



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik



Fachgebiet Kraftwerks- Dampferzeuger- und
Feuerungstechnik



Forschungsbericht

Untersuchungen zur Dämpfung von Volumenstrom- Pulsationen in Rohrleitungen

Autor Dipl.-Ing. (FH) Enrico Titze

Ausgabe 05/2018



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Inhaltsverzeichnis

Einführung _____	4
Durchführung _____	5
Auswertung _____	13
Ergebnisse _____	14

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Setups der Pulsationsversuche _____	5
Abbildung 2: Versuchsaufbau im Setup 4 mit Bauteilerläuterungen _____	6
Abbildung 3: Kükenhahn mit Winkelskala _____	7
Abbildung 4: Druckverlust des Kükenhahnes bei verschiedenen Stellungen für Luft bei Setup 1 und $c = 0,6 \text{ m/s}$ _____	7
Abbildung 5: Setup 0.1; $0,2 \text{ m/s}$; 5,2% Dämpfungsgrad _____	7
Abbildung 6: Setup 0.3; $0,6 \text{ m/s}$; 2,6% Dämpfungsgrad _____	8
Abbildung 7: Setup 1.2; $0,6 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 0° , 5% Dämpfungsgrad _____	8
Abbildung 8: Setup 1.5; $0,8 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 35° , 17% Dämpfungsgrad _____	8
Abbildung 9: Setup 1.8; $0,8 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 45° , 43% Dämpfungsgrad _____	9
Abbildung 10: Setup 2.2; $0,4 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 0° , 83% Dämpfungsgrad _____	9
Abbildung 11: Setup 2.3; $0,33 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 45° , 69% Dämpfungsgrad _____	9
Abbildung 12: Setup 3.2; $0,35 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 30° , 74% Dämpfungsgrad _____	10
Abbildung 13: Setup 3.3; $0,33 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 45° , 74% Dämpfungsgrad _____	10
Abbildung 14: Setup 3.4, $0,31 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 50° ; 77,3% Dämpfungsgrad _____	10
Abbildung 15: Setup 4.2; $0,38 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 0° ; 40% Dämpfungsgrad _____	11
Abbildung 16: Setup 4.4; $0,35 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 45° ; 66% Dämpfungsgrad _____	11
Abbildung 17: Setup 5.1; $0,6 \text{ m/s}$; 16% Dämpfungsgrad _____	11
Abbildung 18: Setup 3.1; $0,4 \text{ m/s}$; Kükenhahn-Stellung 0° , 74% Dämpfungsgrad _____	12

Abbildung 19: Histogramm Setup 3.1 von Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten orientiert am Mittelwert _____ 12

Abbildung 20: Dämpfungsgrade aller Versuchssetups als Säulendiagramm _____ 15

Abbildung 21: Wiederholung - Setups der Pulsationsversuche _____ 15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erläuterungen zu den Versuchssetups _____ 4

Tabelle 2: Ergebnisübersicht der Pulsationsmessungen _____ 14

Symbolverzeichnis

Symbole	Bedeutung	Einheit
c	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
\bar{c}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
DG	Dämpfungsgrad	[%]
e	relativer Fehler	[%]
Δe	Schrittweite des Histogrammbereiches	[%]
N	Anzahl	[-]

Indizes	Bedeutung
A	Austrittsmessstrecke
E	Eintrittsmessstrecke
HG	Histogramm
K	Klassen
max	Maximum
min	Minimum
SU	Setup

Einführung

Um am bestehenden Biomassevergasungs-BHKW der Hochschule Zittau/Görlitz die Abgaszusammensetzung auf die geltenden Regularien abzustimmen, empfiehlt es sich die Lambda-Regelung des BHKW-Motors zu optimieren. Eine Optimierung kann z.B. durch die Glättung des Produktgasvolumenstromes vor dem Motor erfolgen. Dies hätte eine punktuelle und saubere Arbeitsweise zufolge, wobei die Abgasemissionen gezielter reguliert werden.

Laborversuche zur Dämpfung eines pulsierenden bzw. fluktuierenden Gasvolumenstromes, wie dieser am Biomassevergasungs-BHKW auftritt, wurden an 6 unterschiedlichen Versuchssetups durchgeführt. Siehe Abbildung 1. Unter einer Pulsationsdämpfung versteht man das Glätten, eines schwankenden Volumen- oder Massenstromes zwischen zwei Bezugspunkten innerhalb eines Leitungssystems, in Richtung des Mittelwertes.

