Aufbringen von Federkräften.

3.4.1.3 Kraftaufbringung mittels Schraubstocks

Abbildung 29 zeigt die Kalibriervorrichtung als Ganzes bzw. eine Detailansicht an der Unterseite, an der die Kraftübertragung auf die Messzellen sichtbar ist.



Abbildung 29 (a) Ansicht des Kalibrierbaus und (b) Detailansicht der Messzellen.

Zum Kalibrieren der Zylinder wurde manuell am Schraubstock gedreht. Dabei war der Zeitpunkt und die Anzahl der Umdrehungen nicht ausschlaggebend, sondern nur eine klar erkennbare Trennung zwischen den jeweiligen Laststufen. Die Dehnmessstreifen des Kalibriergerätes zeichneten unabhängig jene Kraft auf, welche über den Verbindungsstab auf den entsprechenden Zylinder wirkte. Die Kraft auf den Zylinder wurde auf dem darin verbauten Dehnmessstreifen ebenfalls gemessen, das Messprogramm zeichnete eine entsprechende Änderung in der Spannung auf. Eben diese musste mit den vom Kalibriergerät gemessenen Kräften gleichgesetzt werden, einer der beiden Dehnmessstreifen im Kalibriergerät diente der laufenden Kontrolle.

In Abbildung 30 ist eine Skizze der Kalibriervorrichtung angeführt, während den Messungen wurde sie aus dem Wasser gezogen, um keinen Einfluss auf die Strömung zu haben.

Kalibriervorrichtung

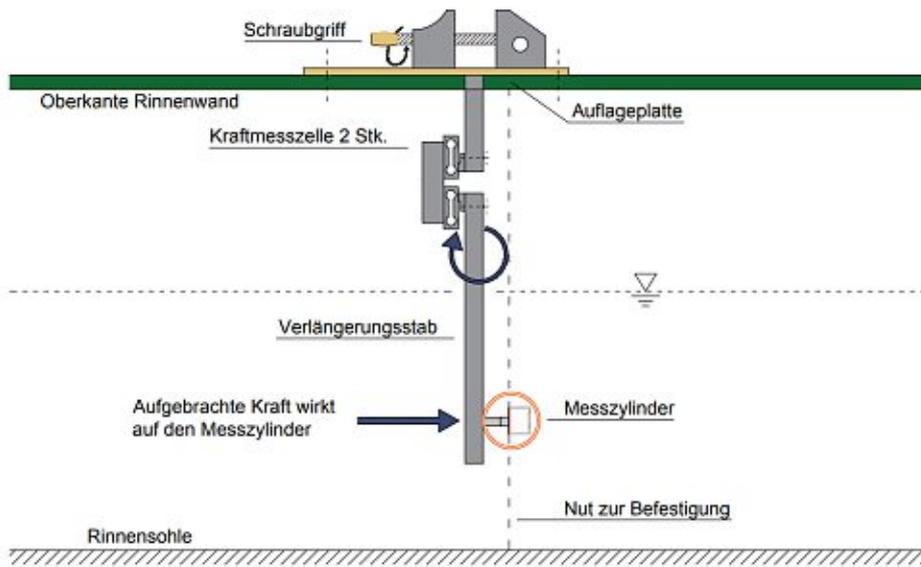


Abbildung 30: Kalibriervorrichtung.

3.4.2 Einflüsse beim Kalibriervorgang

Über Umwege musste mit teils erheblichem Zeitverlust festgestellt werden, dass anfangs nicht jeder Kalibriervorgang einwandfrei funktioniert hatte. Dabei zeichneten sich mehrere Einflussfaktoren ab: Die Messrinne war an bestimmten Stellen auf von außen einwirkenden Bewegungen anfällig. Der Zugang zur Rinne durfte also während den Messungen als auch während des Kalibriervorgangs nicht betreten werden.

Zusätzlich waren die Dehnmessstreifen auch temperaturempfindlich. Da aus einer Erwärmung bzw. einer Abkühlung des DMS eine geringe Längenänderung hervorgeht, musste die Rinne zeitgerecht geflutet und die Messzylinder damit unter Wasser gesetzt werden. Nach etwa 10 Minuten passte sich die Temperatur im Zylinder so gut an die Wassertemperatur an, dass alle daraus resultierenden Spannungsänderungen beseitigt werden konnten.

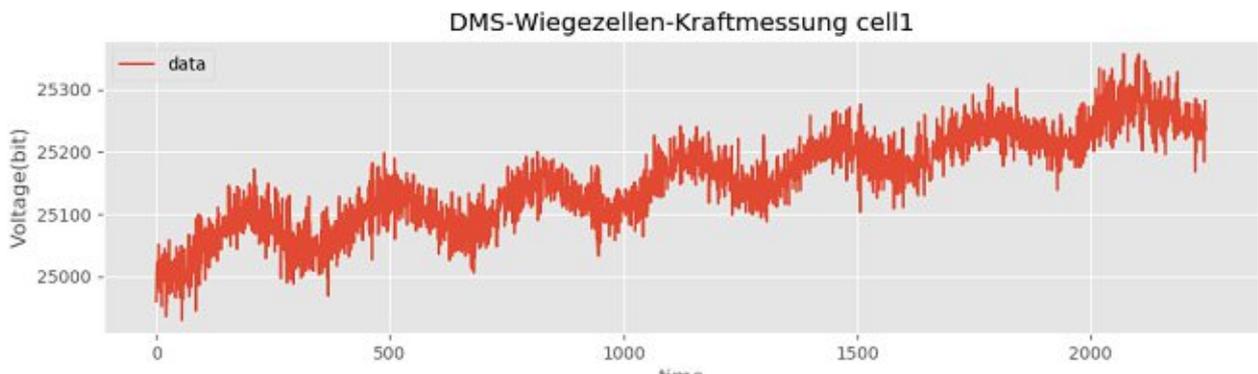


Abbildung 31: Spannungsänderung zufolge von Temperatur und stehender Welle bei geschlossenem Schieber.

Da der Kalibriervorgang ausschließlich im ruhenden Wasser durchgeführt werden konnte, musste dazu das Schütz kurz vor dem Ausfluss am Ende der Versuchsrinne geschlossen werden, um eine Fließbewegung des Wassers in der Rinne zu unterbinden. Bei zu schnellem Schließen des Schützes jedoch zeichnete sich eine stehende Welle entlang der Achse der Versuchsrinne ab. In Abbildung 31 ist ein Messvorgang zu sehen,

welcher ohne Aufbringen von äußeren Lasten erfolgte, dementsprechend sollte keine Änderung im Diagramm zu sehen sein. Gut ersichtlich ist also die Welle, welche sich glätten musste, um einen ungestörten Kalibriervorgang zu ermöglichen. Ebenso zu sehen ist jener Anstieg im Diagramm, welcher auf die Temperaturänderung im Messzylinder zurückzuführen ist.



Abbildung 32: Versuchsaufbau im Trockenen.

Um eine erfolgreiche Kalibrierung durchführen zu können, musste also der entsprechende Versuchsaufbau vollständig im Trockenen aufgebaut werden, wie in Abbildung 32 zu sehen ist. Anschließend wurde die Rinne geflutet und das Schütz langsam hochgefahren. Die nächsten 10 Minuten wurden genutzt, um die Auswertungssoftware zu starten, während in der Rinne einerseits die aus dem Schließen des Schiebers resultierende Welle abklingen konnte, als auch die Dehnmessstreifen an die Wassertemperatur angepasst werden konnten.

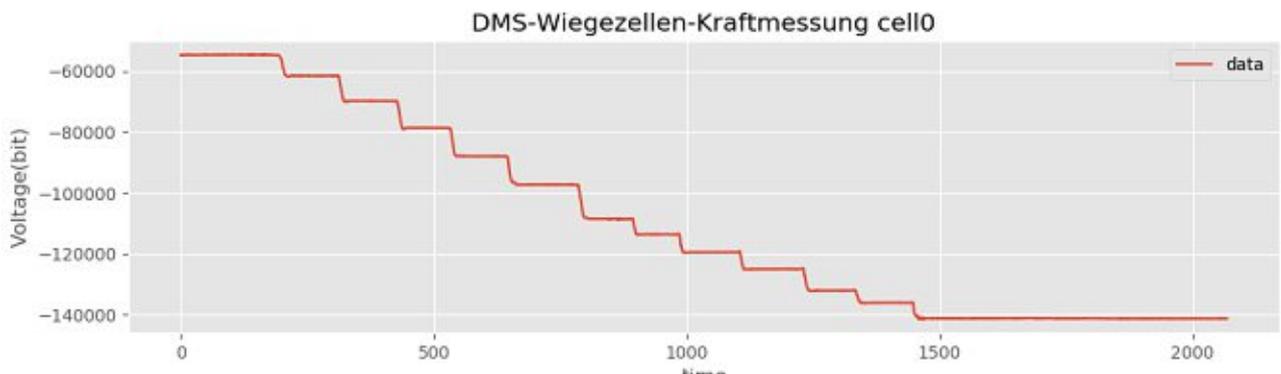


Abbildung 33: Spannungsdiagramm bei erfolgreichem Kalibriervorgang.

In Abbildung 33 ist das Spannungsdiagramm, wie es von der Auswertungssoftware bei einem typischen Kalibriervorgang angezeigt wurde zu sehen. Gut erkennbar sind die unterschiedlichen Laststufen, welche beim Kalibrieren auf den Messzylinder aufgebracht wurden. Jede Stufe kommt dabei einer Erhöhung der Kraft gleich, die durch Umdrehungen eingestellt wurde. Um einen Aussagekräftigen Mittelwert über jede Lastperiode bilden zu können, musste die entsprechende Belastung für einige Sekunden gehalten werden.

Zur Kontrolle, ob ein Kalibriervorgang auch tatsächlich als erfolgreich angesehen werden konnte, war es notwendig, eine Abschätzung über die Größe und den Einfluss eines möglichen Fehlers vorzunehmen.

Dadurch, dass im Kalibriergerät zwei Messstreifen verbaut waren, konnte man bei jedem Kalibriervorgang auch zwischen zwei Kalibriergeraden wählen. Es wurden die Punkte durch eine Ausgleichsgerade miteinander verbunden und in weiterer Folge die Parameter k und d der Geradengleichung bestimmt, wobei k die Steigung darstellt und d den Schnittpunkt mit der Ordinate.

$$y = k * x + d_g \quad [5]$$

So ließen sich Spannungswerte aus den Dehnmessstreifen der Messzylinder in eine entsprechende Kraft umrechnen. Zum Bestimmtheitsmaß, welches in Abbildung 34 gemeinsam mit der entsprechenden Kalibriergerade angeführt ist, lässt sich folgendes sagen:

Um eine Ausgleichsgerade können sich die ursprünglichen Daten eng gruppieren oder weit streuen. Der Geradengleichung lässt sich nicht ansehen, wie eng Daten und Gerade miteinander zusammenhängen (korrelieren).

Der berechnete Wert, der (Paersonsche) Korrelationskoeffizient R , liegt immer zwischen -1 und $+1$. Bei $R=1$ liegen alle Punkte auf einer Geraden und die Steigung ist positiv.

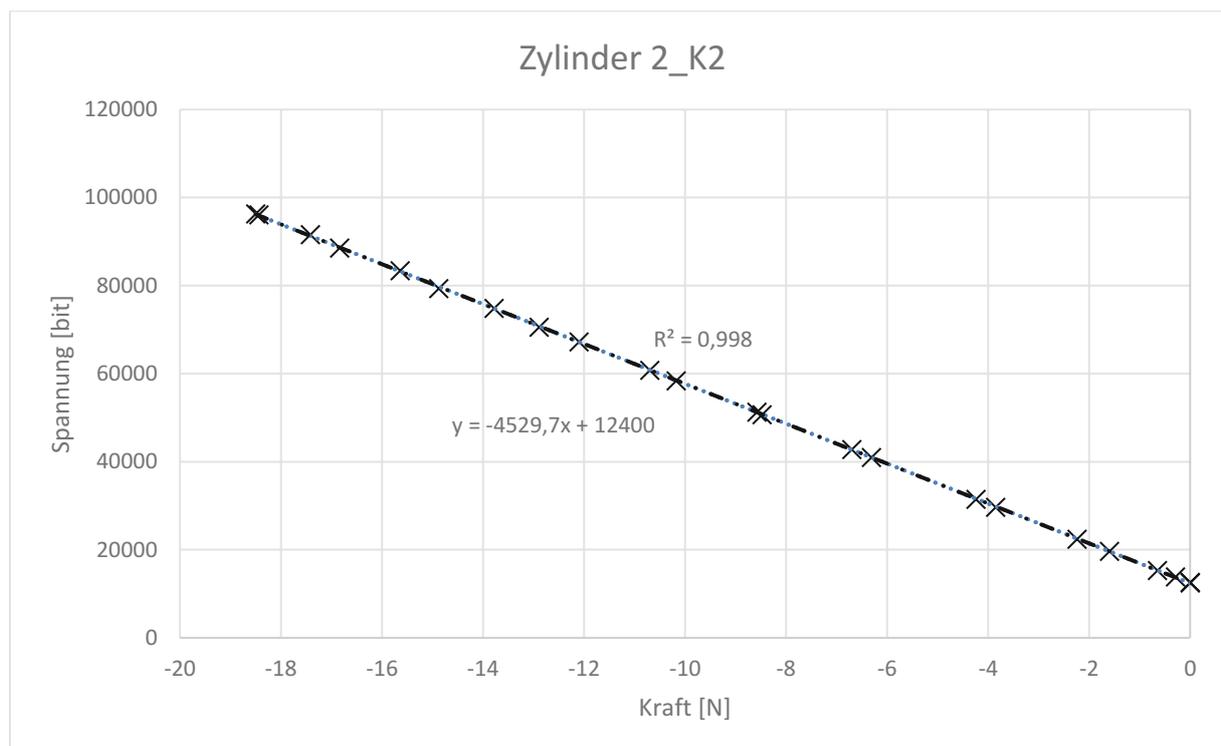


Abbildung 34: Kalibriergerade mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,998$. Abzulesen sind die Steigung k und der Schnittpunkt der Ordinate d .

...Das Bestimmtheitsmaß (oder Determinationskoeffizient) R^2 ist das Quadrat des Korrelationskoeffizienten R . Es liegt immer zwischen 0 und 1 und enthält nicht mehr die Information über das Vorzeichen der Steigung. (Carl-Enger, 2011)

Dem gegenübergestellt ist in Abbildung 35 eine Kalibriergerade mit niedrigem R^2 . Bei diesem Kalibriervorgang kam es zu einem Hysterese- Effekt. Dieser ist unerwünscht und führt bei der Kalibrierung zu einer Verschiebung der Punkte entlang der Ordinatennachse. Gut erkennbar ist eine dafür typische Hystereseschleife. Der Effekt tritt auf, wenn sich während des Kalibriervorgangs eine Einflussgröße verändert, beispielsweise der

Dehnmessstreifen oder die Lagerung des Messzylinders. Dadurch entsteht eine zeitabhängige Komponente, welche sich in den gemessenen Punkten widerspiegelt. Diese Pfadabhängigkeit zeichnet sich auch in einem dementsprechend niedrigen R^2 ab, in diesem Fall wurde der Kalibriervorgang wiederholt.

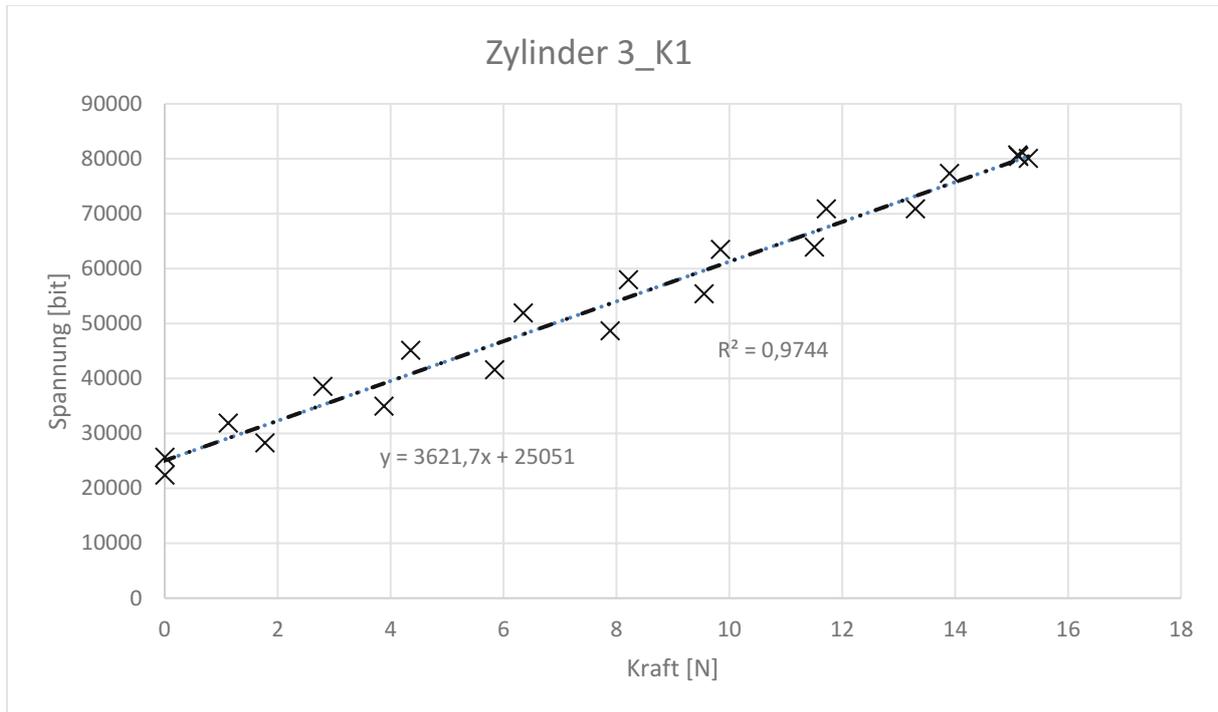


Abbildung 35: Hysterese- Effekt bei einem Kalibriervorgang.

