

Strömungswiderstand und Turbulenzen von Körpern

Oliver de Bruijn, Marcel Hildebrandt, Fabian Symietz, Philipp Warzecha

Physikalische Grundlagen

Strömungen und Turbulenzen gehören zu den interessantesten physikalischen Phänomenen in Natur und Technik: Von fließenden Gewässern, sich ändernden Wetterlagen und dem aerodynamischen Verhalten von Mensch und Maschine bis hin zu Plasmen in Sonnen und Reaktoren. Der Versuch behandelt das Strömungsverhalten (explizit c_w -Werte) und die Turbulenzbildung unterschiedlicher Körper in Luft, Wasser und Öl.

Die mathematische Grundlage zur Beschreibung von reibungsbehafteten newtonschen Fluiden wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, nach Vorarbeiten von Leonard Euler, unabhängig voneinander durch Claude Navier und George Stokes gelegt (Navier-Stokes Gleichung). Die mathematische Lösung dieser Gleichung gestaltet sich als schwierig und ist auch nach fast 200 Jahren noch nicht vollständig gelungen. Eine Vereinfachung für reibungsfreie, ideale Gase findet sich in der erstmals von Daniel Bernoulli aufgestellten Bernoulli-Gleichung:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 c_w = const. \quad (1)$$

Auf dieser Grundlage lassen sich wichtige Kenngrößen für die Beschreibung umströmter Körper herleiten. Für den Versuch von besonderem Interesse ist hierbei der c_w -Wert (Strömungswiderstands-Wert):

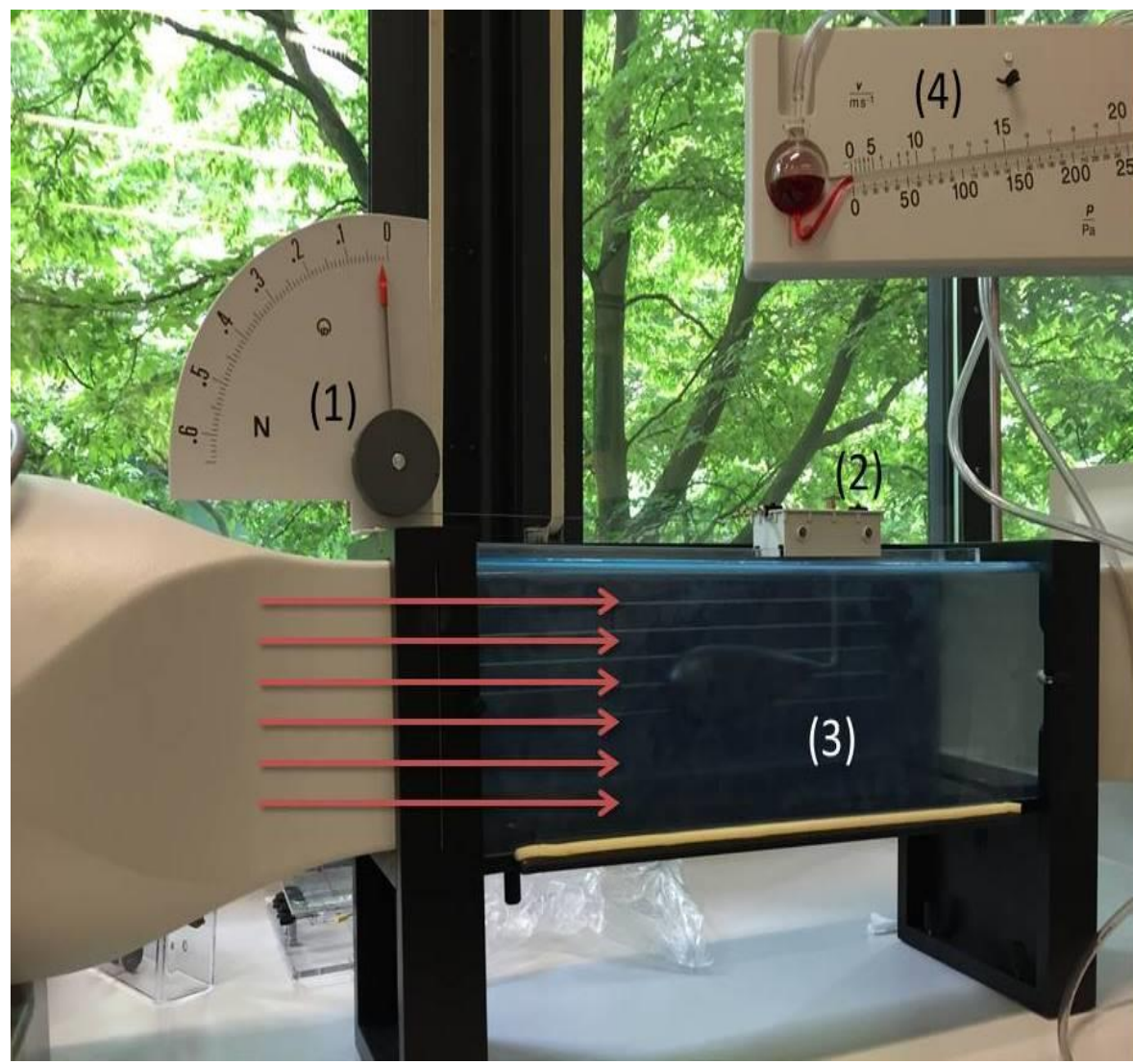
$$c_w = \frac{2 * F_w}{\rho * v^2 * A} \quad (2)$$