Tabelle 1: Erläuterungen zu den Versuchssetups

Setup	Erläuterungen
0	Ohne Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung ohne Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle gefördert, Pulsator am Eintritt
1	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle gefördert, Pulsator vor Speicher
2	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator vor Speicher
3	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator vor Speicher
4	Mit Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung mit Volumenerweiterung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator hinter Speicher

5	Ohne Speicherbehälter, Dämpfungseigenschaften einer DN 40 Leitung, Medium (Luft) wird durch Druckluftquelle und saugseitige Gaspumpe gefördert, Pulsator am Eintritt
---	--

Setup

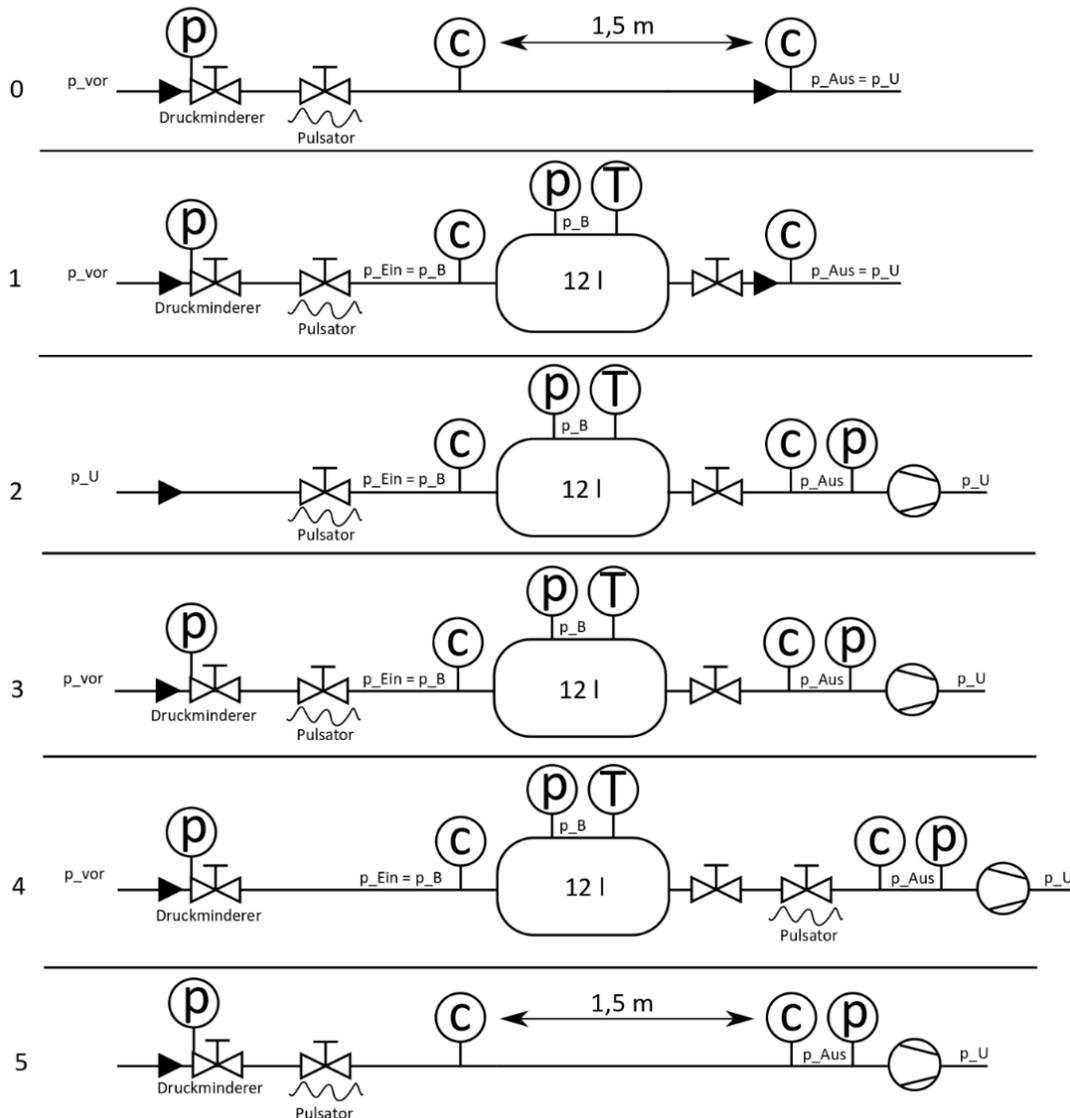


Abbildung 1: Setups der Pulsationsversuche

Durchführung

Zuerst wurde mit Setup 0 und 5 das Dämpfungsverhalten der reinen Rohrleitungen inklusive Messstrecken untersucht. Somit konnte man den Zustand ermitteln in dem auf Grund des kleinsten (kompressiblen) Gasvolumens und Druckverlust die geringste Pulsationsdämpfung zu erwarten ist. Setup 5 ähnelt dabei dem aktuellen Aufbau am Biomassevergasungs-BHKW mit Vergasungsluftzuführung (mittels Druckluftzuführung im Versuchsaufbau und Seitenkanalverdichter