Um Ungenauigkeiten vorzubeugen wurde also bei den Kalibriergeraden ein R^2 von mindestens 0,975 gefordert, ansonsten wurde der Kalibriervorgang wiederholt. In Tabelle 7 zeigt sich, dass dies auch immer eingehalten wurde. In den meisten Fällen lag das Bestimmtheitsmaß deutlich über dem Mindestwert von 0,975.

Tabelle 7: Die für die Auswertung der Daten verwendeten Kalibriergeraden. Da zwei Varianten zur Verfügung standen, wurde jeweils die Gerade mit größerem R^2 herangezogen.

| Datum | Setup | Zyl Nr. | R^2_1 | R^2_2 | K1 | d1 | K2 | d2 |
|--------|-------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| 13.Apr | SS | 1 | 0,999 | 0,999 | 4363,3 | -131515 | -4195,1 | -131540 |
| 13.Apr | SS | 2 | 0,997 | 0,999 | 4741,9 | 10940 | -4506,3 | 10651 |
| 13.Apr | RS | 2 | 0,996 | 0,999 | 4220,6 | -131037 | -4081,3 | -131880 |
| 13.Apr | RS | 3 | 0,974 | 0,975 | 3621,7 | 25051 | -3477,2 | 24733 |
| 13.Apr | SS | 2 | 0,999 | 1,000 | 4395,9 | -132823 | -4232,5 | -132677 |
| 13.Apr | SS | 3 | 0,999 | 1,000 | 4696 | 10462 | -4580,4 | 10115 |
| 19.Apr | SS | 1 | 0,998 | 0,999 | 4403,9 | 12277 | -4605,9 | 11497 |
| 19.Apr | SS | 2 | 0,998 | 0,999 | 4528,5 | -141141 | -4510,6 | -141577 |
| 19.Apr | SS | 1 | 0,990 | 1,000 | 4389,6 | 13068 | -4594,3 | 11513 |
| 19.Apr | SS | 2 | 0,989 | 1,000 | 4290,6 | -141444 | -4497,6 | -141420 |
| 22.Apr | SS | 4 | 0,998 | 1,000 | 4745,5 | 10563 | -4566,6 | 11819 |
| 22.Apr | SS | 5 | 0,997 | 0,999 | 4541,2 | -141373 | -44559 | -141178 |
| 22.Apr | SS | 4 | 0,999 | 1,000 | 4759,8 | 11543 | -4554,4 | 11989 |
| 22.Apr | SS | 5 | 0,998 | 0,999 | 4637,5 | -142616 | -4522,2 | -142130 |
| 25.Apr | SR | 1 | 0,993 | 1,000 | 4549,5 | -143062 | -4901,9 | -141614 |
| 25.Apr | SR | 2 | 0,990 | 1,000 | 4525 | 10667 | -4569,9 | 12279 |

| | | | | | | | | |
|--------|----|---|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 25.Apr | RR | 2 | 0,998 | 0,999 | 4592,9 | -141041 | -4473,2 | -141378 |
| 25.Apr | RR | 3 | 0,999 | 1,000 | 4598,5 | 11780 | -4572,7 | 12532 |
| 25.Apr | RR | 1 | 0,999 | 0,999 | 4442,4 | -140518 | -4467 | -141474 |
| 25.Apr | RR | 2 | 0,999 | 1,000 | 4799,3 | 11426 | -4529,7 | 12400 |
| 26.Apr | RR | 4 | 0,986 | 0,998 | 4237,7 | -142320 | -4354,6 | -141713 |
| 26.Apr | RR | 5 | 0,996 | 0,999 | 4322,2 | 13403 | -4598,6 | 12123 |
| 26.Apr | SR | 4 | 0,999 | 0,999 | 4609,9 | -141214 | -4477 | -141551 |
| 26.Apr | SR | 5 | 0,998 | 1,000 | 4648,5 | 8217,6 | -4581,5 | 8259,7 |

Es gibt viele Messungen, bei denen die gesuchte Größe nicht direkt messbar ist, wie auch im Falle der Kraftmessungen. Dann muss über mathematische Beziehungen auf die richtige Größe geschlossen werden, dieser Prozess ist jedoch mit einem Fehler behaftet. Grundsätzlich gilt, dass mehrere aufeinanderfolgende Fehlerquellen auch schlussendlich zu einer größeren potenziellen Abweichung führen. Um darüber besseres Verständnis zu erlangen, muss der Messvorgang gedanklich in seine Einzelteile zerlegt werden und anschließend evaluiert werden, wo Fehler auftreten können.

Der gewünschte Durchfluss wurde elektronisch am Schaltkasten über ein Display eingegeben. Nach Anlaufen der Pumpen konnte dieser kurz darauf auch dort abgelesen werden. Zur Kontrolle gab es noch zusätzlich auf dem entsprechenden wasserführenden Rohr eine unabhängige Messeinheit, zu jeder Messung wurden beide Angaben abgelesen und notiert.

In der folgenden Tabelle 8 sind die Abweichungen der beiden Durchflussangaben zusammengefasst wobei über das Display das Durchfluss- Soll eingegeben wird und auf dem Zähler der tatsächliche Durchfluss abgelesen wurde (Ist).

Tabelle 8: Abweichung des tatsächlichen Durchflusses vom gewünschten Durchfluss.

| | 22.Apr | | | 25.Apr | | | 26.Apr | | |
|------------------------------------|-----------|----------------|------------|-----------|----------------|------------|-----------|----------------|--|
| Soll [l/s] | Ist [l/s] | Abweichung [%] | Soll [l/s] | Ist [l/s] | Abweichung [%] | Soll [l/s] | Ist [l/s] | Abweichung [%] | |
| 37,1 | 37,4 | 0,81 | 37,1 | 37,0 | 0,27 | 37,1 | 37,3 | 0,54 | |
| 37,1 | 37,3 | 0,54 | 90,5 | 91,0 | 0,55 | 90,5 | 90,8 | 0,33 | |
| 90,5 | 91,0 | 0,55 | 147,0 | 146,8 | 0,14 | 147,0 | 146,8 | 0,14 | |
| 147,0 | 146,0 | 0,68 | 200,0 | 197,5 | 1,25 | 147,0 | 146,6 | 0,27 | |
| 37,1 | 37,0 | 0,27 | 37,1 | 37,1 | 0,00 | 37,1 | 37,0 | 0,27 | |
| 37,1 | 37,1 | 0,00 | 90,5 | 90,8 | 0,33 | 37,1 | 37,0 | 0,27 | |
| 90,5 | 91,0 | 0,55 | 90,5 | 91,0 | 0,55 | 90,5 | 90,7 | 0,22 | |
| 90,5 | 91,0 | 0,55 | 147,0 | 146,8 | 0,14 | 147,0 | 146,6 | 0,27 | |
| 147,0 | 146,8 | 0,14 | 200,0 | 197,8 | 1,10 | 147,0 | 146,5 | 0,34 | |
| 147,0 | 146,9 | 0,07 | 200,0 | 197,7 | 1,15 | 200,0 | 198,0 | 1,00 | |
| Mittelwert μ | | 0,42 | | | 0,55 | | | 0,37 | |

Die verwendete Software zur Aufzeichnung und Speicherung der Daten wurde mithilfe der Programmiersprache Python programmiert und misst ausschließlich die übertragene elektrische Spannung. Durch eine Änderung in der Dehnung des Messstreifens in der Messzelle wird auch eine entsprechende Änderung im Signal hervorgerufen, welches wiederum von der Software erfasst wird. Danach werden die ermittelten Daten sortiert abgelegt und zusätzlich ein Diagramm in Echtzeit angezeigt, um laufend den Messvorgang kontrollieren zu können. Bei den Kraftmesszellen sowohl im Kalibriergerät als auch im Messzylinder selbst wurden zur Ermittlung der Kraft Dehnmesstreifen eingebaut. Diese liefern über das Emodul, welches für das verwendete Material bekannt ist einen Zusammenhang zwischen Kraft und Dehnung.

3.4.3 Messablauf Kraftmessungen

Der Ablauf der Kraftmessungen ist in weiterer Folge zusammengefasst. Bei jeder Messung waren die aufeinanderfolgenden Schritte gleich, nur bei einer nicht ausreichend genauen Kalibrierung wurde der Vorgang unterbrochen, um die Kalibrierung zu wiederholen:

1. Einbau der Messzylinder (Rauh oder glatt) an der geplanten Position; Einbau erfolgt im Trockenen.
2. Die Versuchsrinne wurde bei geschlossenem Schieber mit Wasser gefüllt.
3. Der Temperatenausgleich wurde abgewartet und die Pumpen dabei abgedreht (Mindestens 10 Minuten).
4. Anschließend Kalibrieren.
5. Danach wurden die Pumpen wieder eingeschalten, die Versuchsrinne schrittweise gekippt und der Schieber soweit heruntergefahren, bis die Wasserspiegellage von 45cm erreicht wurde. (Iterativer Prozess)
6. Die Versuche wurden gestartet, beginnend beim niedrigsten Durchfluss für die vorliegende Konstellation (Zylinderposition, Rauheit)
7. Versuchsdurchführung; 3 Messungen hintereinander mit gleichbleibenden Bedingungen zu je 2 Minuten.
8. Durchfluss steigern und Neigung der Versuchsrinne erhöhen, um Wasserspiegellage von 45cm konstant zu halten.
9. Pumpen abschalten, Zulaufschieber hochfahren und stehende Welle in der Rinne abwarten (Mindestens 10 Minuten)
10. Erneut kalibrieren.

3.5 Geschwindigkeitsmessungen

3.5.1 Einpunktmessungen

Zusätzlich zu den Geschwindigkeitsmessungen wurden ergänzend Einpunktmessungen durchgeführt. Diese wurden in Querschnittsmitte 15cm vor dem jeweiligen Zylinder gemessen. Abbildung 36 zeigt einen Messzylinder und den Abstandhalter, welcher auch schon für die Vorversuche zur Zulaufoptimierung verwendet wurde.

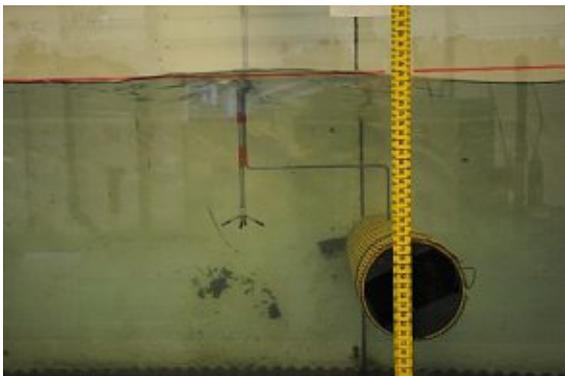


Abbildung 36: Punktmessung 15cm vor dem Zylinder.

3.5.2 Vertikale Messprofile

Ergänzend zu den Kraftmessungen sowie den Einpunktmessungen wurden zusätzlich Geschwindigkeitsprofile gemessen. Dafür wurde das gleiche ADV eingesetzt, wie schon davor zur punktuellen Geschwindigkeitsmessung, die Kräfte auf angeströmte Körper ermitteln sich wie zuvor in Gleichung 1 beschrieben.

$$F_w = C_w \rho \frac{v_0^2}{2} A_p$$

Es fällt auf, dass die Anströmgeschwindigkeit v_0 zum Quadrat in die resultierende Kraft eingeht, daher liegt eine höhere Gewichtung vor als für den C_w – Wert. Ansätze in der Vergangenheit beschäftigen sich vielerlei mit der genauen Ermittlung des Widerstandsbeiwertes, in weiterer Folge wird aber zur Berechnung einer Kraft dann mit der mittleren Geschwindigkeit V_Q gerechnet. Das führt dazu, dass der Widerstandsbeiwert scheinbar stark davon abzuhängen scheint, je nachdem ob der zugehörige Körper nahe der Sohle oder an der Oberfläche platziert wurde. Die Vermutung liegt nahe, dass dem nicht der Fall ist; vielmehr hat sich lediglich die Anströmgeschwindigkeit geändert, da ja von einer logarithmischen Verteilung auszugehen ist (Abbildung 37). Diese Herangehensweise schränkt die Universalität vollkommen ein, da die Geschwindigkeitsverteilungen von vielen anderen Parametern abhängen.

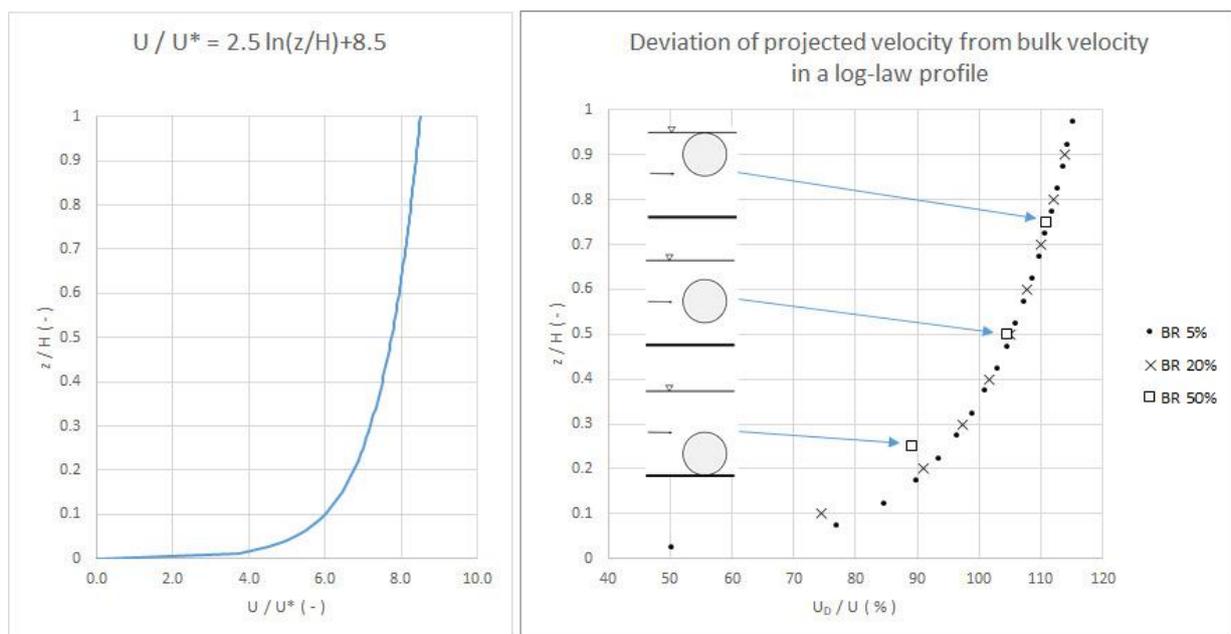


Abbildung 37: Logarithmisches Geschwindigkeitsprofil einer Wandgrenschicht ohne Störkörper (links) und Abweichung der erwarteten Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Einbauhöhe des Störkörpers (rechts). (Grafik Schnauder 2020)

Besonders bei Reihenanzordnung von Zylindern ist von einem großen Unterschied in der Anströmgeschwindigkeit auszugehen, da ja nur der erste Zylinder mit dem bekannten Log- Profil angeströmt wird, während stromabwärts liegende Zylinder bereits von einem deutlich nachlaufgeprägten Profil angeströmt werden (Abbildung 38). Dieser Vermutung wird mit den Geschwindigkeitsmessungen nachgegangen.