Die beim Versuch entstehenden Turbulenzen wurden qualitativ untersucht. Zur Berechnung der Dichte von Luft nutzen wir folgende Formel¹, die sich aus der idealen Gasgleichung ableiten lässt:

$$\rho = \frac{P}{R_f * T}; R_f = \frac{R_l}{1 - \varphi * \frac{p_d}{P} * (1 - \frac{R_l}{R_d})} \quad (3)$$

ρ : Dichte, v : Geschwindigkeitsvektor, P : Druck, μ : dynamische Viskosität, φ : rel. Luftfeuchtigkeit, p_d : Sättigungsdampfdruck, g : Gravitationsbeschleunigung, h : Höhe, c_w : Strömungswiderstandswert, F_w : Widerstandskraft, A : Normalfläche, R_d : Gaskonstante Wasserdampf, R_l : Gaskonstante trockene Luft

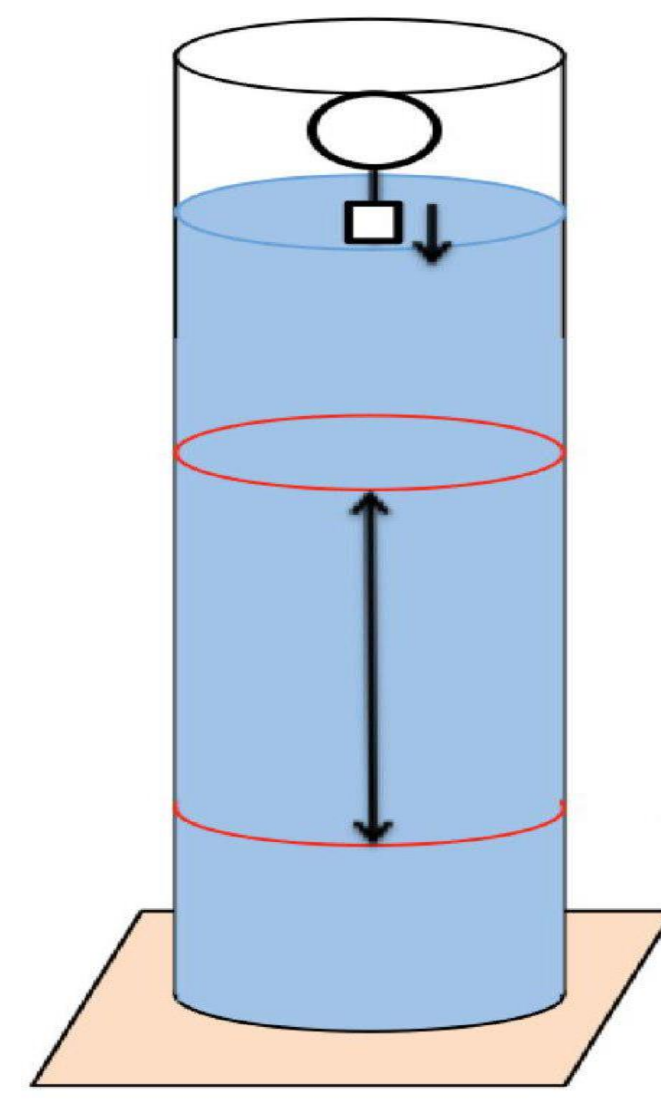
Aufbau und Durchführung



Windkanal

Messkörper: Kugel, Tropfen, großer & kleiner Zylinder
Messinstrumente: Kraftmesser (1), Drucksonde nach Prandtl incl. Feinnanometer (4), Windkanal, Schieblehre
Sonstiges: Rollwagen (2) mit Körperbefestigung (3)

1. Ausmessung der Körper mittels Schieblehre
2. Messung der Widerstandskräfte der Körper im Windkanal bei drei verschiedene Geschwindigkeiten.
3. Messung der Geschwindigkeit im Windkanal mittels (4)
4. Berechnung der c_w -Werte der Körper



Fluidröhre

Messkörper: siehe Windkanal und zwei kleine Gewichte (100g, 200g)
Messinstrumente: Schieblehre, Plexiglas-Fluidrohr (2m Länge, 14cm Innendurchmesser), Videokamera (240fps)
Sonstiges: Auffangsieb, Holzstab als Angel, Schmelzgranulat (rot) 1kg, 25 Liter Wasser, 25 Liter Rapsöl