am BHKW) und Produktgasansaugung (mittels saugseitiger Membranpumpe im Versuchsaufbau und Motor am BHKW). Setup 3 stellt die geplante Variante mit integriertem Gasbehälter/-Speicher vor. Alle weiteren Setups wurden initiiert um z.B. eine saugseitige Pulsation oder Betriebsarten mit reiner Saug- oder Druckdurchströmung zu untersuchen und - bewerten.

Es wurden jeweils die Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten (Volumenströme), sowie die Druckverhältnisse vor, nach und in dem beobachteten Gasvolumen (entweder Behälter + Leitung oder Leitung) gemessen. Aus den Messwerten von Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit wird der Dämpfungsgrad bestimmt. Mit dem Pulsator (Nadelventil) wird entweder vor oder hinter dem betrachteten Gasvolumen manuell eine zufällige Volumenstrompulsation erzeugt. Durch vergleichen der Peaks (Amplituden) von Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeit wird mittels Excel-Tool der Dämpfungsgrad der jeweiligen Messung bestimmt. Für jedes Setup wurden während der Messfahrten die Volumenströme, die Kükenhahn-Stellung (hinter dem Behälter) und somit der Druckverlust variiert. Dadurch kann der Einfluss dieser Größen auf den Dämpfungsprozess erfasst werden. Den vorangegangenen Simulationsrechnungen zu Folge sind dies die beiden Parameter, neben dem Gasvolumen, mit dem größten Einflusspotential auf die Pulsationsdämpfung.

Im nachstehenden Bild ist der Versuchsaufbau im Setup 4 mit piktogrammmischen Bauteilerläuterungen dargestellt.