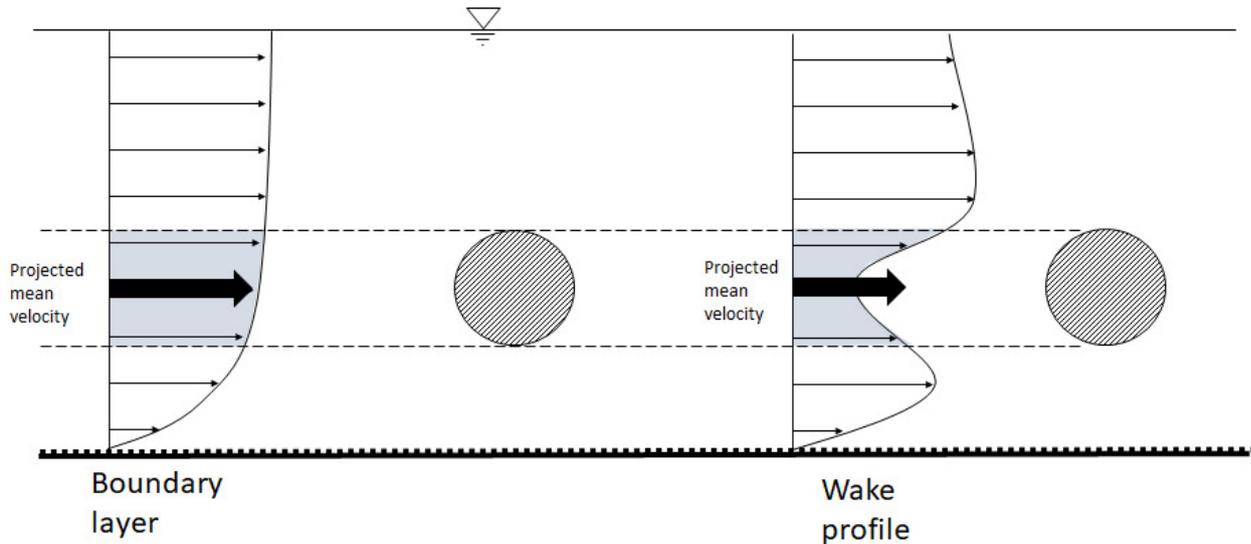


Abbildung 38: Unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile in der Anströmung, der linke Zylinder ist von der Einbauhöhe abhängig, während der stromabwärts (rechts) liegende Zylinder sowohl vom oberstromigen Zylinder als auch von der Lage bezüglich der Wandgrenzschicht abhängt. (Grafik Schnauder 2020).

Vier Profile waren ausreichend, um die Verteilung über die Rinnenbreite zu erfassen. Der Wandeinfluss unter 5cm wurde bei der Berechnung der mittleren Anströmgeschwindigkeit zusätzlich berücksichtigt.

Dementsprechend war der Versuchsaufbau mit dem der Kraftmessungen ident. Folgende Punkte wurden aufeinander abgestimmt:

- Zylinderabmessungen
- Zylinderposition innerhalb der Versuchsrinne
- Abflusstiefe
- Einlaufbedingungen
- Geschwindigkeitsmessgerät

Es wurde ein Durchfluss von 90 l/s und eine glatte als auch eine raue Sohle, sowie glatte Zylinder für die Versuche verwendet. Der Messquerschnitt war jeweils 50cm vor dem entsprechenden Zylinder, um eine repräsentative Verteilung der Anströmgeschwindigkeiten zu messen, aber aus dem Bereich des Staupunktes herauszukommen. Dabei handelt es sich um jenen Punkt des Körpers, an dem das Wasser theoretisch kreuz auftrifft, im Falle eines Kreiszylinders also der Scheitelpunkt entlang der x- Achse.

Es wurden insgesamt 6 Querschnitte gemessen, für 2 verschiedene Sohlrauheiten ergibt das also 12 Querschnitte. Die Beschreibung „Zylinder Nummer 5+“ kennzeichnet jenen Querschnitt, welcher 100 cm hinter dem letzten in Reihe geschalteten Zylinder (Zylinder 5) gemessen wurde.

3.5.3 Aufbau und Messpunkte

Dadurch, dass ein Fließquerschnitt möglichst gut erfasst werden sollte, war es notwendig sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Verstellmöglichkeit für das Geschwindigkeitsmessgerät zu schaffen. Um effektiver zu sein, wurden 2 Geräte parallel zur gleichzeitigen Messung verwendet. Durch eine Kurbel konnten die Geräte entlang der vertikalen (z)- Achse verschoben werden, für die Verstellung entlang der horizontalen (y)- Achse diente ein Formrohr, welches durch Schraubzwingen fixiert werden konnte (Abbildung 39). Anhand einer vorlaufenden Kalibrierung konnte exakt bestimmt werden, wie viele Umdrehungen 1cm Höhenverstellung entlang der z- Achse entsprechen.

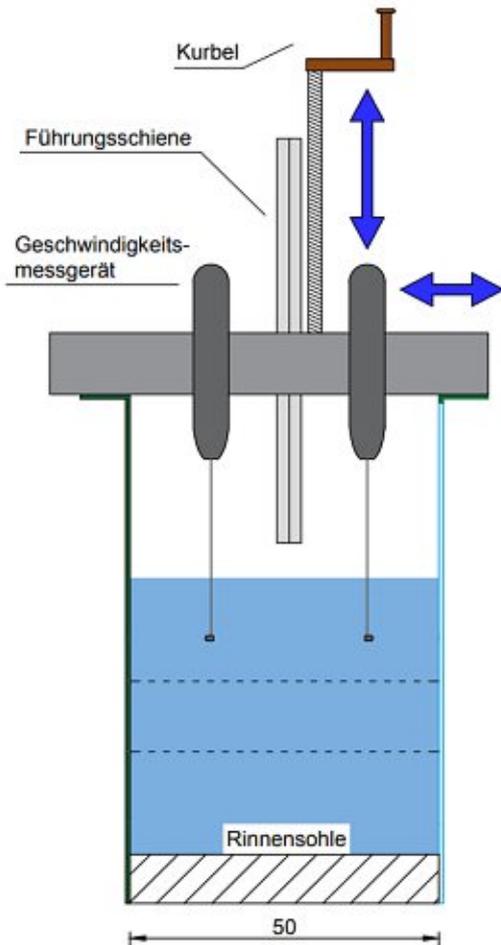


Abbildung 39: Vorrichtung für die Geschwindigkeitsmessung. Das Messgerät kann innerhalb der Rinne vertikal, als auch horizontal bewegt werden und deckt so den gesamten Querschnitt ab. (Skizze nicht maßstäblich dargestellt)

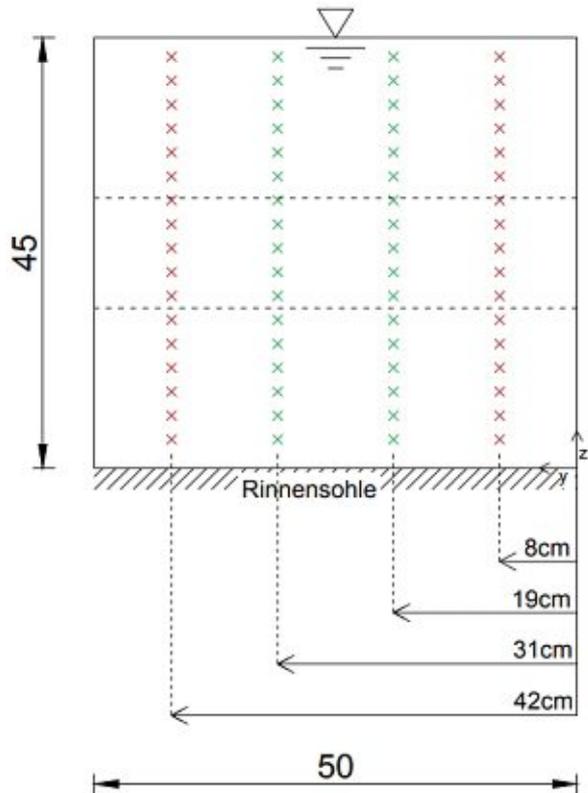


Abbildung 40: Anordnung der gemessenen Punkte. Messpunkte in Wandnähe (rot) und in der Mitte des Fließquerschnittes (grün).

Für die genaue Änderung entlang der y- Achse wurden Markierungen am Formrohr angebracht, um nach jedem Umsetzvorgang des Geschwindigkeitsmessgerätes wieder auf die entsprechende Position zu kommen.

Die Messpunkte, welche in Abbildung 40 dargestellt sind, waren folgendermaßen angeordnet: Es wurden pro Geschwindigkeitsprofil 17 vertikale Messpunkte angesetzt. Pro Querschnitt wurden 4 Profile gemessen, 2 in Wandnähe ($y=8\text{cm}$, $y=42\text{cm}$) welche in der Darstellung rot gefärbt sind; sowie 2 in der Mitte des Fließquerschnittes ($y=19\text{cm}$, $y=31\text{cm}$) welche in grün dargestellt sind. Der vertikale (z)- Abstand zwischen den Messpunkten betrug 2,5cm. Der unterste Messpunkt, welcher der Sohle am nächsten war, war 3cm über der Rinne-sohle angeordnet, während der oberste, welcher dem Wasserspiegel am nächsten war bei 43cm über der Sohle lag. Pro Querschnitt (Abbildung 41) wurden so 68 Punkte gemessen.

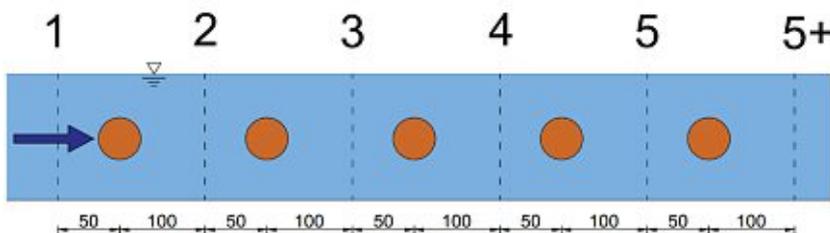


Abbildung 41: Gemessene Querschnitte (1- 5+) mit Abständen, Angabe in cm.

3.6 Auswertung der Messungen

Zur Auswertung der Kraftmessungen wurden die Werte k und d aus der zugehörigen Kalibriergerade herangezogen und über ein Matlab-File anschließend die gesuchten Größen ausgegeben. Zusätzlich wurde zur Kontrolle eine unabhängige Auswertung der mittleren Kraft auf Excel durchgeführt und anschließend die Werte verglichen. Die Auswertung in Matlab hat den Vorteil, dass zusätzlich zur mittleren Kraft auch noch eine Autokorrelationsfunktion ausgegeben werden kann. Diese überlagert das Signal mit sich selbst zu einem früheren Zeitpunkt und ist in der Lage, Anregungsfrequenzen und den Grad der Übereinstimmung zu zeigen. Eine solche Auswertung ist in Abbildung 42 zu sehen.

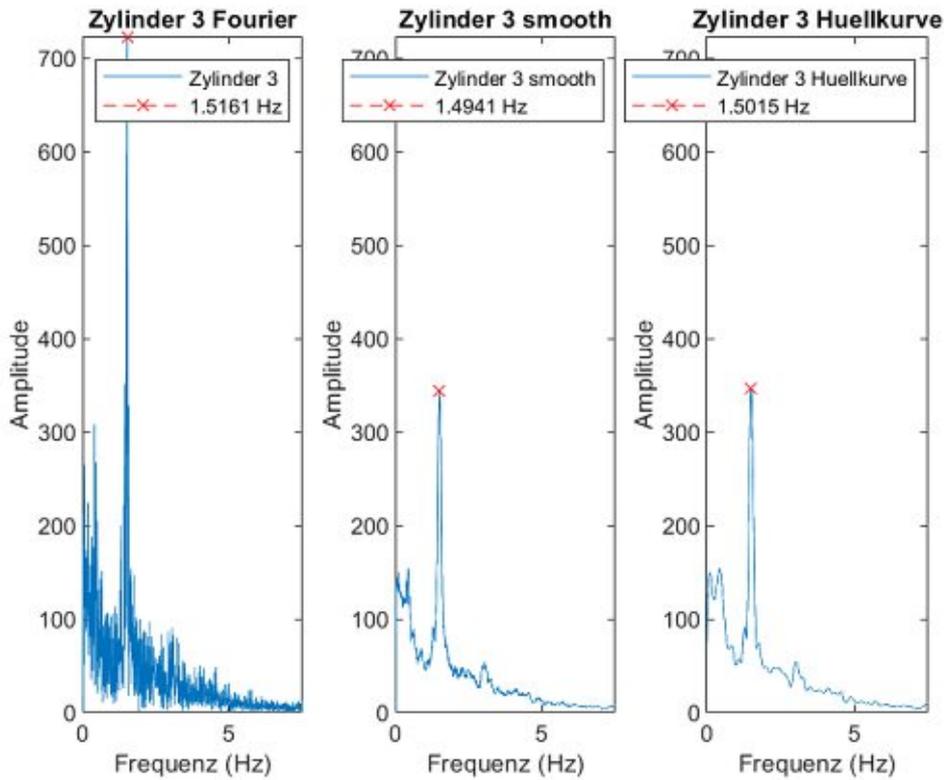


Abbildung 42: Autokorrelation für eine Messung von 2 Minuten. Gut erkennbar ist in diesem Fall ein Peak bei etwa 1,5 Hz.

Abbildung 43 zeigt den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zylinderposition für verschiedene Durchflüsse. Erwartungsgemäß steigt die Geschwindigkeit bei größerer Durchflussmenge und gleichbleibender Lage des Wasserspiegels. Dazu kann für eine erste Abschätzung die Kontinuitätsgleichung herangezogen werden:

$$Q = v * A \tag{6}$$

Bei bekanntem Querschnitt und Durchfluss kann also auf die entsprechende Geschwindigkeit geschlossen werden. Der tatsächliche Durchfluss ist bei jeder Messung unterschiedlich, weicht jedoch nur geringfügig vom eingestellten Durchfluss ab, wie in Tabelle 9 zu sehen ist. Bei den Messungen selbst wurde der Durchfluss jeweils am Anfang und am Ende einer Versuchsreihe festgehalten. Für Abbildung 43 sind die dazugehörigen Durchflusswerte am Anfang und am Ende der Messung, als auch der daraus gebildete Mittelwert und die Standardabweichung der Mittelwerte in Tabelle 9 angegeben. Dabei ist die Auflistung folgendermaßen zu verstehen:

20% der Pumpenleistung wurde für den Durchfluss eingestellt, der Wert 36,7 l/s wurde am Anfang der Messung aufgezeichnet, 37 l/s am Ende der Messung. Der daraus gebildete Mittelwert steht in der Zeile nebenan.

Tabelle 9: Durchfluss und Standardabweichung. Der Prozentwert beschreibt die Pumpenleistung.

| Pumpenleistung | Zylinder 1 & 2 | | Zylinder 2 & 3 | | Zylinder 4 & 5 | | Standardabweichung |
|----------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|--------------------|
| | [l/s] | | | | | | |
| 20% | 36,7 | 36,85 | 36,8 | 36,9 | 37,0 | 37,0 | 0,06 |
| | 37,0 | | 37,0 | | 37,0 | | |
| 30% | 68,5 | 68,5 | 68,8 | 68,8 | 68,8 | 68,6 | 0,12 |
| | 68,5 | | 68,8 | | 68,5 | | |
| 39% | 91,0 | 91,0 | 91,1 | 91,05 | 90,8 | 90,7 | 0,13 |
| | 91,0 | | 91,0 | | 90,7 | | |
| 50% | 116,5 | 116,5 | 116,2 | 116,5 | 116,3 | 116,3 | 0,11 |
| | 116,5 | | 116,9 | | 116,3 | | |
| 75% | 146,5 | 146,5 | 146,5 | 146,5 | 146,6 | 146,5 | 0,02 |
| | 146,5 | | 146,5 | | 146,5 | | |
| 100% | 197,3 | 197,3 | 197,7 | 197,8 | 197,2 | 197,6 | 0,22 |
| | 197,3 | | 198,0 | | 198,0 | | |

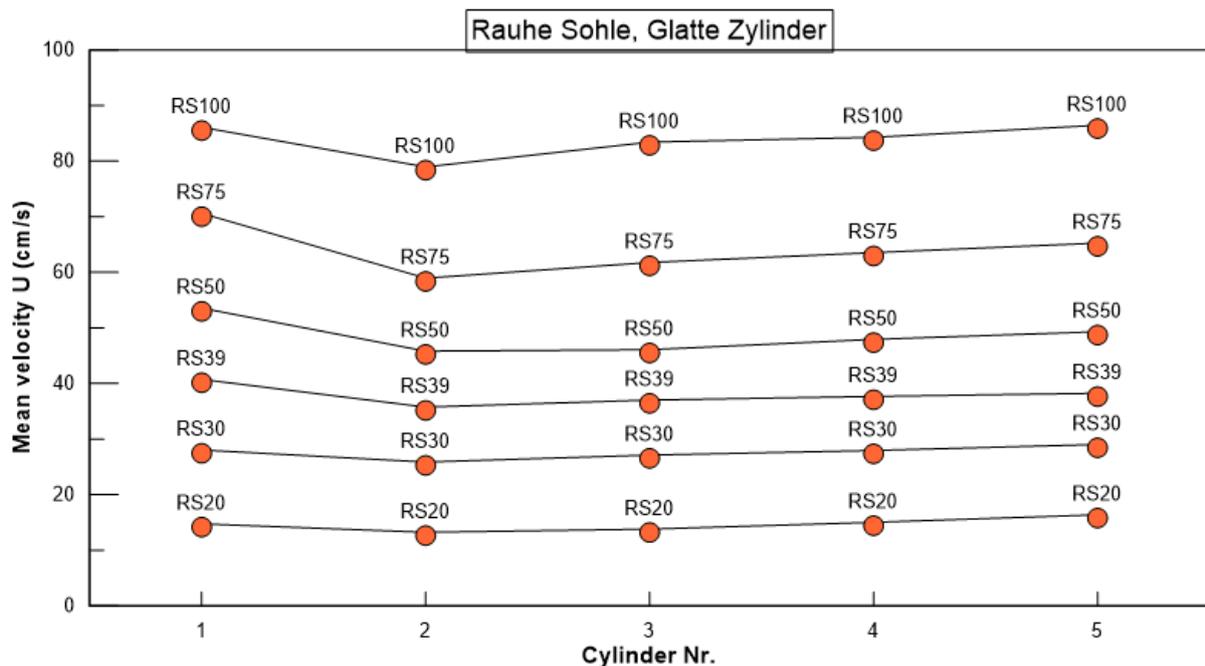


Abbildung 43: Punktuell gemessene Geschwindigkeit, 15cm vor den Zylindern.

