

Versuch zur Simulation eines Wirbelrohrs in OpenFOAM

Versuchsauswertung

Vinzenz Götz
00107303

Prof. Dr. Konrad Költzsch

17.01.2022

Abstract

Der folgende Bericht fasst den Zwischenstand der Simulation eines Wirbelrohres zusammen. Das (Ranque-Hilsch-)Wirbelrohr wurde von G. Ranque erfunden [Ran34] und enthält keine beweglichen Teile.

In einem Wirbelrohr wird ein tangential eingespeister Luftstrom in zwei Ströme, einer warm und der Andere kalt, aufgeteilt. Die Temperaturdifferenz zwischen den Ausgangsströmen beträgt je nach Bauart bis zu 30 K [Bru69]

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Nomenklatur	v
1. Aufbau	1
2. Methodik	2
3. Auswertung	3
3.1. Vorüberlegung	3
3.2. Ergebnisse	3
4. Probleme	6
5. Fazit	7
Literatur	I
Anhang	II
A. Arduino Code	II

Abbildungsverzeichnis

1.1. Versuchsaufbau	1
3.1. Absoluttemperaturen und Temperaturdifferenzen	4

Tabellenverzeichnis

3.1. Ergebnisse des Versuchs	5
--	---

Formelzeichen

\dot{V}	Volumenstrom [$\frac{m^3}{s}$]
ν	Kinematische Viskosität [$\frac{m^2}{s}$]
ρ	Dichte [$\frac{kg}{m^3}$]
ξ	Massenstromanteil des kalten Luftstroms [-]
ξ_V	Volumenstromanteil des kalten Luftstroms [-]
p	Druck [Pa]
R	Spezifische Gaskonstante [$\frac{J}{kgK}$]
Re	Reynolds-Zahl [-]
T	Temperatur [K]

1. Aufbau

Der Versuchsaufbau zum Versuch Wirbelrohr ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Die Enden des Wirbelrohrs stecken in zwei Brotzeitboxen, welche als Diffusoren dienen. Von dort aus führt in jeder Box ein Flaschenhals ins Freie. Die Flaschenhälse wurden so abgeschnitten, dass eine Auslassdüse entsteht. Über den Enden des Wirbelrohrs sind im Deckel der Boxen zwei Löcher um die Kabel der Temperatursonden einzuführen. Diese sind direkt vor den Auslässen des Wirbelrohrs mit Heißkleber befestigt.

Die Temperatursonden bestehen aus jeweils einem NTC 3950 100k Thermistor und einem in Reihe geschalteten Vorwiderstand. An der kalten Seite ist der Vorwiderstand 300 k Ω und an der warmen Seite 100 k Ω , die erwarteten Widerstände der Thermistoren. Die über den Thermistor abgefallene Spannung wird über einen ESP32 Microcontroller aufgenommen, welcher die Daten über USB an einen Laptop sendet. Die Auflösung des ESP32 ADC ist 10 Bit. Der Arduino Code kann im Anhang gefunden werden.

Die Druckluft für das Wirbelrohr wird von einem variablen Druckluftanschluss geliefert. Dort kann der Einlassdruck angepasst werden.

Die Messung der Geschwindigkeiten an den Flaschenhälsen wird mit einem Flügelradanemometer vorgenommen. Dieses passt annähernd perfekt in die Öffnung. Der Innendurchmesser des Flügelradanemometers ist $d_{FR} = 18\text{mm}$.



Abbildung 1.1.: Versuchsaufbau

2. Methodik

Die Volumenströme \dot{V} am kalten und warmen Auslass wurden mittels der Strömungsgeschwindigkeiten $c_{w/k}$, durch das Flügelradanemometer ermittelt. Hier beziehen sich die Indizes auf die warme (w) bzw. kalte (k) Seite des Wirbelrohrs.

$$\dot{V}_{w/k} = c_{w/k} \cdot \pi \cdot \frac{d_{FR}^2}{4} \quad (2.1)$$

Stellte sich ein gewünschter Kaltvolumenstromanteil ξ_V ein wurde die Aufzeichnung der Temperaturwerte gestartet und für drei Minuten laufen gelassen.

$$\xi_V = \frac{\dot{V}_k}{\dot{V}_k + \dot{V}_w} = \frac{c_k}{c_k + c_w} \quad (2.2)$$

Anschließend wurde die Drossel weiter verstellt und der Versuch mit den neuen Volumenstromanteilen wiederholt.