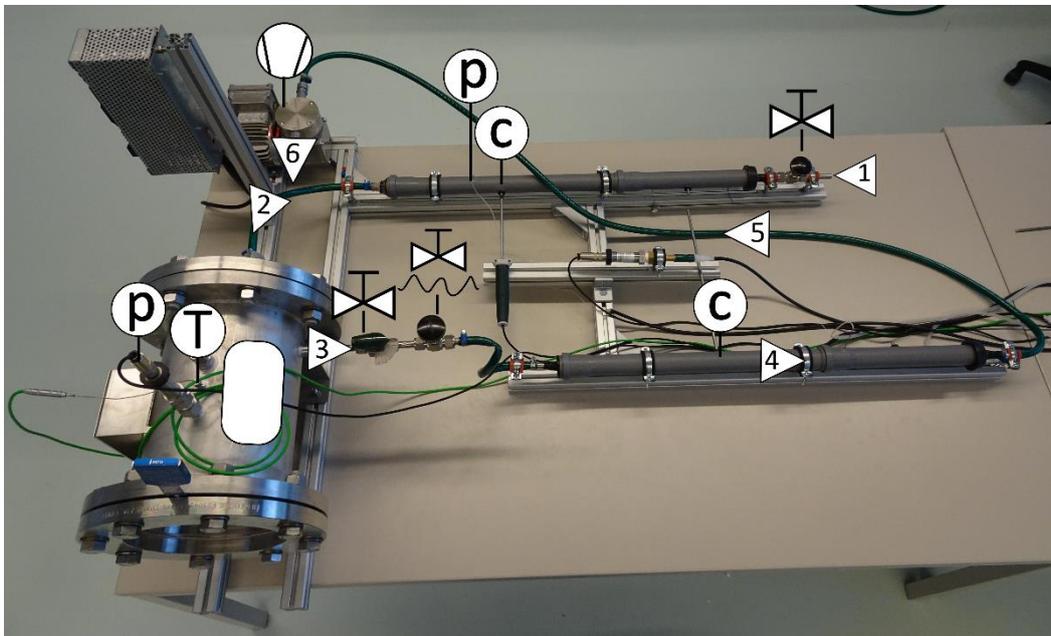


Abbildung 2: Versuchsaufbau im Setup 4 mit Bauteilerläuterungen



Abbildung 3: Küchenhahn mit Winkelskala

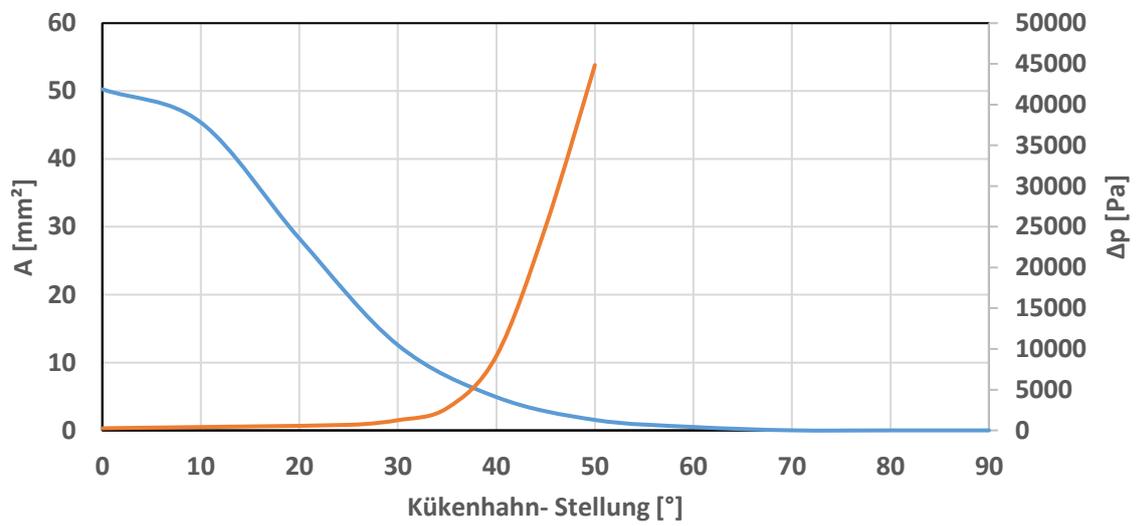


Abbildung 4: Druckverlust des Küchenhahnes bei verschiedenen Stellungen für Luft bei Setup 1 und $c = 0,6 \text{ m/s}$