Bei den Geschwindigkeitsmessungen wurde ein frei verfügbares Analysetool verwendet. Dieses ermöglicht eine einfache Auswertung und Handhabung. Unter anderem können Störungen im Signal, engl. „Spikes“ gefiltert werden, als auch die Daten einer visuellen Inspektion unterzogen werden. So konnte sichergestellt werden, dass jede Messung einwandfrei funktioniert hatte. In den meisten Fällen (>95%) bedurfte das Signal aber sowieso keiner Korrektur, was wiederum für eine saubere Messung mit passenden Einstellungen spricht.

Nach standardmäßiger Auswertung der Daten (Abbildung 44), wurde aus den einzelnen Messungen anschließend ein vertikales Geschwindigkeitsprofil angefertigt.

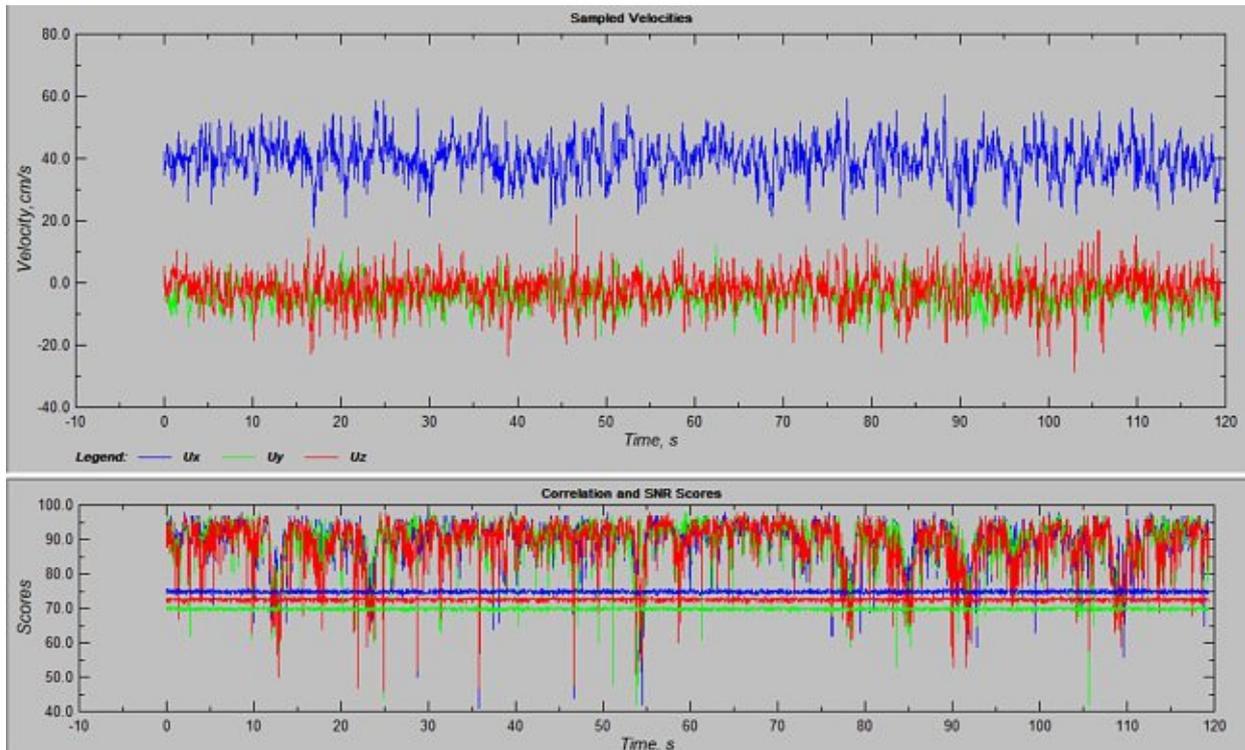


Abbildung 44: Analyse und Filterung mit „Explore ADV“; nach einer Überprüfung der Daten und einer Bereinigung sind hier keine Spikes mehr vorhanden.

Das bedeutete 120 Sekunden Messung pro Punkt; nach Prüfung des Signals folgte anschließend die Zusammensetzung eines Vertikalprofils aus den einzelnen Messpunkten (Abbildung 45).

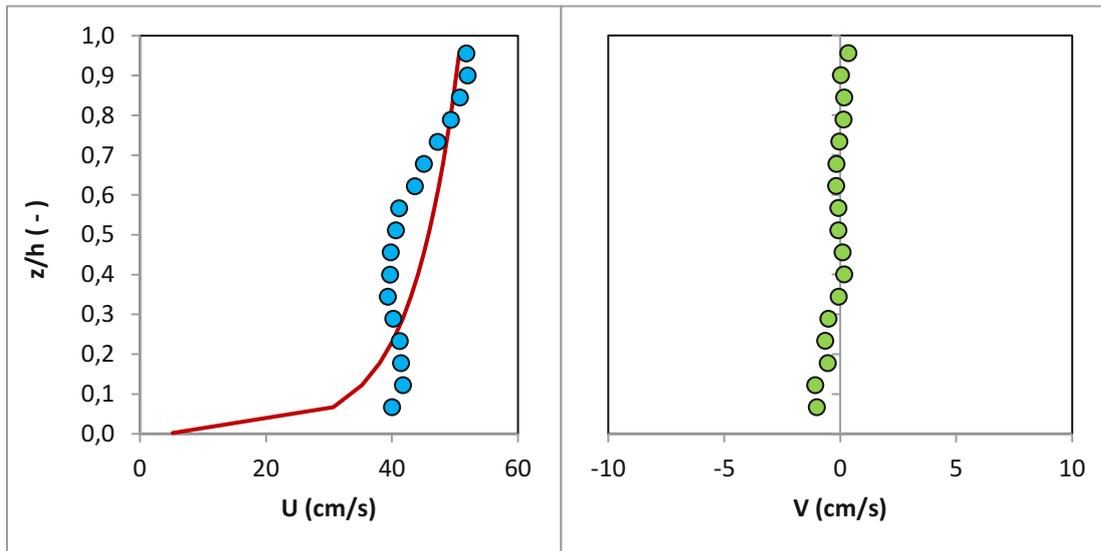


Abbildung 45: Zusammengesetztes Profil aus 17 Messpunkten mit einem Vertikalabstand von je 2,5cm.

Nicht bei jeder Messung war die Sonde des ADV genau in Strömungsrichtung, (x- Richtung) ausgerichtet. Dadurch war eine Korrektur notwendig, welche durch eine Rotation des Koordinatensystems erreicht wurde.

4. Ergebnisse

In Tabelle 4 sind die Bezeichnungen angeführt, welche zur Beschreibung des untersuchten Versuchsaufbaues verwendet wurden. Angaben zur Rauheit der Sohle sind in Kapitel 2.1.4 angeführt.

4.1 Ergebnisse der Kraftmessungen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Kraftmessungen gezeigt (SR und SS in Abbildung 46, sowie RS und RR in Abbildung 47). Diagramme und Auswertung zum Widerstandsbeiwert finden sich in den Interpretationen wieder, da zur deren Ermittlung unterschiedliche Geschwindigkeiten herangezogen werden können.

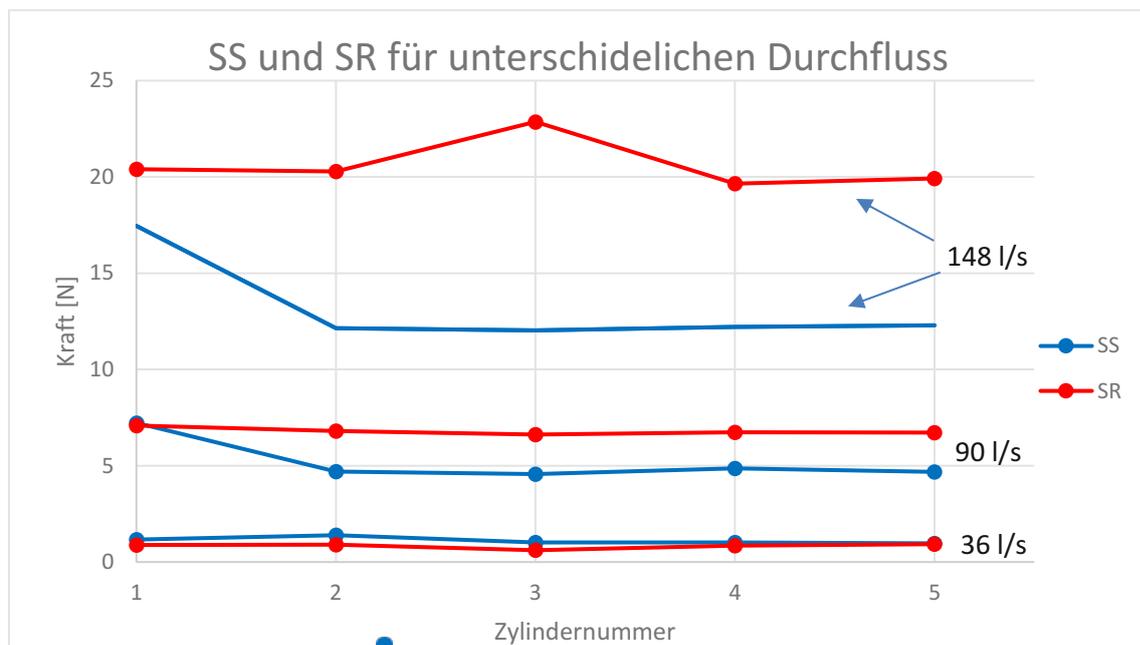


Abbildung 46: Kraft auf die Versuchszylinder für glatte Sohle und glatte Zylinder (SS), sowie glatte Sohle und raue Zylinder (SR).

Abbildung 46 verdeutlicht, dass bei höherem Durchfluss wie erwartet auch eine größere Kraft auf die Versuchszylinder wirkt. Auch ist erkennbar, dass bei rauem Zylindermantel die Kraft höher ist als bei glattem Mantel. Nur im Fall von niedrigen Durchflüssen (37 l/s) zeigte sich kein merklicher Unterschied, was darauf zurückzuführen ist, dass die im Zylinder verbauten Messzellen für einen Messbereich kleiner als 1N nicht ausgelegt waren. Die Wahl des Messbereiches für die Kraftmesszellen fiel schwierig aus, da mit vielen verschiedenen Durchflüssen gemessen wurde und Kräfte zwischen 0,5N und 24N an den Zylindern auftraten.

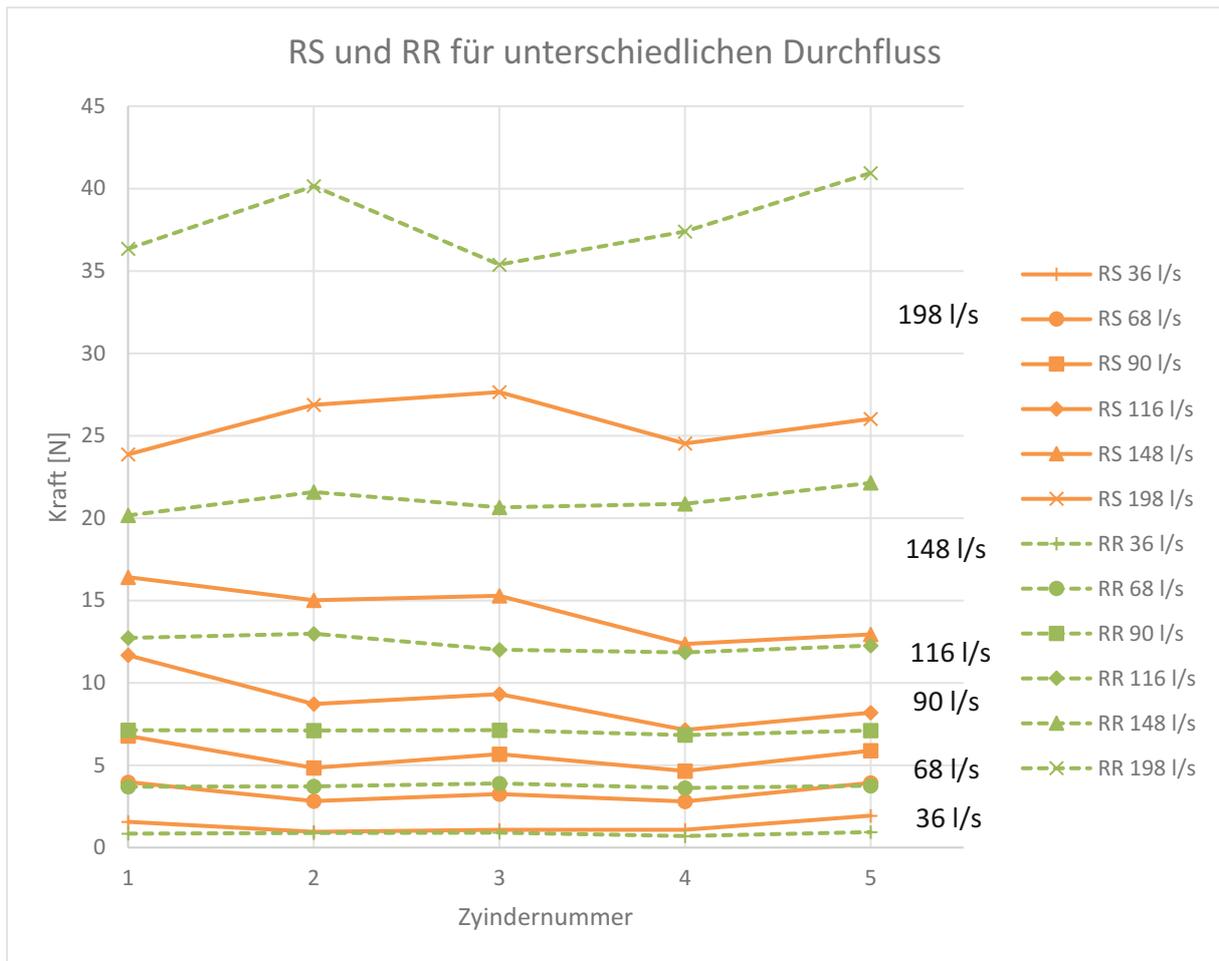


Abbildung 47: Kraft auf die Versuchszyylinder für raue Sohle und glatte Zylinder (RS), sowie raue Sohle und raue Zylinder (RR).

Kräfte auf Zylinder, welche durch geringere Durchflüsse bis etwa 90 l/s hervorgerufen werden, verhalten sich so wie erwartet, auf den ersten Zylinder wirkt eine erhöhte Kraft gegenüber dem darauffolgenden, wie in Kapitel 2.1.8 beschrieben. Zudem ist eine überproportionale Zunahme der Kraft auf raue Zylinder gegenüber der Kraft auf glatte Zylinder mit dem Durchfluss erkennbar (Abbildung 48). Zur deren Berechnung wurden die Kräfte der einzelnen Zylinder gemittelt und so ein Vergleich zwischen RS und RR, unabhängig von der Zylinderzahl hergestellt.

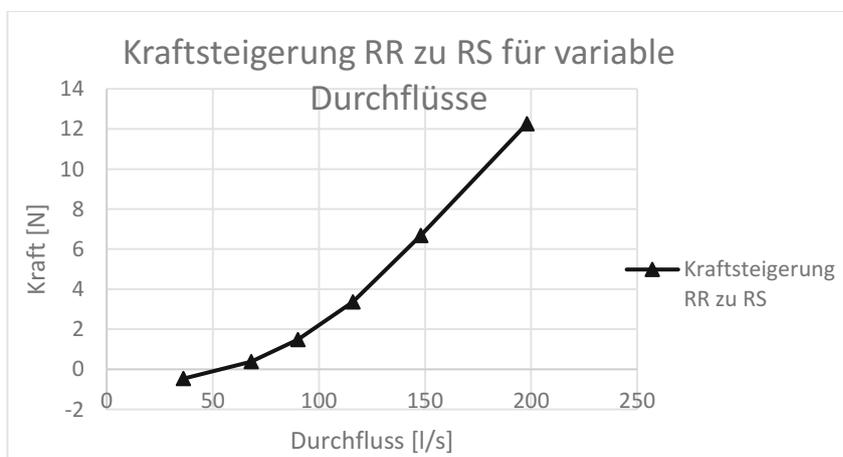


Abbildung 48: Erhöhte Kraft auf Zylinder RR im Vergleich zu Zylinder RS für unterschiedliche Durchflüsse.