3. Auswertung

3.1. Vorüberlegung

Zu Beginn des Versuchs wurde der Differenzdruck in den Boxen relativ zum Umgebungsdruck gemessen. Dieser betrug jedoch in Allen gemessenen Fällen unter 10 Pa und wird somit hier vernachlässigt.

Die interessante Größe zur Auswertung des Versuchs ist nicht der gemessene Volumenstromanteil ξ_V sondern der Kaltmassenstromanteil ξ . Um diesen zu errechnen wird angenommen, dass die Temperatur am Auslass der Flaschenhalse der des Auslasses des Wirbelrohrs entspricht. So ergibt sich ξ zu:

$$\xi = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_k + \dot{m}_w} = \frac{\dot{V}_k \cdot \rho_k}{\dot{V}_k \cdot \rho_w + \dot{V}_w \cdot \rho_w} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (3.2)$$

In Gleichung 3.2 ist R die Spezielle Gaskonstante für Luft mit $R = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$ und T die Temperatur am Auslass in K. Wenn Gleichung 3.2 und 2.1 in Gleichung 3.1 eingesetzt werden, werden R, p und $\frac{\pi \cdot d_{FR}^2}{4}$ gekürzt, da diese konstant sind und man erhält für ξ folgenden Zusammenhang:

$$\xi = \frac{\frac{c_k}{T_k}}{\frac{c_k}{T_k} + \frac{c_w}{T_w}} \quad (3.3)$$

Mit diesem Massenstromanteil werden alle weiteren Auswertungen geführt, da dieser in der existierenden Literatur üblicherweise verwendet wird.

3.2. Ergebnisse

In Tabelle 3.1 werden die Ergebnisse des Versuchs aufgeführt. In Abbildung 3.1 werden die Daten Graphisch dargestellt. schwarze Marker geben die Temperaturdifferenz an, farbige Marker die Absoluttemperatur.

Die schwarzen Marker geben mit der Skala auf der rechten Seite die Temperaturdifferenz an, die farbigen Marker mit der Skala auf der linken Seite die Temperatur an den Auslässen.

Zu beobachten ist, dass die Temperaturdifferenz bei einem $\xi \approx 0.65$ ein Maximum annimmt, was bei allen Einlassdrücken der Fall ist. Die geringsten Absoluttemperaturen werden bei $\xi \approx 0.4$ erreicht, die höchsten bei $\xi \approx 1$.