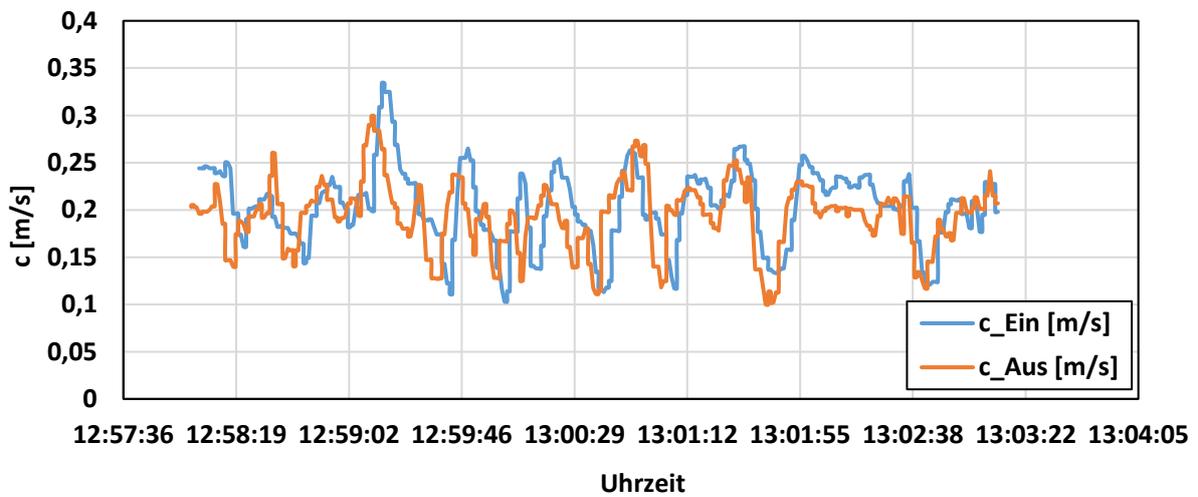


Abbildung 5: Setup 0.1; $0,2 \text{ m/s}$; 5,2% Dämpfungsgrad

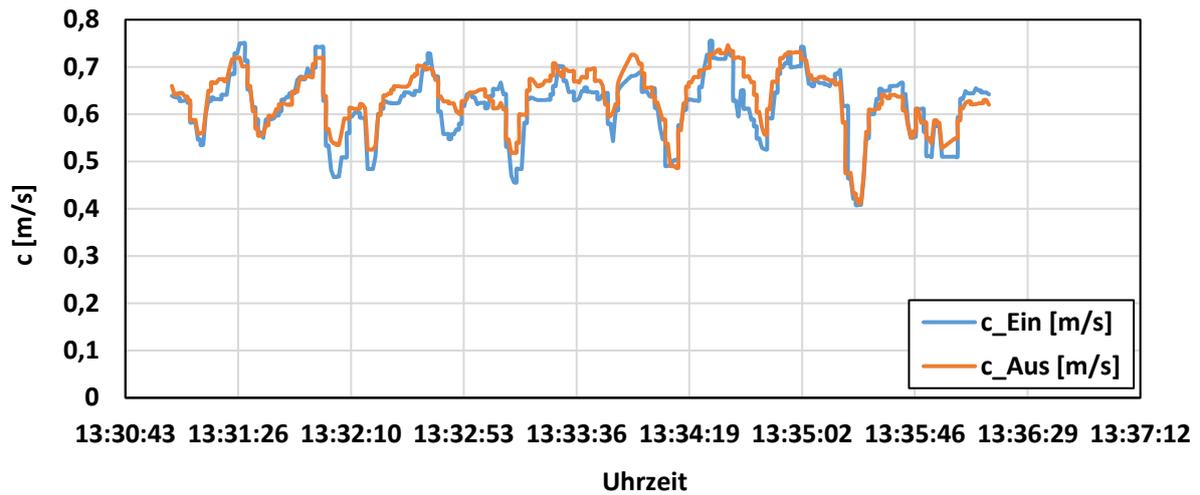


Abbildung 6: Setup 0.3; 0,6 m/s; 2,6% Dämpfungsgrad

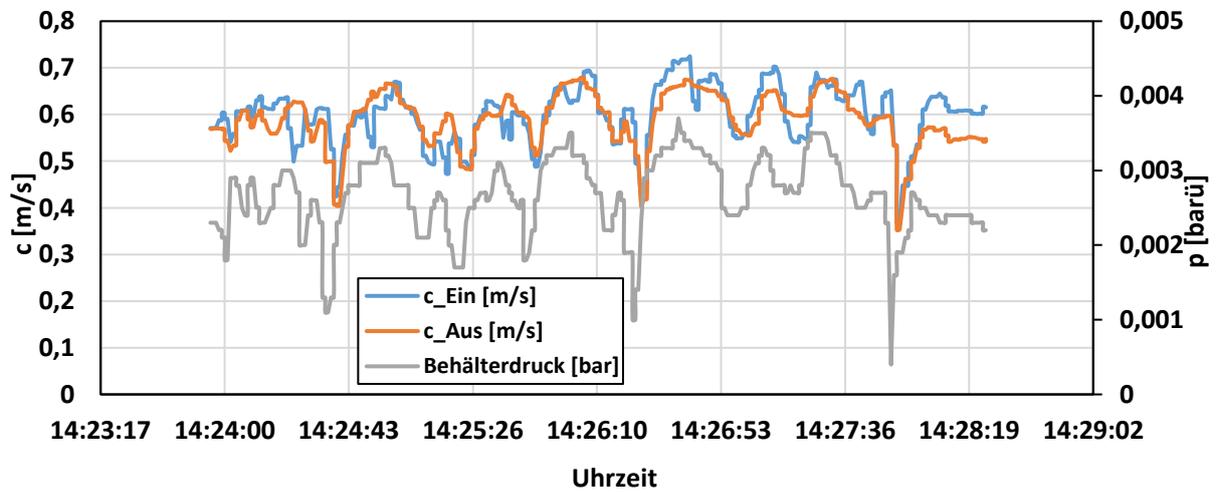


Abbildung 7: Setup 1.2; 0,6 m/s; Küchenhahn-Stellung 0°, 5% Dämpfungsgrad