4.2 Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen

4.2.1 Punktmessungen

Zu jeder Kraftmessung wurden Punktmessungen, wie sie in Kapitel 3.5.1 beschrieben wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

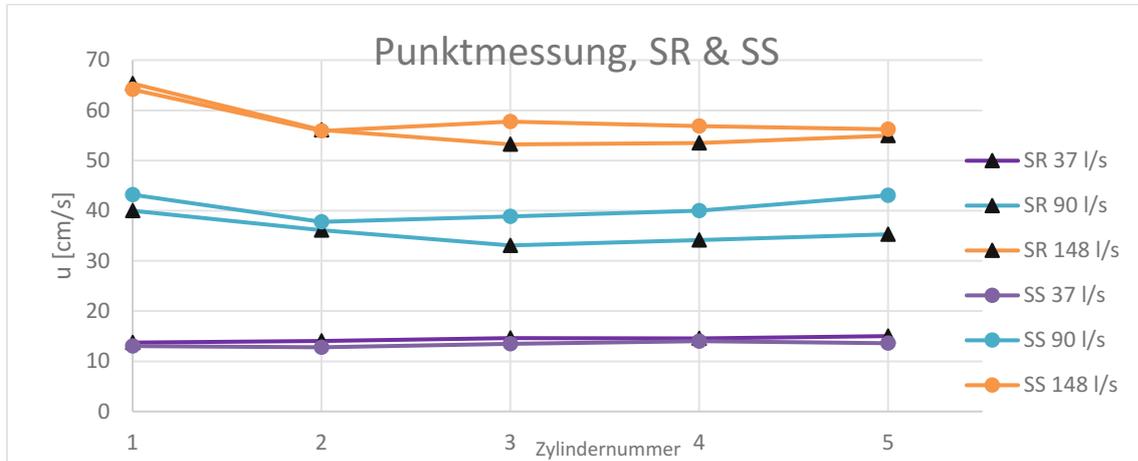


Abbildung 49: Punktuell gemessene Geschwindigkeit für SR und SS.

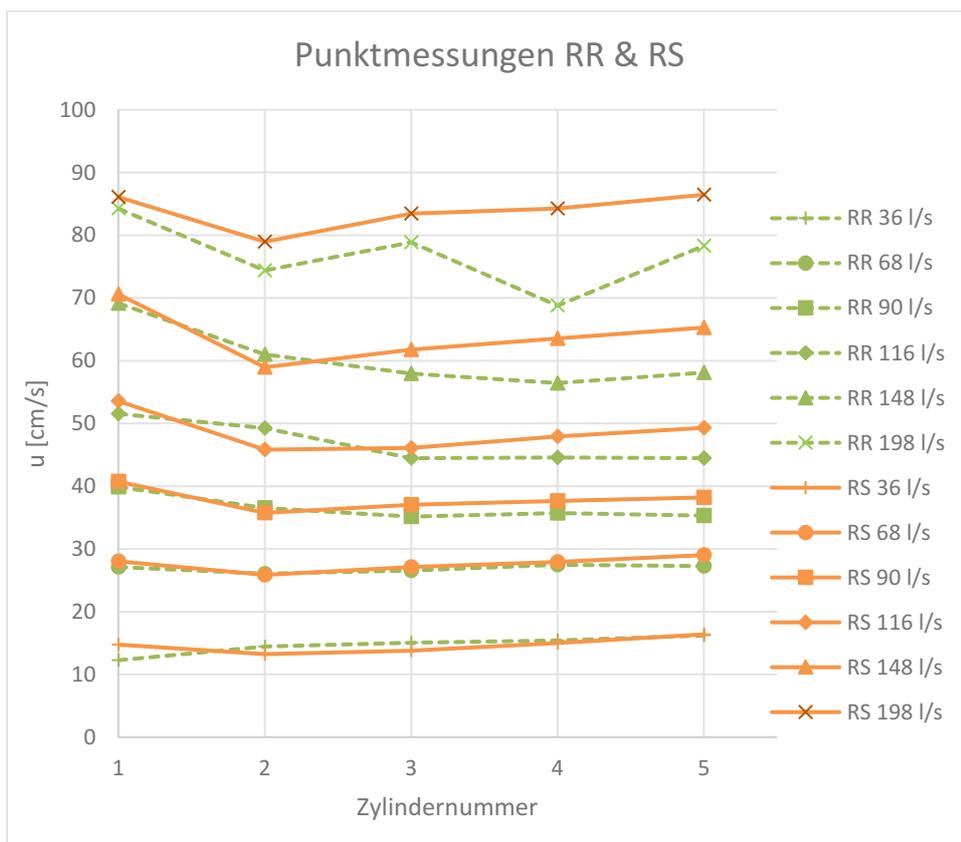


Abbildung 50: Punktuell gemessene Geschwindigkeit für RS und RR.

Weiters ist in Tabelle 10 die durchschnittliche Turbulenz der Anströmung für die die verschiedenen Versuchsparmater dargestellt.

Tabelle 10: Durchschnittliche Turbulenz der Anströmung.

| Setup [-] | Re Zylinder [-] | ∅ Tu Zyl. 1-5 [%] |
|-----------|-----------------|-------------------|
| SS20 | 1,80E+04 | 22,2 |
| SR20 | 1,90E+04 | 19,1 |
| RS20 | 1,80E+04 | 19,9 |
| RR20 | 1,90E+04 | 20,3 |
| RS30 | 3,30E+04 | 16,5 |
| RR30 | 3,50E+04 | 18,1 |
| SS39 | 4,60E+04 | 13,9 |
| SR39 | 4,80E+04 | 17,3 |
| RS39 | 4,60E+04 | 14,0 |
| RR39 | 4,80E+04 | 17,0 |
| RS50 | 5,90E+04 | 11,2 |
| RR50 | 6,10E+04 | 15,4 |
| SS75 | 7,40E+04 | 12,0 |
| SR75 | 7,80E+04 | 15,7 |
| RS75 | 7,40E+04 | 9,8 |
| RR75 | 7,80E+04 | 14,6 |
| RS100 | 9,90E+04 | 8,1 |
| RR100 | 1,00E+05 | 13,8 |

4.2.2 Vertikalprofile

So wie für die Kraftmessungen sind in diesem Kapitel die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen angeführt (Abbildung 51). Wie erörtert wurden bei den Geschwindigkeitsmessungen ausschließlich Zylinder mit glattem Mantel untersucht, während die Sohlrauheit variiert wurde. (Rough entspricht $k_s = 2\text{mm}$). Alle Geschwindigkeitsprofile wurden bei einem konstanten Durchfluss von 90 l/s durchgeführt.

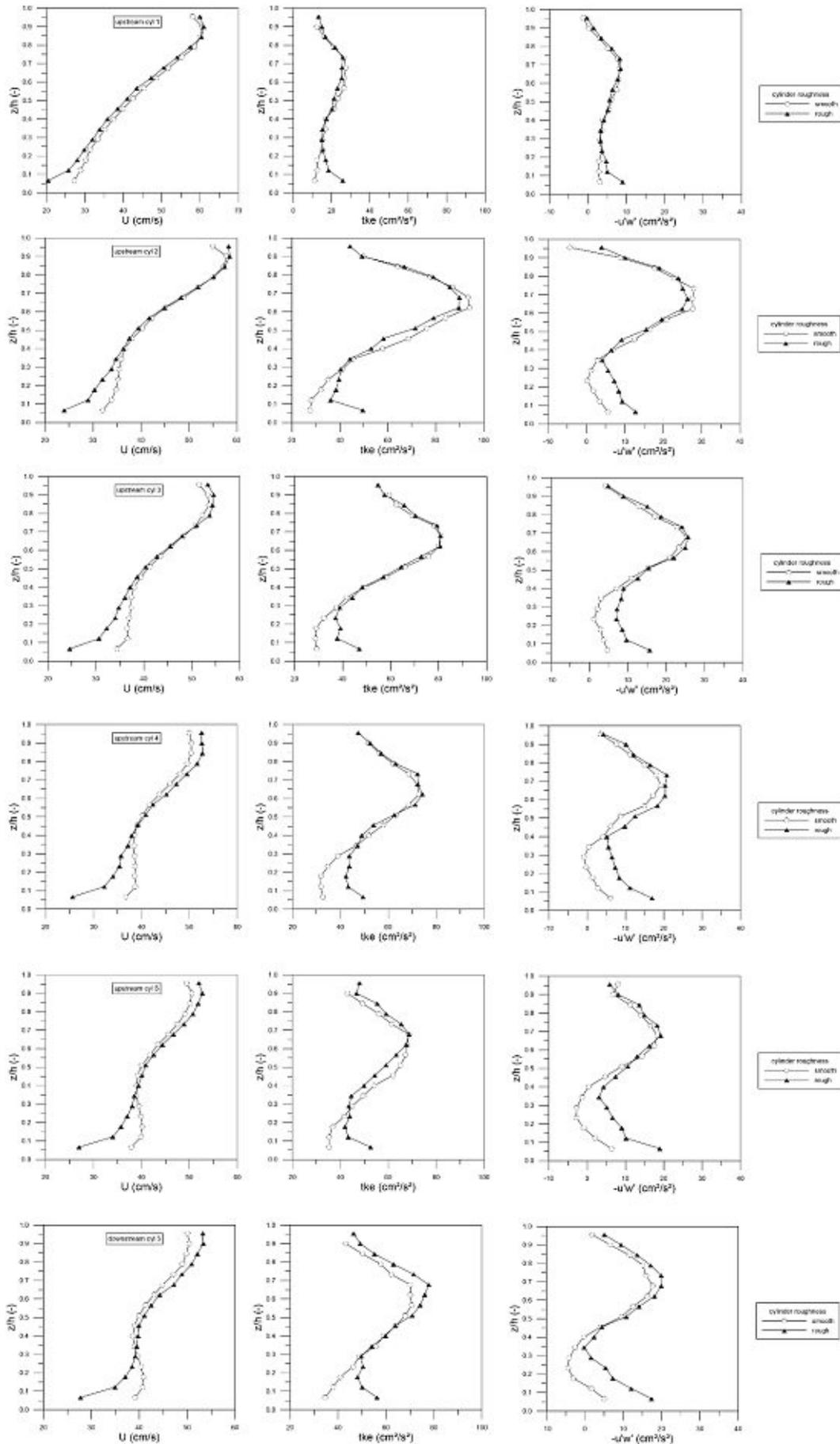


Abbildung 51: Vertikalprofile für Geschwindigkeit, Turbulente kinetische Energie und Schubspannung für Zylinder 1- 5+.
(Grafik Schnauder)

4.3 Oberflächenwellen

Bei Rauer Sohle und Durchflüssen von 148 l/s und besonders bei 198 l/s kam es zur Wellenbildung (Abbildung 52).

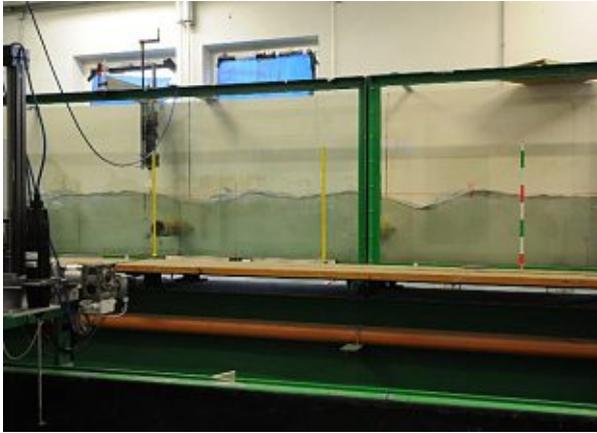


Abbildung 52: Wellenbildung bei höherem Durchfluss.

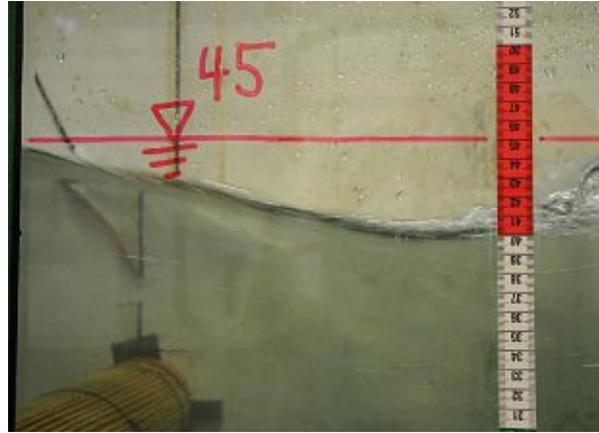


Abbildung 53: Die Maximale Wasserspiegeldifferenz mithilfe eines Maßbandes bestimmt.

Gut erkennbar ist auch, dass sich eine Stehende Welle nach jedem Zylinder bildete. Die Wellen waren bei Zylinder Nummer 3 und 4 am höchsten (bis zu 30% höher als bei Zylinder 1, 2 und 5). Es ist daher möglich, dass sich aus der Differenz des Wasserspiegels vor und nach dem Zylinder eine zusätzliche Kraftwirkung auf den Zylinder ergibt, welche auch von der Zylindernummer abhängt. In Abbildung 53 ist die maximale Differenz der Wasserspiegel vor dem Zylinder und knapp danach zu sehen. Bei einem Durchfluss von 148 l/s betrug sie 3cm, bei 198 l/s 5cm, wie es für die Darstellung der Fall ist.

In Tabelle 11 sind die gemessenen Wellenhöhen für die Durchflüsse 148 l/s und 198 l/s zusammengefasst.

Tabelle 11: Gemessene Wellenhöhe, Angabe in mm.

| | | Durchfluss [l/s] | |
|-------|----|---------------------|-----|
| | | 148 | 198 |
| Setup | SS | 16 | - |
| | SR | 15 | - |
| | RS | 19 | 40 |
| | RR | 17 | 38 |

5. Interpretation und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse der Kraftmessungen als auch der Geschwindigkeitsmessungen diskutiert und mit bestehenden Ansätzen verglichen. Ziel dabei ist es als Erstes festzustellen, ob diese Ansätze zur Berechnung des C_w – Wertes auch für longitudinale Abstände und größere Re- und Fr- Zahlen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, (1,5m Abstand und bis zu 200/s Durchfluss) gelten.

5.1 Anströmgeschwindigkeit und Zylinderzahl

Zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes lassen sich charakteristische Geschwindigkeiten verwenden, in diesem Kapitel wird diskutiert welche dafür am Besten geeignet ist.

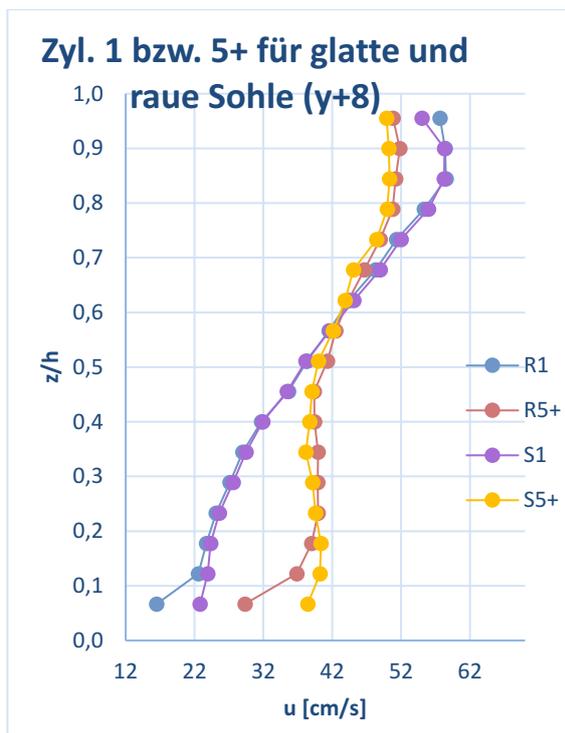


Abbildung 54: Veränderungen der Sohlrauheit sind im Geschwindigkeitsprofil nur merkbar bis zu einer Wassertiefe von $z/h = 0,15$.

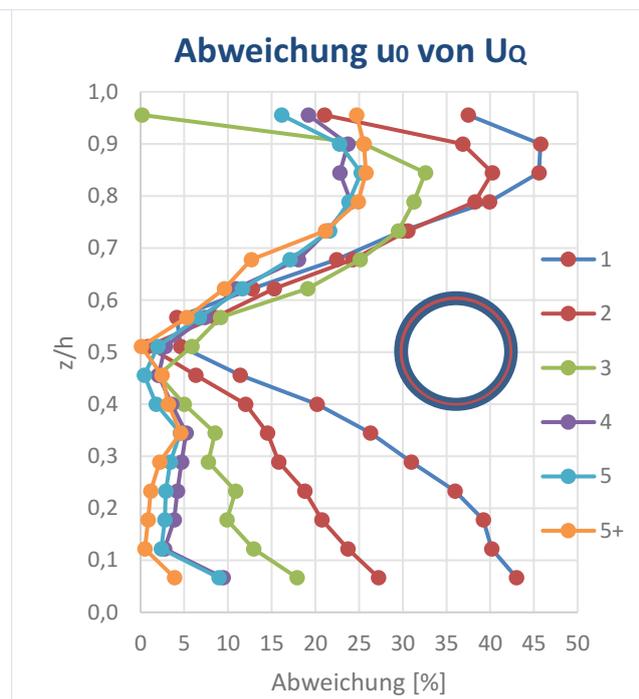


Abbildung 55: Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit von der mittleren, aus dem Durchfluss errechneten Geschwindigkeit für Zylinder 1 bis 5+.