1. Ausmessung der Körper mittels Schieblehre und Feinwaage
2. Zwei Markierungen (1),(2) als feste Fallstrecke
3. 5 Highspeed-Videoaufnahmen vom Fall pro Körper pro Fluid (Gewichte zum Überwinden der Auftriebskraft an die Körper hängen)
4. Highspeed-Videoaufnahmen und Fotos vom Fall des Körpers im Schmelzgranulat, um Turbulenzen sichtbar zu machen.
5. Berechnung der c_w -Werte der Körper

Messwerte und Auswertung

Körper	Volumen / cm ³	Gewicht / g	Querschnittsfläche / cm ²	c_w -Wert Windkanal	c_w -Wert Wasser	c_w -Wert Öl
Kugel	95	29,08	24,15	0,35±0,06 (17%)	0,78±0,09 (11,5%)	1,09±0,13 (11,9%)
Kl. Zylinder	34	13,82	24,63	1,24±0,12 (9,7%)	1,99±0,19 (9,5%)	1,83±0,21 (11,5%)
Gr. Zylinder	76	21,61	50,20	1,51±0,14 (9,3%)	4,1±0,3 (7,3%)	2,80±0,24 (8,6%)
Tropfen	212	66,09	24,28	0,15±0,05 (33,3%)	0,48±0,09 (18,8%)	0,91±0,16 (17,6%)
Kl. Gewicht	12	99,94	3,836	-----	1,9±0,3 (15,8%)	-----
Gr. Gewicht	20	200,06	6,268	-----	2,1±0,3 (14,3%)	-----

Gemäß Formel (2) wurden die c_w -Werte aus den Messwerten berechnet und als Endergebnis jeweils der gewichtete Mittelwert angegeben. Der jeweilige Fehler wurden nach Gauß und Summenregel aus den Fehlern für die Messwerte ermittelt. Die Dichte von Wasser und Rapsöl stammen aus der Literatur² und die Dichte der Luft wurde aus den Labormessdaten von Luftfeuchtigkeit (46%), Druck (1028hPa), Temperatur (23°C) mittels Formel (3) berechnet.

Die Widerstandskraft für die Fluidröhre wurde als Differenz von Gewichtskraft F_g und Auftriebskraft F_A berechnet. Hierbei wurden die Volumina und Massen der angehängten Gewichte beachtet. Die maximale Fallgeschwindigkeit in der Fluidröhre wurde mittels des Programms „Tracker³“ aus dem aufgenommenen Videomaterial berechnet.

Fehlerquelle: Im Fluidversuch stießen die Körper häufig mit der Wand, wodurch die Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht wurde. Dies erklärt die im Gegensatz zum Windkanal deutlich vergrößerten c_w -Werte. Im Öl fielen die Körper, durch die höhere Viskosität, stabiler, weshalb durch eine geringere Anzahl an Stößen die c_w -Werte etwas kleiner sind als beim Wasser.

Die c_w -Werte aus der Literatur⁴ (Kugel: 0,4 Zylinder: 1,2 Tropfen: 0,06) stimmen in erster Näherung gut mit den c_w -Werten aus dem Windkanal überein.

Weiterhin wurden die **Turbulenzeigenschaften** der Körper untersucht. Hierfür wurden Fotos und Videos aufgenommen, in denen man die Verwirbelungen durch die Körper gut erkennen kann.

Fazit

Unser Ziel war es, nähere Erkenntnisse zum c_w -Wert in Abhängigkeit von der Geometrie und dem Medium zu gewinnen. Weiterhin sollte die Turbulenzentstehung in Hinblick auf c_w -Wert und Körpergeometrie untersucht werden. Unser Versuch hat folgende Ergebnisse geliefert:

1. Geringe Asymmetrien der Körper führen zu gänzlich instabilen Fallverhalten in den Fluiden, wodurch die ursprüngliche Idee bearbeitbare Körper aus Speckstein zu verwenden aufgegeben werden musste.
2. Je gleichmäßiger die Geometrieveränderung entlang des Körpers verläuft (stromlinienförmig) (Beispiel Kugel, Tropfen) desto geringer ist der c_w -Wert und desto geringer die Turbulenzenstehung.
3. Die Stärke der Turbulenzen nimmt mit dem c_w -Wert zu. Der Tropfen fiel somit fast turbulenzfrei.
4. Die Unabhängigkeit der c_w -Werte vom äußeren Medium konnte wegen den Stößen mit der Wand im Fluidversuch nicht nachgewiesen werden, weil dadurch nicht die Maximalgeschwindigkeit erreicht wurde, jedoch sind die Reihenfolge der c_w -Wert und die Unterschiede zwischen den Körpern unabhängig vom Medium erhalten geblieben.
5. Die c_w -Wert aus dem Windkanal stimmen in erster Näherung mit den Literaturwerten⁴ überein
6. Die folgenden Bilder zeigen gut die Turbulenzen rund um die unterschiedlichen Körper.