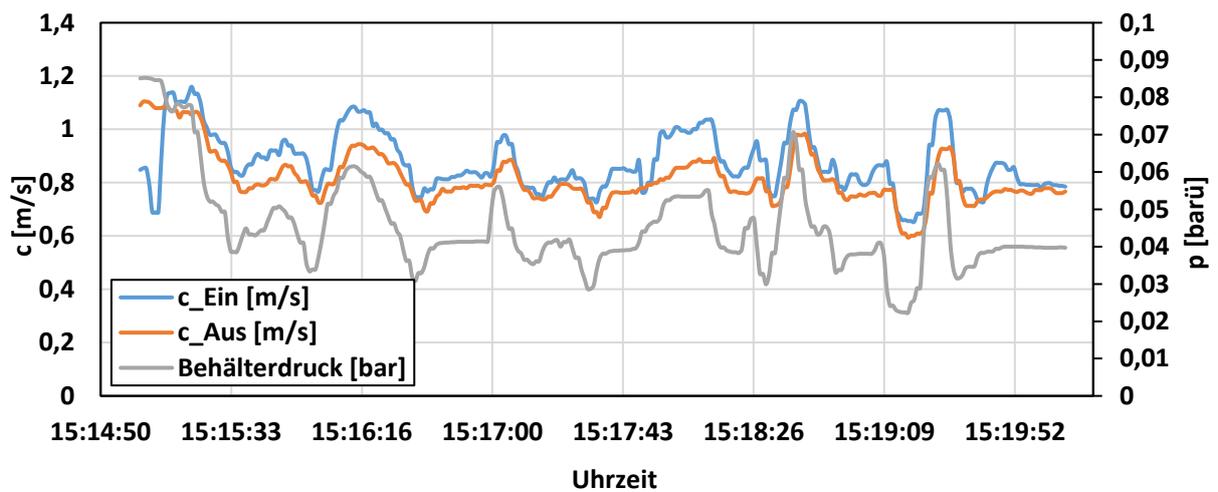


Abbildung 8: Setup 1.5; 0,8 m/s; Küchenhahn-Stellung 35°, 17% Dämpfungsgrad

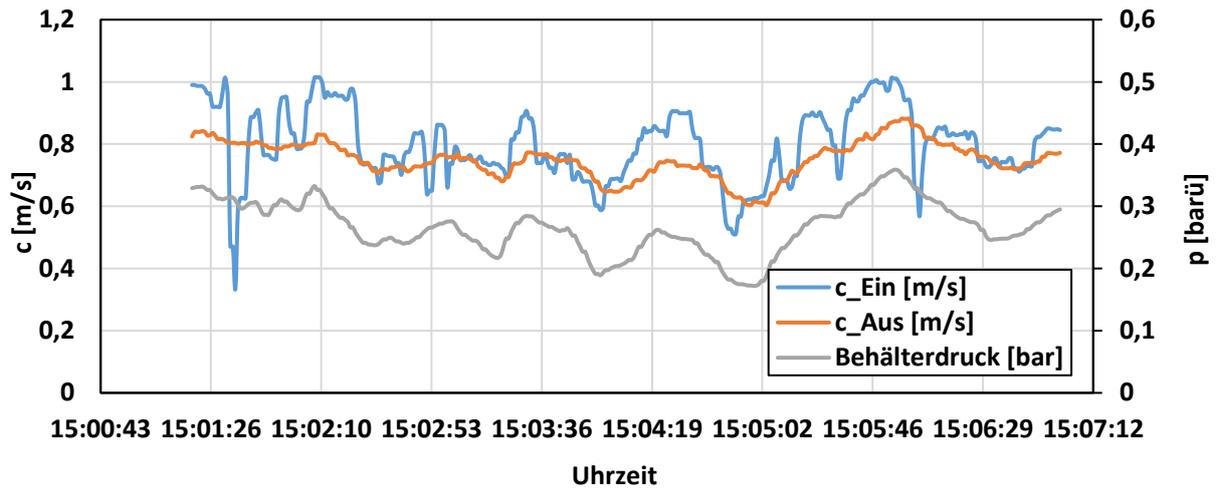


Abbildung 9. Setup 1.8; 0,8 m/s; Küchenhahn-Stellung 45°, 43% Dämpfungsgrad

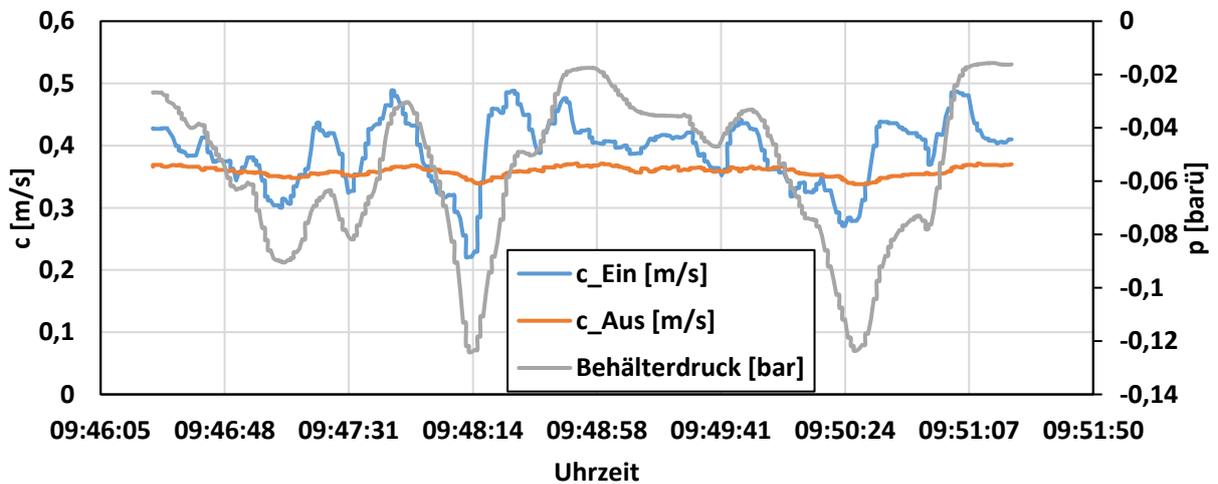