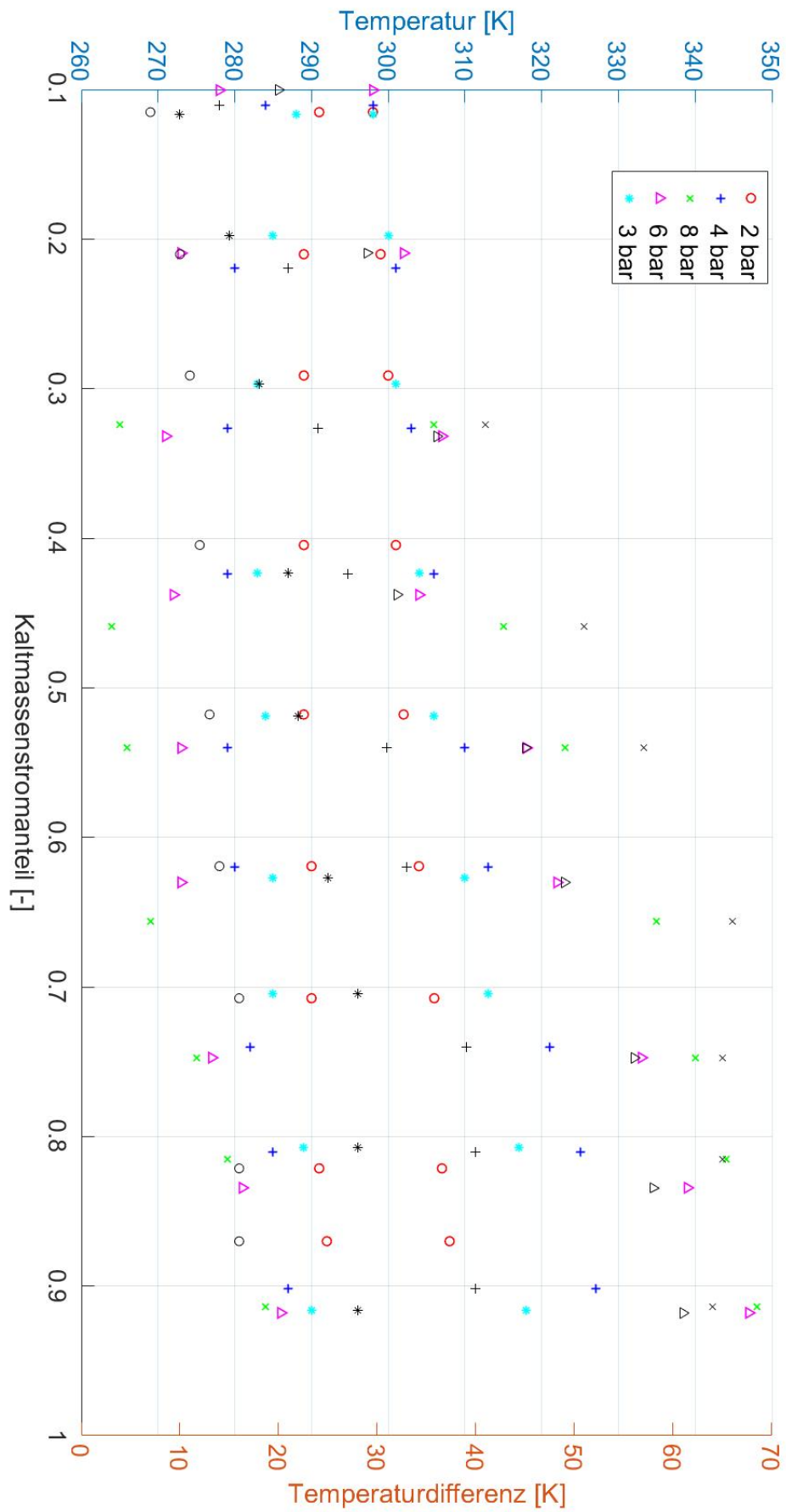


Tabelle 3.1.: Ergebnisse des Versuchs

$p_{Einlass}$ (Absolut) Ziel-Kaltmassenstromanteil		2	3	4	6	8
0.1	c_k	0.38	0.55	0.65	1	-
	c_w	2.99	4.3	5.5	9.6	-
	T_k	291	288	284	278	-
	T_w	298	298	298	298	-
	ξ	0.1152	0.1169	0.1103	0.1004	-
0.2	c_k	0.72	0.89	1.36	1.82	-
	c_w	2.8	3.8	5.2	7.6	-
	T_k	289	285	280	273	-
	T_w	299	300	301	302	-
	ξ	0.2101	0.1978	0.2195	0.2094	-
0.3	c_k	0.95	1.27	2.1	3.2	3.7
	c_w	2.4	3.2	4.7	7.3	8.9
	T_k	289	283	279	271	265
	T_w	300	301	303	307	306
	ξ	0.2912	0.2968	0.3267	0.3318	0.3243
0.4	c_k	1.37	2.05	2.95	4.6	5.8
	c_w	2.1	3	4.4	6.6	8.15
	T_k	289	283	279	272	264
	T_w	301	304	306	304	315
	ξ	0.4048	0.4233	0.4237	0.4379	0.4592
0.5	c_k	1.85	2.75	3.75	5.85	7.15
	c_w	1.8	2.75	3.55	5.8	7.4
	T_k	289	284	279	273	
	T_w	302	306	310	318	323
	ξ	0.5178	0.5186	0.54	0.5402	0.5399
0.6	c_k	2.25	3.4	4.38	6.5	9.2
	c_w	1.45	2.2	3	4.5	6
	T_k	290	285	280	273	269
	T_w	304	310	313	322	335
	ξ	0.6193	0.627	0.6201	0.6301	0.6563
0.7	c_k	2.66	3.8	5.5	7.75	11
	c_w	1.16	1.75	2.2	3.15	4.6
	T_k	290	285	282	277	275
	T_w	306	313	321	333	340
	ξ	0.7076	0.7046	0.74	0.7473	0.7473
0.8	c_k	3.05	4.5	6	9.6	10.9
	c_w	0.7	1.18	1.6	2.3	3.05
	T_k	291	289	285	281	279
	T_w	307	317	325	339	344
	ξ	0.8213	0.8071	0.8105	0.8343	0.815
0.9	c_k	3.3	5	6.85	10.6	13.9
	c_w	0.52	0.5	0.85	1.15	1.61
	T_k	292	290	287	286	284
	T_w	308	318	327	347	348
	ξ	0.87	0.9164	0.9018	0.9179	0.9136