Gut erkennbar ist anhand Abbildung 54 dass die erhöhte Rauheit der Sohle nur den Nahbereich bis etwa $z/h = 0,15$ beeinflusst (im Diagramm verringerte Geschwindigkeit). Dominanter hingegen ist der Einfluss der Zylinderzahl. Die Profile der beiden Zylinder auf Position 1 sind beinahe identisch; dasselbe gilt für die Profile der Zylinder 5+. Es lässt sich also der Einfluss der Zylinderzahl im Geschwindigkeitsprofil der Anströmung erfassen, da es sich dabei um keine lokale Einwirkung unmittelbar am Zylinder handelt, sondern diese schon deutlich vor dem Staupunkt (hier: 50cm) zu beobachten ist. Die Versuchsrinne war also nicht lange genug, um eine volle Ausbildung der Sohlrauheit zu ermöglichen. Dadurch kann für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche der Einfluss der Sohlrauheit vernachlässigt werden.

Aus Abbildung 55 geht hervor, dass entgegen der Erwartungen die mittlere Geschwindigkeit die tatsächliche Geschwindigkeit rund um den Zylinder besser beschreibt als angenommen. Die größten Abweichungen lassen sich bei den vorderen Zylindern feststellen (Zylinder Nummer 1, 2 und 3). Speziell im Sohlbereich, als auch im Bereich der Oberfläche sind die Abweichungen mit bis zu 45% deutlich. Daraus lässt sich schließen, dass bei

dieser Anordnung von Kreiszyindern (und bei diesem Durchfluss!) die mittlere Geschwindigkeit V_Q zur Berechnung der resultierenden Kraft auf die Zylinder durchaus geeignet ist.

Eine Auswertung für eine raue Sohle hinsichtlich der Abweichung zwischen gemessener und mittlerer Geschwindigkeit führt zu einem ähnlichen Ergebnis wie schon bei glatter Sohle, mit dem Unterschied, dass im Sohlbereich die Abweichungen noch größer sind, da ja auch die Geschwindigkeit an dieser Stelle geringer ist. Weiters macht es keinen Unterschied, ob das Profil in Wandnähe (hier: $y+8$), oder in der Mitte des Querschnittes ($y+19$, $y+31$) gemessen wurde.

Verwendet man nun zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes die mittlere, aus dem Durchfluss errechnete Geschwindigkeit U_Q , so ergeben sich folgende C_w –Werte für unterschiedliche Versuchsparameter, welche in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt sind.

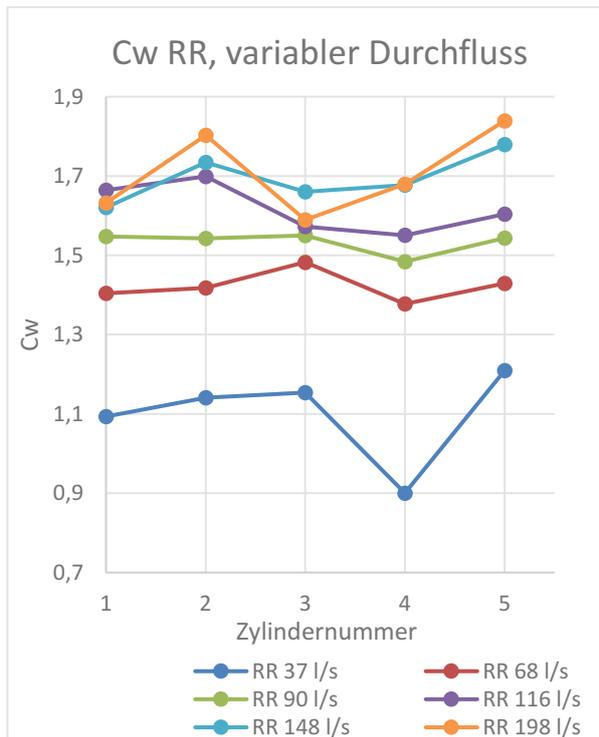


Abbildung 56: Widerstandsbeiwert aus mittlerer Geschwindigkeit für RR.

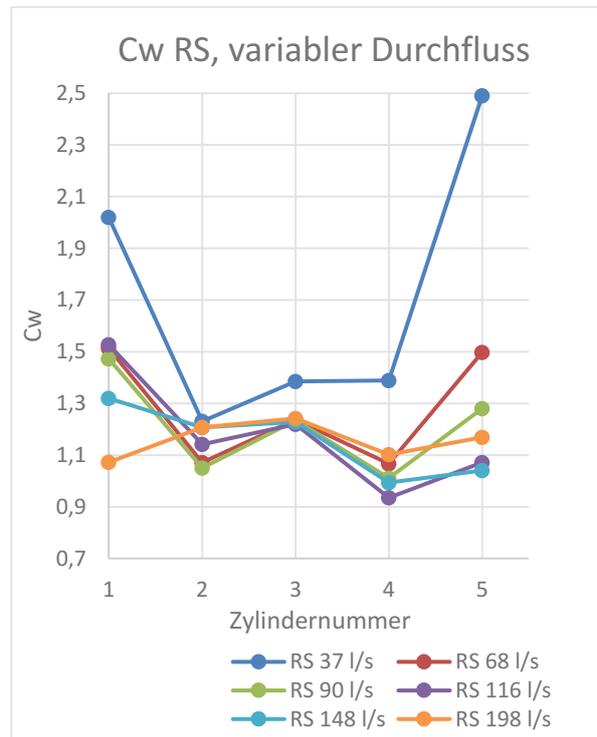


Abbildung 57: Widerstandsbeiwert aus mittlerer Geschwindigkeit für RS.

Abbildung 58 zeigt unterschiedliche Geschwindigkeiten zur Ermittlung des entsprechenden Widerstandsbeiwertes. Je näher die Ergebnisse einander sind, desto mehr gleichen die jeweiligen Ausgleichsgeraden dem Median $y= x$. Es lässt sich daraus ableiten, dass der C_w – Wert, wenn er mit der aus der Punktmessung ermittelten Geschwindigkeit errechnet wird besonders im Fall von rauher Sohle höher ausfällt, als wenn mit der Durchschnittsgeschwindigkeit U_Q gerechnet wird.

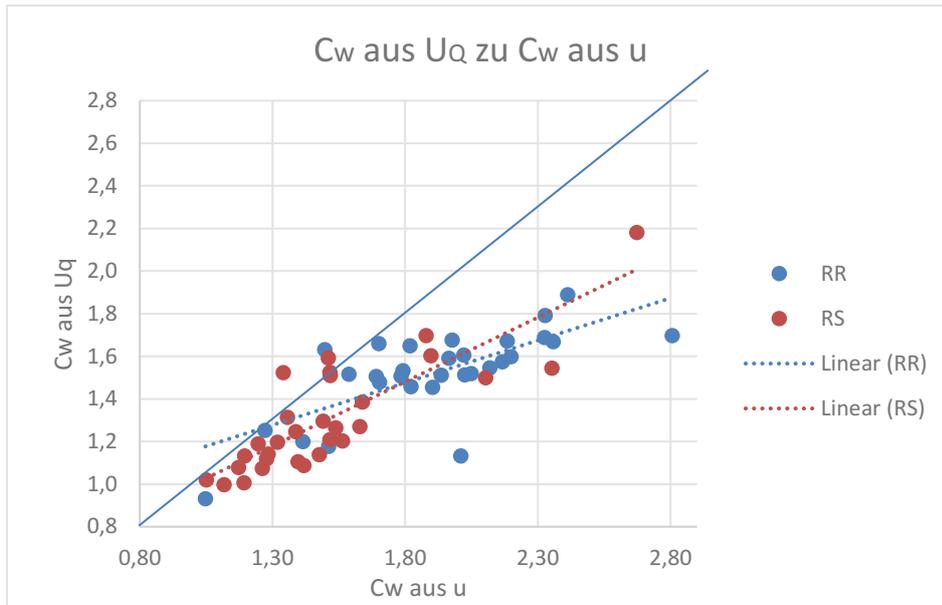


Abbildung 58: Widerstandsbeiwert ermittelt aus der mittleren Geschwindigkeit U_Q zu jenem aus der punktuell ermittelten Geschwindigkeit u .

In Abbildung 59 werden die Widerstandsbeiwerte, gebildet mit der Durchflussgeschwindigkeit U_Q und der punktuell ermittelten Geschwindigkeit u miteinander verglichen. Bei den dargestellten Durchflüssen kam es noch zu keiner Bildung von Oberflächenwellen, daher würde man sich zwischen den Zylindern zwei bis fünf nur einen geringen Unterschied im C_w – Wert erwarten. Aufgrund der Tatsache, dass die Punktmessung aber 15 cm vor den Zylindern stattgefunden haben, muss davon ausgegangen werden, dass sich diese bereits im Einflussbereich des Zylinderstaus befinden und daher schlecht zur Darstellung einer Anströmgeschwindigkeit geeignet sind.

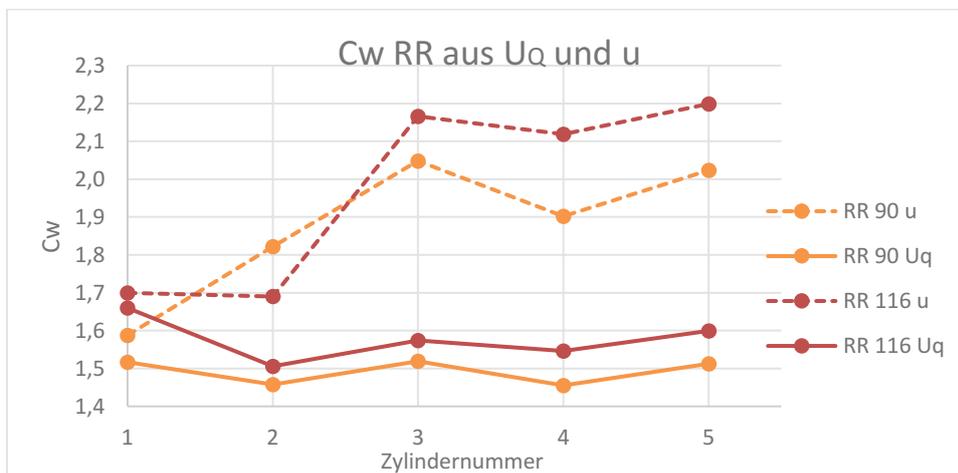


Abbildung 59: C_w gebildet aus mittlerer Geschwindigkeit U_Q und Punktmessung u .

$$\text{mit } F_d = \frac{1}{2} C_w \rho A_p v^2$$

Nimmt man einen Normalabfluss und Hydrostatik an so gilt weiters

$$P_1 = P_2 \quad Q = vA \quad \text{und} \quad v = v_1 = v_2$$

$$Av^2(\beta_2 - \beta_1) = \frac{1}{2} C_w A_p v^2$$

Mit Verbaugrad

$$BR = \frac{A_p}{A}$$

ergibt

$$C_{w,\beta} = \frac{2(\beta_2 - \beta_1)}{BR} \quad [7]$$

schlussendlich liefert die Korrektur des Verbaugrades die aus Kapitel 2.1.3 bekannte Gleichung:

$$C_w = C_{w,0}(1 - BR)^{-2}$$

Daher ist $C_{w,\beta}$ der Beitrag zur Ungleichförmigkeit im Geschwindigkeitsprofil auf den Gesamtwiderstand. Wird F_d direkt experimentell gemessen, dann ist $C_{w,\beta}$ der Beitrag, um den der über Impulsbilanz mit der Annahme $\beta_1 = \beta_2 = 1,0$ bestimmte C_w - Beiwert abgemindert werden muss. (Schnauder, 2020)

Abbildung 62 zeigt die modifizierten C_w – Werte wie in Gleichung 2 beschrieben. Besonders bei größeren Durchflüssen zeigt sich, dass eine Korrektur des Verbaugrades zu guten Ergebnissen führt. Nimmt man zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes also nicht die mittlere Geschwindigkeit aus dem Durchfluss U_Q sondern die tatsächlich gemessene Geschwindigkeit u und führt eine Korrektur des Verbaugrades durch, so kommt man zu einem Ergebnis, welches sehr nahe an den Daten von Wieselsberger (Siehe dazu Kapitel 2) liegt.

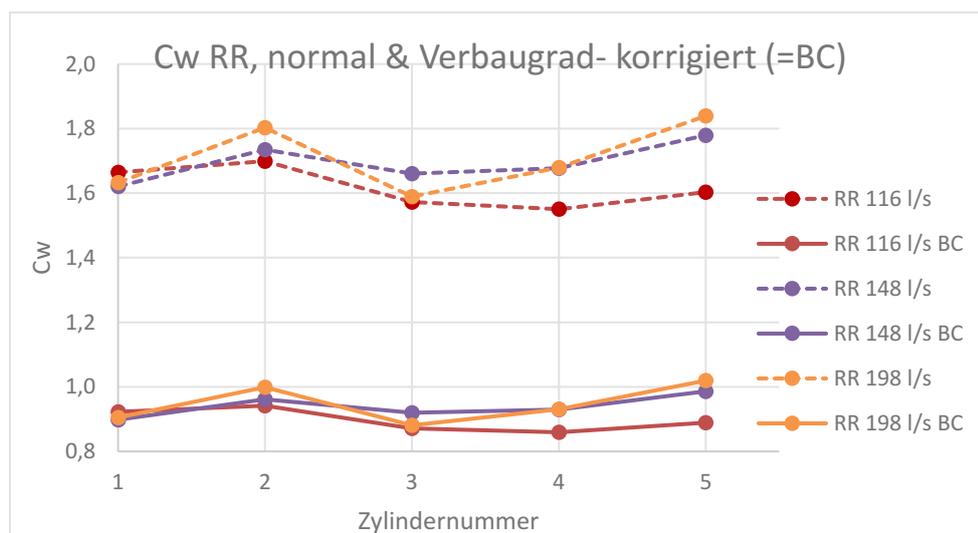


Abbildung 62: Widerstandsbeiwerte für höhere Durchflüsse, original und mit Korrektur des Verbaugrades.

5.3 Rauheitseinflüsse der Zylinderoberfläche

Es ist anhand Abbildung 63 erkennbar, dass für den rauen Zylinder keine Reduktion des C_w – Wertes vorliegt. Die Vermutung liegt nahe, dass nur Rauheiten bis zu einem gewissen Maß eine Verkleinerung des Widerstandsbeiwertes herbeiführen.

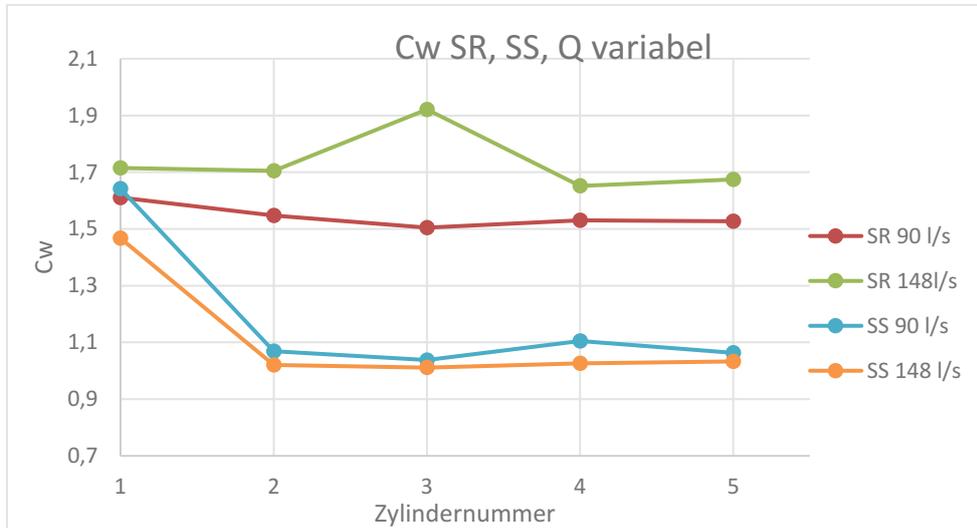


Abbildung 63: Vergleich zwischen SS und SR, C_w gebildet aus U_Q .

Ebenso führen raue Zylinder bei Versuchen mit rauer Sohle zu höheren Widerstandsbeiwerten (Abbildung 64).