Abbildung 10. Setup 2.2; 0,4 m/s; Küchenhahn-Stellung 0°, 83% Dämpfungsgrad

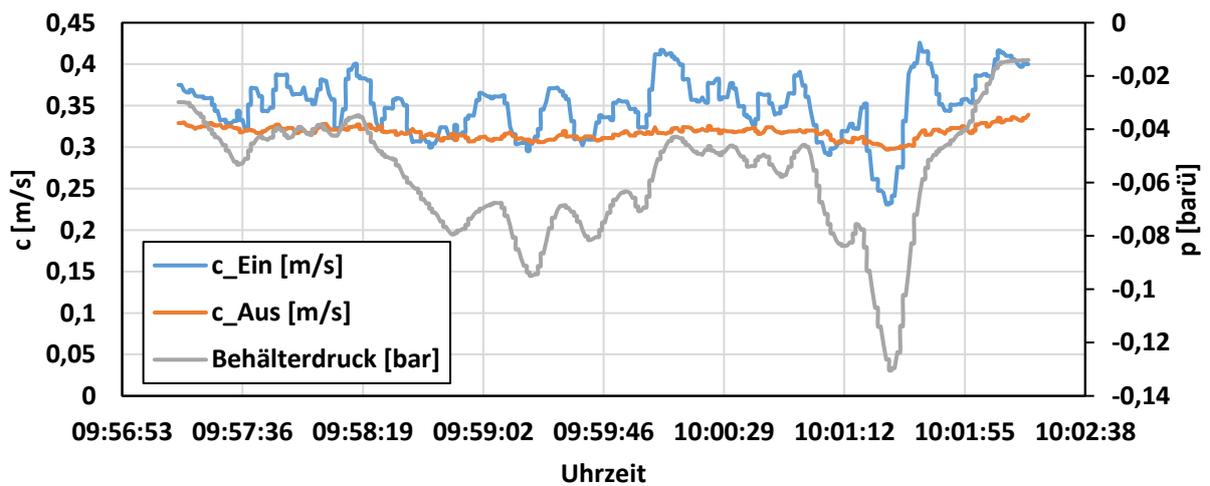


Abbildung 11. Setup 2.3; 0,33 m/s; Küchenhahn-Stellung 45°, 69% Dämpfungsgrad

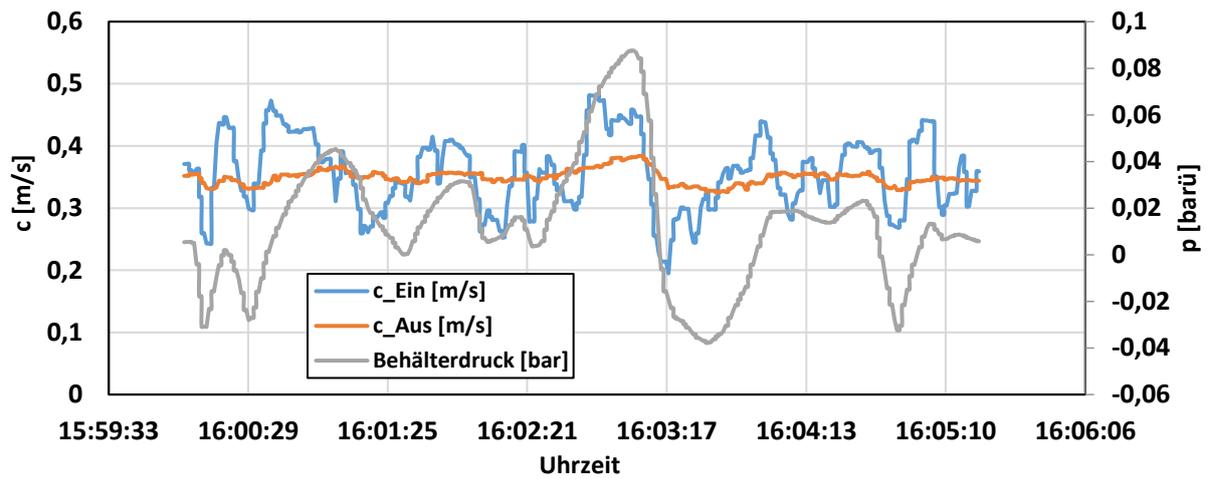