4. Probleme

Ein Problem bei der Durchführung des Versuchs war das Schmelzen des Heißklebers, mit dem die Temperatursonde am heißen Auslass angebracht war. Diese wurde für die Versuche 8 bar mit der Hand an die richtige Stelle positioniert.

Ein weiteres Problem in der Durchführung trat bei den Letzten beiden Versuchen mit 8 bar Einlassdruck auf. Diese konnten aufgrund der Gegebenheiten nicht mehr durchgeführt werden.

Weiter wurde bei der Messung der Geschwindigkeiten die Dichte der Luft und somit über die Tragflügel des Flügelrades unterschiedliche Auftriebe nicht berücksichtigt.

5. Fazit

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen von Keller [Kel] und Hilsch [Hil46] überein, bei welchem die qualitativen Verläufe der Temperatur ähnlich sind.

Diese Ergebnisse bilden jetzt die Grundlage für die weitere Validierung der Simulation des Wirbelrohres.

Literatur

- [Ran34] G. Ranque. *Method And Apparatus For Obtaining From A Fluid Under Pressure Two Currents Of Fluids At Different Temperatures*. englisch. 1934.
- [Hil46] Rudolf Hilsch. *Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozeß*. deutsch. 1946.
- [Bru69] H. H. Bruun. „EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ENERGY SEPARATION IN VORTEX TUBES“. englisch. In: *Journal Mechanical Engineering Science* 11.6 (1969). DOI: https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1969_011_070_02.
- [Kel] Prof. Dr. J. U. Keller. *Das Wirbelrohr: Bemerkungen zu den Grundlagen und neuen energietechnischen Anwendungen*. deutsch.

Anhang

A. Arduino Code

Code 5.1: Arduino code zur Messung der Temperaturen an den Auslässen

```
//measure temperature on the vortextube
//NTC 3950 100k is used
//300k resistance for the cold end resistor
//100k for the hot end resistor
#include <math.h>

//values for the cold end of the tube
#define COMPARISON_VALUE 300000
#define MEASURE_PIN 4

//comparison values, valid for both ends
//comparing to values at 25C
#define B_VALUE 3950
#define T_B 298
#define R_B 100000

//values for the hot end
#define MEASURE_PIN2 2
#define COMPARISON_VALUE2 100000

//resolution of the ADC on the ESP32
float RESOLUTION = 4095;

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    pinMode(MEASURE_PIN, INPUT);
    pinMode(MEASURE_PIN2, INPUT);
    Serial.begin(115200);
    Serial.print("resistanceCold");
    Serial.print(",");
    Serial.print("TemperatureCold");
    Serial.print(",");
    Serial.print("resistanceHot");
    Serial.print(",");
    Serial.println("TemperatureHot");
}
```

```
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  //read and calculate the values on the cold end of the tube  
  int val1 = analogRead(MEASURE_PIN);  
  float val = static_cast<float>(val1)/RESOLUTION;  
  float res = COMPARISON_VALUE*val/((1-val));  
  float T = B_VALUE*T_B/(B_VALUE-T_B*log(R_B/res));  
  //print resistance and Temperature, resistance for verification  
  Serial.print(res);  
  Serial.print(",");  
  Serial.print(T);  
  Serial.print(",");  
  
  //read and calculate the values at the hot end of the tube  
  val1 = analogRead(MEASURE_PIN2);  
  val = static_cast<float>(val1)/RESOLUTION;  
  res = COMPARISON_VALUE2/(1/val-1);  
  T = B_VALUE*T_B/(B_VALUE-T_B*log(R_B/res));  
  
  //print resistance and Temperature, resistance for verification  
  Serial.print(res);  
  Serial.print(",");  
  Serial.println(T);  
  
  delay(100);  
}
```