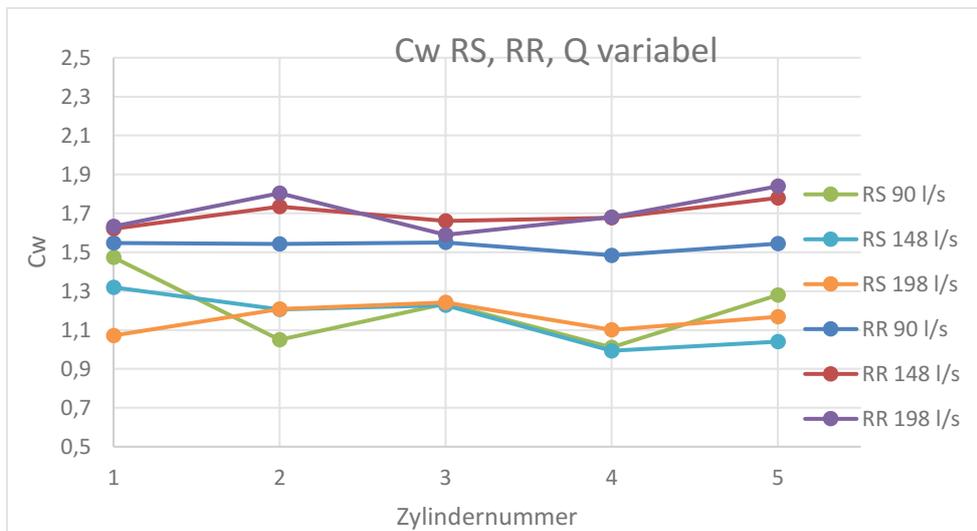


Abbildung 64: Vergleich von RS mit RR, C_w gebildet aus U_Q .

Unabhängig von der Sohlrauheit also führt eine raue Ummantelung des Versuchszylinders (bei diesem Aufbau) zu höheren C_w – Werten.

Es fällt auf, dass sich für die hier gewonnenen Versuchsergebnisse in der Literatur schwer Erklärungsansätze finden lassen, was auch auf den in Kapitel 1 erklärten Umstand zurückzuführen ist: In der Literatur führt eine Erhöhung der Zylinderrauheit immer zu einem geringeren Widerstandsbeiwert ("Golfball-Effekt"). Dadurch, dass der C_w - Wert von einer Vielzahl an Parametern abhängt, müssen bei den meisten Zusammenhängen aber auch die Versuchsbedingungen sowie deren Aufbau miteinander vergleichbar sein. Besonders die Turbulenz in der Anströmung, welche hier im Schnitt bei etwa 15- 20% liegt, setzt viele bestehende Zusammenhänge außer Kraft.

Bei genauerer Betrachtung der Geschwindigkeitsprofile wurde festgestellt, dass sich aufgrund der Sohlrauheit kaum Änderungen im Profil ergeben. Ebenfalls war der Abstand zwischen den Versuchszylindern zu groß, um das Profil der Anströmung so zu verändern, dass man sich die Versuchsergebnisse, insbesondere die erhöhten C_w – Werte bei rauem Zylindermantel daraus erklären könnte (engl. „interference drag“). Das bedeutet, dass der unterstromige Zylinder die Ablösung des davor gelegenen Zylinders nicht mehr beeinflussen kann bzw. umgekehrt.

Vernachlässigt man also den Einfluss der Zylinderzahl, so lässt sich aus den ermittelten Widerstandsbeiwerten ein Durchschnitt aus den 5 Messzylindern bilden. Dabei fällt ein Zusammenhang auf, welcher in Abbildung 65 dargestellt ist. Unabhängig der Sohlrauheit vergrößert sich der C_w – Wert bei zunehmender Reynoldszahl im Falle der rauhen Zylinderummantelung, bei glattem Zylindermantel ist genau das Gegenteil der Fall, hier verkleinert sich der Widerstandsbeiwert. Führt man noch eine standardmäßige Korrektur des Verbaugrades, wie in Kapitel 5.2 beschrieben durch, so erhält man eine Gesetzmäßigkeit, welche in weiterer Folge interpretiert wird.

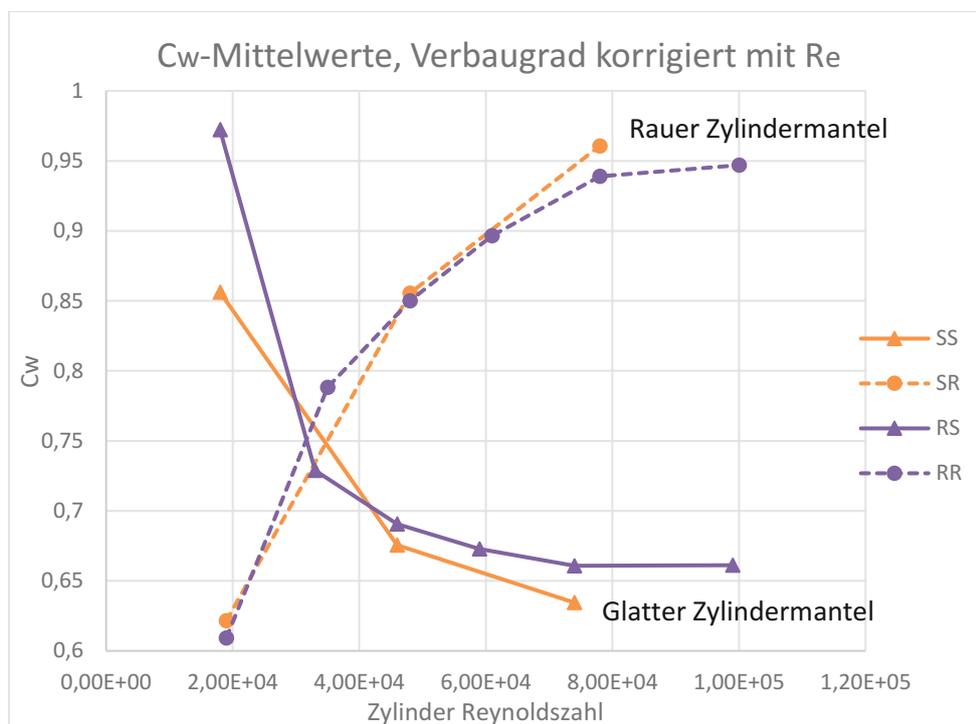


Abbildung 65: Mittelwerte des Widerstandsbeiwertes der fünf Zylinder, mit durchgeführter Korrektur des Verbaugrades, in Abhängigkeit des Reynoldsbereiches des jeweiligen Versuches.

Bei rauem Zylindermantel würde man sich gemäß des in Kapitel 2.1.5 erklärten Zusammenhangs eine Verschiebung der „drag crisis“ hin zu geringeren Re- Zahlen und für den untersuchten Reynoldsbereich eine Reduktion des Widerstandsbeiwertes erwarten. Aufgrund der Streifenrauheit der rauhen Zylinder liegt aber der Ablösepunkt ähnlich wie bei einem Körper mit eckigem Querschnitt näher am Staupunkt, also weiter in Richtung oberstrom als angenommen. Dadurch vergrößert sich die Nachlaufzone, und damit auch der zugrunde liegende C_w – Wert.

Abbildung 66 zeigt einen Zylinder mit Streifenrauheit (blau) sowie einen Körper mit rechteckigem Querschnitt (grau), beide verursachen einen gleich großen Nachlauf, auch die Lage des Ablösepunktes ist weit vorne.

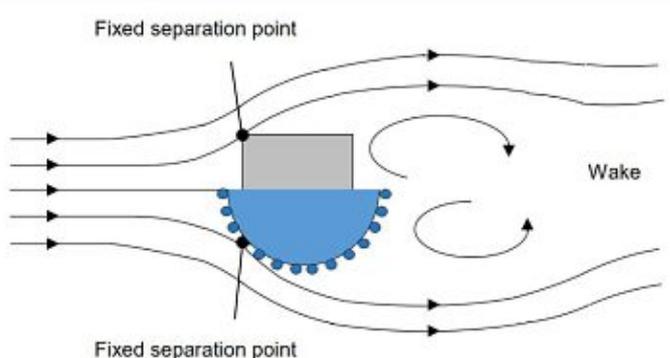


Abbildung 66: Rauheitswirkung und Ablösepunkt bei einem eckigen Querschnitt (oben), sowie bei einem Zylinder mit aufgebrachtter Streifenrauheit (unten). (Grafik Schnauder 2021)

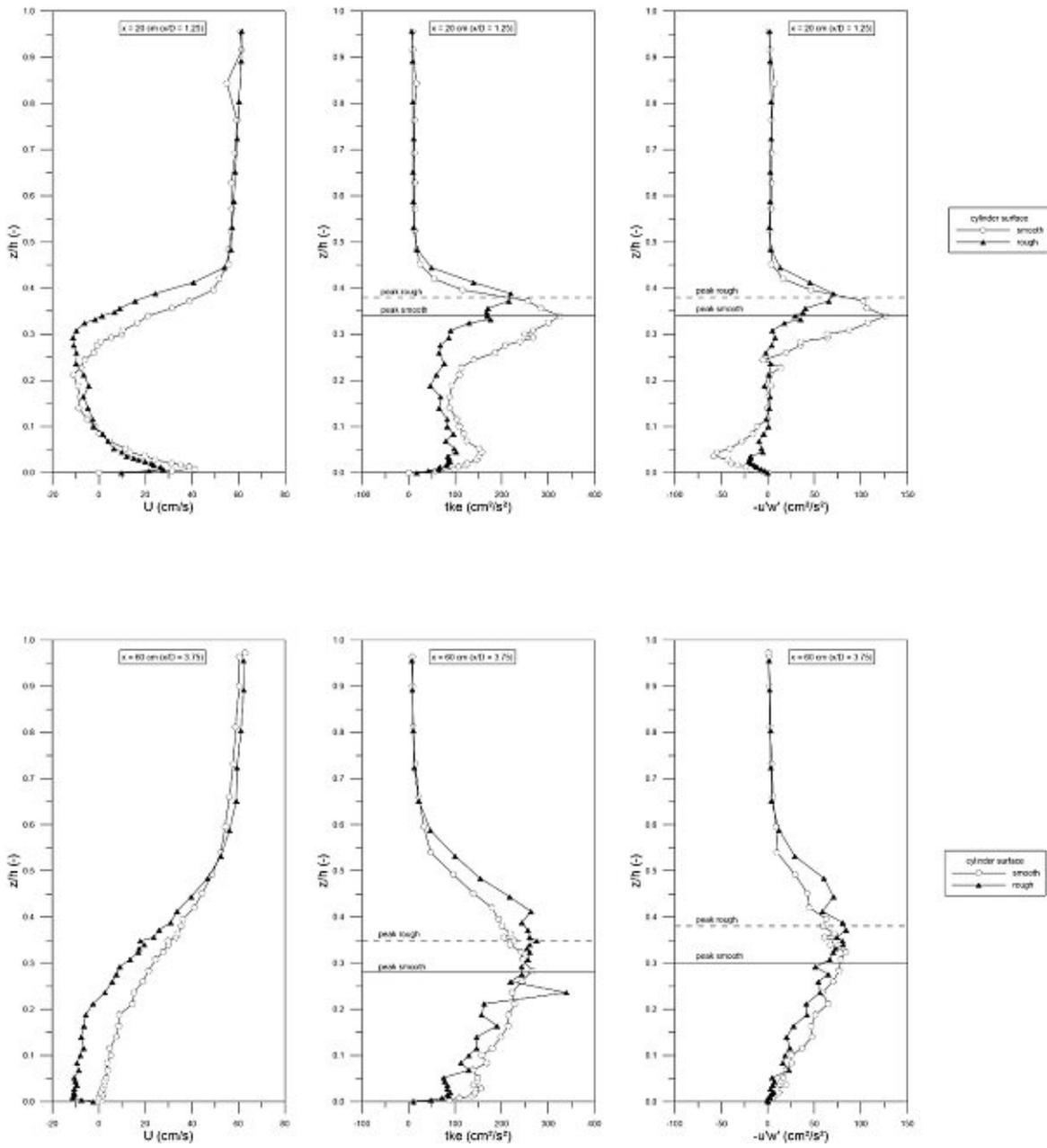


Abbildung 67: Vertikalprofile für Geschwindigkeit, Turbulente kinetische Energie und Schubspannung im Fall „Anouk case“. (Grafik Schnauder, 2021)

Eine mögliche Erklärung für den höheren Widerstandsbeiwert liefern detaillierte Messungen um einen Zylinder, welcher 2cm über der Sohle befestigt war und im Rahmen eines weiteren TU- Projekts im Labor untersucht wurde (Abbildung 67).

Betrachtet man die Verteilung der Schubspannung $u'w'$, so fällt auf, dass das Maximum (engl. „peak“) für den Fall des rauhen Zylinders über jenem des glatten (engl. „smooth“) liegt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Nachlaufzone des rauhen Zylinders größer ist als jene des glatten. Mit der Größe des Nachlaufes steigt auch der C_w – Wert, was die Annahme, dass die auf dem Zylinder aufgebrauchte Streifenrauheit einen ähnlichen Nachlauf wie ein Körper mit eckigem Querschnitt produziert, bestätigt.

Bei dieser Versuchsreihe wurde ein Zylinder mit 16 cm Durchmesser zuerst am Boden befestigt (engl. „attached“) und ein weiteres Mal ein 1 cm breiter Spalt zwischen Zylinder und Sohle belassen (engl. „detached“). Die Zylinderrauheit wurde ebenfalls verändert, wobei glatt und rau die gleichen Werte für k_s annimmt wie bei den in Kapitel 3 beschriebenen Versuchen. Zu beiden Varianten sind Geschwindigkeitsprofile gemessen und ausgewertet worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 68 dargestellt und zeigen, dass auch für einen unterschiedlichen Versuchsaufbau der raue Zylinder durch eine frühe Ablösung einen größeren Nachlauf induziert.

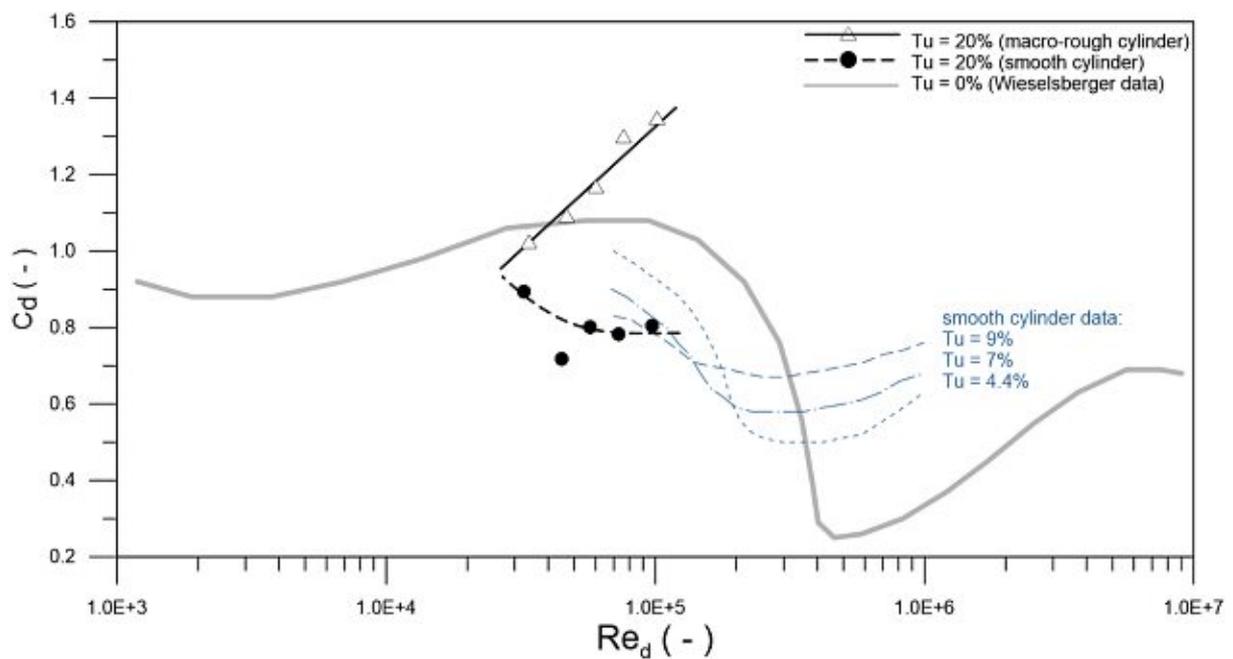


Abbildung 68: Ermittelte Widerstandsbeiwerte (schwarze Linien) im Vergleich mit bestehenden Daten. (Grafik Schnauder, 2021)

Auch kann ein Einfluss von Oberflächenwellen ausgeschlossen werden, da es bei geringeren Durchflüssen und daher geringeren Zylinder- Reynoldszahlen zu keiner Bildung von Oberflächenwellen kam. Jene Widerstandsbeiwerte, welche für $Re = 1 \cdot 10^5$ dargestellt sind, wurden bei Wellen gemessen, trotzdem liegen sie mit den anderen auf einer Geraden.

Dargestellt sind die Ergebnisse der eigenen, in Kapitel 4.1 beschriebenen Versuche, sowohl für raue Zylinder (weiße Dreiecke) als auch für glatte (schwarze Punkte). Zusätzlich sind für Turbulenzintensitäten von 4,4%, 7% und 9% die Verteilungen des Widerstandsbeiwertes aufgetragen (Cheung & Melbourne). Man erkennt, dass sich für zunehmende Turbulenz die „drag crisis“ in einen Bereich mit niedriger Reynoldszahl verlagert und dann stark abnimmt, also es bei niedrigeren Werten von Re zu einer sprunghaften Verkleinerung des C_w – Wertes kommt. Man erkennt, dass sich die gemessenen Widerstandsbeiwerte für die glatten Zylinder mit $Tu = 20\%$ ähnlich verhalten und sich entsprechend verschoben haben.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Laborversuche zur Widerstandskraft von Flussholz in Gewässern durchgeführt. Dazu wurden 5 Kreiszyylinder hintereinander liegend in einer Versuchsrinne angebracht und anschließend Kraftmessungen, sowie Geschwindigkeitsmessungen bei Durchflüssen zwischen 37 l/s und 200 l/s durchgeführt. Dabei wurde neben dem Durchfluss auch noch die Mantelrauheit der Zylinder, als auch die Sohlrauheit variiert. Es wurde festgestellt, dass die resultierende Kraft auf den Zylinder wesentlich von der entsprechenden Anströmgeschwindigkeit abhängt und daher die mittlere Geschwindigkeit aus dem Durchfluss zu deren Berechnung nicht empfehlenswert ist.

Ebenfalls wichtig ist die Turbulenz der Anströmung. Dadurch, dass bei den Versuchen, welche für diese Diplomarbeit durchgeführt worden sind, der Turbulenzgrad etwa 10- 15% beträgt, lassen sich kaum vergleichbare Berechnungsansätze dazu finden. Dadurch, dass sich Sohlrauheit und Wandrauheit sowie die Abstände der Zylinder zueinander und deren Größenverhältnisse im Geschwindigkeitsprofil der Anströmung zusammenfassen lassen, können diese Einflüsse auf den Widerstandsbeiwert in die Eigenschaften der Anströmung, sowie in lokale Eigenschaften untergliedert werden.

Im Falle der Eigenschaften der Anströmung hat zweifelsfrei das Geschwindigkeitsprofil der projizierten Anströmgeschwindigkeit, welches unbeeinflusst vom Zylinderstau ist, den größten Einfluss. Zusätzlich dazu kann die Turbulenzintensität der Anströmung nicht im Geschwindigkeitsbegriff erfasst werden und bedarf daher einer gesonderten Betrachtung.

Zu den lokalen Eigenschaften zählen der Verbaugrad und die Zylinderrauheit. Diese beeinflussen den Zylinder unmittelbar bei der Umströmung und können daher nicht durch das zugrunde liegende Geschwindigkeitsprofil der Anströmung beschrieben werden. Der Verbaugrad führt bei zunehmender Verbauung zu einem erhöhten C_w – Wert, die Zylinderrauheit hat Auswirkungen auf die Größe des Nachlaufes.

Entgegen der Erwartungen kommt es bei Zylinder mit einer Streifenrauheit von $k= 2\text{mm}$ und hohen Turbulenzintensitäten zu einer Vergrößerung des C_w – Wertes, da sich eine frühe Ablösung ausbildet, womöglich ein fixer Ablösepunkt ähnlich wie bei einem Körper mit eckigem Querschnitt und dieser einen größeren Nachlauf zur Folge hat.

Es konnte gezeigt werden, dass bei größerem Verbaugrad $d/H= 0,25$ und Streifenrauheiten von etwa $k= 2\text{mm}$ ein in der Vergangenheit noch nicht charakterisiertes Fließregime entdeckt wurde.

7. Literaturverzeichnis

JIRKA GERHARD: Einführung in die Hydromechanik (2007); Universitätsverlag Karlsruhe; ISBN 9783866441583

NAUDASCHER EDUARD: Hydrodynamic forces (1991); A.A. Balkema, P.O. Box 1675, 3000 BR Rotterdam, Netherlands; A.A. Balkema Publishers, Old Post road, Brookfield, VT 05036, USA Universität Karlsruhe, ISBN 9061919932

ROBERTSON FRANCIS HENRY: An experimental investigation of the Drag and idealised Rigid, emergent Vegetation and other Obstacles in Turbulent Free-Surface flows. (2016) University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering

TRUCKENBRODT ERICH: Fluidmechanik. Band 1, Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Berlin 2008, ISBN 9783540790181

POWELL MARK: Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research; Department of Geography, Univeristy of Leicester LE1 7RH, United Kingdom. Published 2014 Elsevier B.V.

ABBASPOUR AKRAM, FARSADIZADEH DAVOOD: Velocity measurements of a free-surface turbulent flow over smooth and rough beds; Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Published in Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, 2014.

VANONI VITO, BROOKS NORMAN: Laboratory studies oft he roughness and suspended load of alluvial streams. Final Report to Corps of Engineers, U. S. Army Missouri Division contract DA -25-075-eng-3866. Sedimentation Laboratory, California institute of Technology; December 1957

JUNKE GUO: (2015) Sidewall and non-uniformity corrections for flume experiments, Journal of Hydraulic Research, 53:2, 218-229, DOI: 10.1080/00221686.2014.971449

JIRKA GERHARD, LANG CORNELIA: Gerinnehydraulik; Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (2009).

BEZZOLA, G. R. (2002): Fließwiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. Mitteilungen Nr. 173.

DITTRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH). Heft 198.

WALLERSTEIN et al. (2002): Surface Wave Forces Acting on Submerged Logs, Journal of Hydraulic engineering, march 2002. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429 (2002)128:3 (349)

8. Zitate

URBANEK B., HINTERHOFER M., KUMMER H.: Totholz in Fließgewässern; Literaturrecherche und Analyse ausgewählter Aspekte. Universität für Bodenkultur Wien, Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur/ Institut für Wasserversorgung, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft. *Einleitung*.

JIRKA GERHARD, LANG CORNELIA: Gerinnehydraulik; Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (2009). *Verzeichnis der Formelzeichen*.

DITTRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH). Heft 198. *Definition Turbulenz*

Carl- Enger- Schule Karlsruhe: Lineare Regression; www.ces.karlsruhe.de/culm/; Formelsammlung (carl-engler-schule.de). *Einflüsse beim Kalibriervorgang; Hysterese*.

ROBERTSON F. H.: An experimental investigation of the Drag and idealised Rigid, emergent Vegetation and other Obstacles in Turbulent Free-Surface flows. (2016) University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. *Zylinderrauheit*.

9. Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abbildung 1. Zusammenhang zwischen Reynoldszahl und Widerstandsbeiwert für Kreiszyylinder. (Jirka, 2009) | 7 |
| Abbildung 2. Turbulenzabhängigkeit des (a) C_w - Wertes und (b) der Strouhalzahl (Cheung & Melbourne, 1983)..... | 8 |
| Abbildung 3: Veränderung des Reynoldsbereiches aufgrund wachsenden Verhältnisses von Durchmesser d des Zylinders und Abflusshöhe H | 9 |
| Abbildung 4: Noppenbahn zur Vergrößerung der Sohlrauheit. | 10 |
| Abbildung 5 Datenzusammenstellung aus Dittrich (1998) zur Ermittlung der Sandrauheit..... | 10 |
| Abbildung 6: Darstellung zur Ermittlung der Flächen zur Berechnung von ck . (Grafik Bezzola 2002) . | 10 |
| Abbildung 7: Skizze zweier Kreiszyylinder mit unterschiedlich angeordneten Ablösepunkten mit einer (a) laminaren und (b) turbulenten Grenzschicht. (Grafik Robertson, 2016)..... | 11 |
| Abbildung 8: Einfluss der Zylinderrauheit auf die Druckverteilung (a) und den Widerstandskoeffizienten (b) nach Fage & Warsop (1929). | 12 |
| Abbildung 9: Sekundärströmungen und Isovelen u/V in | 12 |
| Abbildung 10: Einfluss von Oberflächenwellen auf den C_w - Wert in Abhängigkeit der Zylinderabmessungen L/d und der Einbauhöhe z/d . (Grafik Wallerstein, 2002) | 13 |
| Abbildung 11: Einfluss von Abstand und Durchmesser für $Re= 105$ nach Brun (1963)..... | 14 |
| Abbildung 12: Einfluss des Abstands für zwei hintereinander liegende Zylinder. S beschreibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder, D ist der Zylinderdurchmesser (Zdravkovich). | 14 |
| Abbildung 13: Einfluss des Seitenverhältnisses auf den C_w - Wert nach Prandtl et al. (1923)..... | 15 |
| Abbildung 14: Schnitt durch einen Messzylinder mit rauem Mantel ($d=11,5\text{cm}$). | 17 |
| Abbildung 15: Innenbereich eines Messzylinders mit Schiebevorrichtung. | 17 |
| Abbildung 16: Übersicht von der Versuchsrinne und dem Arbeitsplatz. Zu sehen sind die eingebauten Zylinder und das Geschwindigkeitsmessgerät. | 17 |
| Abbildung 17: Anzahl und Abstände der Zylinder. Längenangaben in cm..... | 18 |
| Abbildung 18: Schnitt durch die Versuchsrinne. | 18 |
| Abbildung 19: Unbeeinflusstes Geschwindigkeitsprofil (a) und Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils durch einen Schieber (b). | 19 |
| Abbildung 20: Zylinder mit Geschwindigkeitsmessgerät und Abstandhalter. | 20 |
| Abbildung 21: Einlaufbedingungen mit entsprechenden Anpassungen: 1. Verlängerungsstützen, 2. Lamellenblech, 3. Gleichrichter, 4. Hartschaumplatte. Längenangaben in cm..... | 20 |
| Abbildung 22: Einlaufbauwerk im Detail. Längenangaben in cm..... | 21 |
| Abbildung 23: Zulaufbereich, von links nach rechts sind zu sehen: Die Hartschaumplatte, der Gleichrichter und das Lamellenblech. | 21 |
| Abbildung 24: Detail Gleichrichter. Die im Schnitt dargestellten Röhren sind hexagonal und haben eine Breite von etwa 5cm..... | 22 |
| Abbildung 25: Detail Lamellenblech. Lamellen ausgebildet als L- Winkel, überlappende Anordnung. Die Breite wurde den Abmessungen der Versuchsrinne angepasst. | 22 |
| Abbildung 26: Gewichtskraft zur Kalibrierung. | 23 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 27: Mit einer Wasserwaage wird die Einbaurichtigkeit bestätigt. Zu sehen ist außerdem der Faden, über welchen die Gewichtskraft auf den Zylinder übertragen wird. | 23 |
| Abbildung 28: Kalibrieren durch Aufbringen von Federkräften..... | 24 |
| Abbildung 29 (a) Ansicht des Kalibrieraufbaus und (b) Detailansicht der Messzellen..... | 25 |
| Abbildung 30: Kalibriervorrichtung. | 26 |
| Abbildung 31: Spannungsänderung zufolge von Temperatur und stehender Welle bei geschlossenem Schieber..... | 26 |
| Abbildung 32: Versuchsaufbau im Trockenen..... | 27 |
| Abbildung 33: Spannungsdiagramm bei erfolgreichem Kalibriervorgang. | 27 |
| Abbildung 34: Kalibriergerade mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,998$. Abzulesen sind die Steigung k und der Schnittpunkt der Ordinate d | 28 |
| Abbildung 35: Hysterese- Effekt bei einem Kalibriervorgang. | 29 |
| Abbildung 36: Punktmessung 15cm vor dem Zylinder..... | 31 |
| Abbildung 37: Logarithmisches Geschwindigkeitsprofi einer Wandgrenzschicht ohne Störkörper (links) und Abweichung der erwarteten Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Einbauhöhe des Störkörpers (rechts). (Grafik Schnauder 2020)..... | 32 |
| Abbildung 38: Unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile in der Anströmung, der linke Zylinder ist von der Einbauhöhe abhängig, während der stromabwärts (rechts) liegende Zylinder sowohl vom oberstromigen Zylinder als auch von der Lage bezüglich der Wandgrenzschicht abhängt. (Grafik Schnauder 2020). | 33 |
| Abbildung 39: Vorrichtung für die Geschwindigkeitsmessung. Das Messgerät kann innerhalb der Rinne vertikal, als auch horizontal bewegt werden und deckt so den gesamten Querschnitt ab. (Skizze nicht maßstäblich dargestellt)..... | 34 |
| Abbildung 40: Anordnung der gemessenen Punkte. Messpunkte in Wandnähe (rot) und in der Mitte des Fließquerschnittes (grün)..... | 34 |
| Abbildung 41: Gemessene Querschnitte (1- 5+) mit Abständen, Angabe in cm..... | 34 |
| Abbildung 42: Autokorrelation für eine Messung von 2 Minuten. Gut erkennbar ist in diesem Fall ein Peak bei etwa 1,5 Hz. | 35 |
| Abbildung 43: Punktuell gemessene Geschwindigkeit, 15cm vor den Zylindern. | 36 |
| Abbildung 44: Analyse und Filterung mit „Explore ADV“; nach einer Überprüfung der Daten und einer Bereinigung sind hier keine Spikes mehr vorhanden..... | 37 |
| Abbildung 45: Zusammengesetztes Profil aus 17 Messpunkten mit einem Vertikalabstand von je 2,5cm..... | 37 |
| Abbildung 46: Kraft auf die Versuchszylinder für glatte Sohle und glatte Zylinder (SS), sowie glatte Sohle und raue Zylinder (SR). | 38 |
| Abbildung 47: Kraft auf die Versuchszylinder für raue Sohle und glatte Zylinder (RS), sowie raue Sohle und raue Zylinder (RR)..... | 39 |
| Abbildung 48: Erhöhte Kraft auf Zylinder RR im Vergleich zu Zylinder RS für unterschiedliche Durchflüsse..... | 39 |
| Abbildung 49: Punktuell gemessene Geschwindigkeit für SR und SS. | 40 |
| Abbildung 50: Punktuell gemessene Geschwindigkeit für RS und RR..... | 40 |
| Abbildung 51: Vertikalprofile für Geschwindigkeit, Turbulente kinetische Energie und Schubspannung für Zylinder 1- 5+. (Grafik Schnauder) | 42 |
| Abbildung 52: Wellenbildung bei höherem Durchfluss. | 43 |
| Abbildung 53: Die Maximale Wasserspiegeldifferenz mithilfe eines Maßbandes bestimmt. | 43 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 54: Veränderungen der Sohlrauheit sind im Geschwindigkeitsprofil nur merkbar bis zu einer Wassertiefe von $z/h = 0,15$ | 44 |
| Abbildung 55: Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit von der mittleren, aus dem Durchfluss errechneten Geschwindigkeit für Zylinder 1 bis 5+. | 44 |
| Abbildung 56: Widerstandsbeiwert aus mittlerer Geschwindigkeit für RR. | 45 |
| Abbildung 57: Widerstandsbeiwert aus mittlerer Geschwindigkeit für RS..... | 45 |
| Abbildung 58: Widerstandsbeiwert ermittelt aus der mittleren Geschwindigkeit UQ zu jenem aus... .. | 46 |
| Abbildung 59: C_w gebildet aus mittlerer Geschwindigkeit UQ und Punktmessung u | 46 |
| Abbildung 60: Einfluss der Blockierung ($T_u = 0,5\%$ für $B/d = 2$, $T_u = 1,5\%$ für $B/d = 6$) nach Richter & Naudascher (1976). | 47 |
| Abbildung 61: Impulsbilanz für ein definiertes Kontrollvolumen (Grafik Schnauder). | 47 |
| Abbildung 63: Widerstandsbeiwerte für höhere Durchflüsse, original und mit Korrektur des Verbaugrades. | 48 |
| Abbildung 63: Vergleich zwischen SS und SR, C_w gebildet aus UQ | 49 |
| Abbildung 64: Vergleich von RS mit RR, C_w gebildet aus UQ | 49 |
| Abbildung 65: Mittelwerte des Widerstandsbeiwertes der fünf Zylinder, mit durchgeführter Korrektur | 50 |
| Abbildung 66: Rauheitswirkung und Ablösepunkt bei einem eckigen Querschnitt (oben), sowie bei einem Zylinder mit aufgebrachtter Streifenrauheit (unten). (Grafik Schnauder 2021) | 51 |
| Abbildung 67: Vertikalprofile für Geschwindigkeit, Turbulente kinetische Energie und Schubspannung im Fall „Anouk case“ | 51 |
| Abbildung 68: Ermittelte Widerstandsbeiwerte (schwarze Linien) im Vergleich mit bestehenden Daten. (Grafik Schnauder, 2021) | 52 |

Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Formelzeichen für die Definition der Turbulenz..... | 8 |
| Tabelle 2: Abmessungen der | 10 |
| Tabelle 3: Auswertung für verschiedene Formen von Störkörpern. Die äquivalente..... | 11 |
| Tabelle 4: Versuchskennung..... | 16 |
| Tabelle 5: Parameter der Versuche..... | 16 |
| Tabelle 6: Angenommene Geschwindigkeiten und Durchmesser. | 18 |
| Tabelle 7: Die für die Auswertung der Daten verwendeten Kalibriergeraden. Da zwei Varianten zur Verfügung standen, wurde jeweils die Gerade mit größerem R^2 herangezogen. | 29 |
| Tabelle 8: Abweichung des tatsächlichen Durchflusses vom gewünschten Durchfluss. | 30 |
| Tabelle 9: Durchfluss und Standardabweichung. Der Prozentwert beschreibt die Pumpenleistung. .. | 36 |
| Tabelle 10: Durchschnittliche Turbulenz der Anströmung..... | 41 |
| Tabelle 11: Gemessene Wellenhöhe, Angabe in mm. | 43 |