Abbildung 12: Setup 3.2; 0,35 m/s; Kükenhahn-Stellung 30°, 74% Dämpfungsgrad

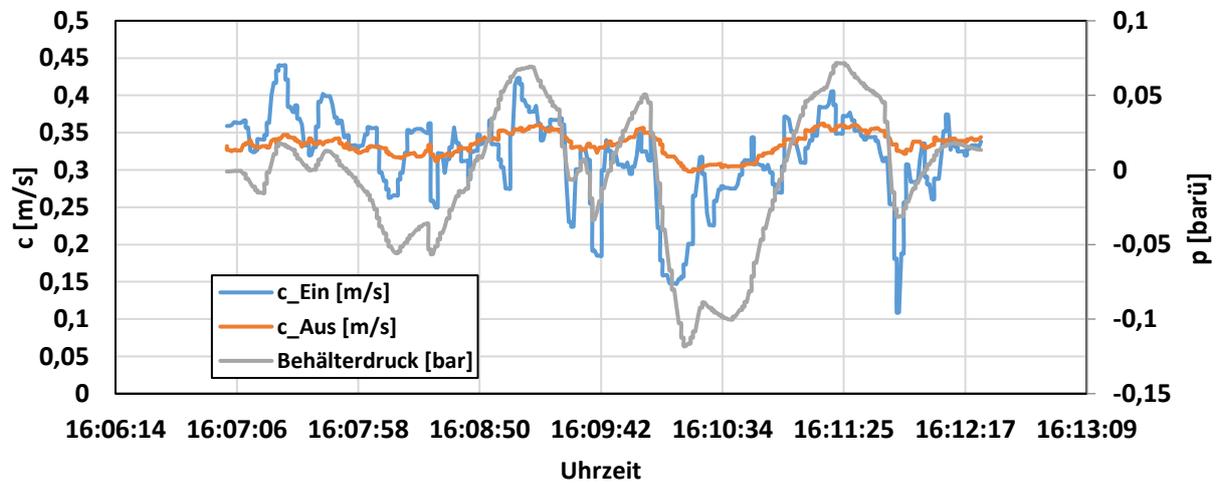


Abbildung 13: Setup 3.3; 0,33 m/s; Kükenhahn-Stellung 45°, 74% Dämpfungsgrad

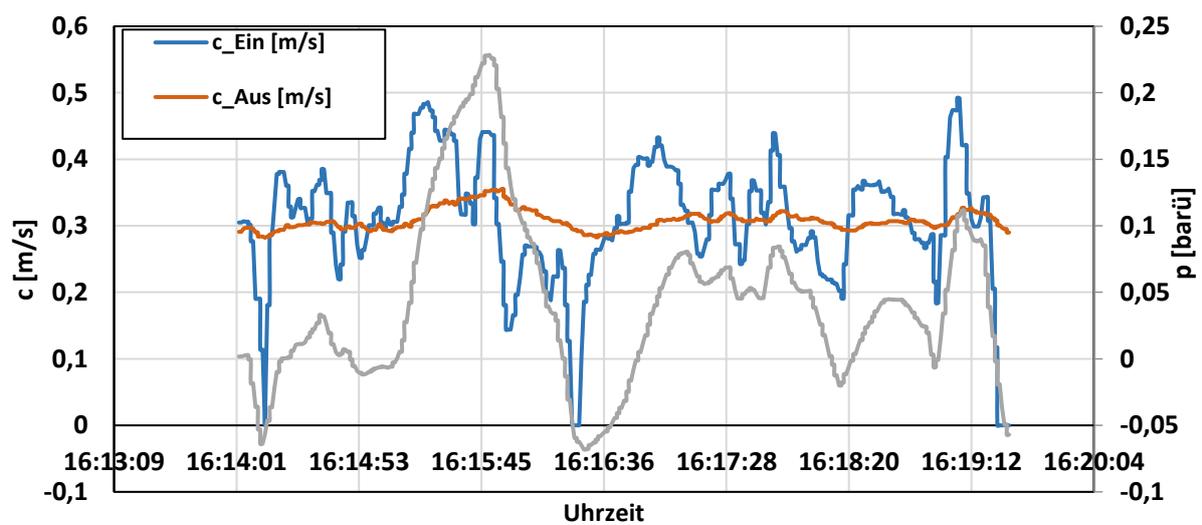


Abbildung 14: Setup 3.4, 0,31 m/s; Kükenhahn-Stellung 50°, 77,3% Dämpfungsgrad

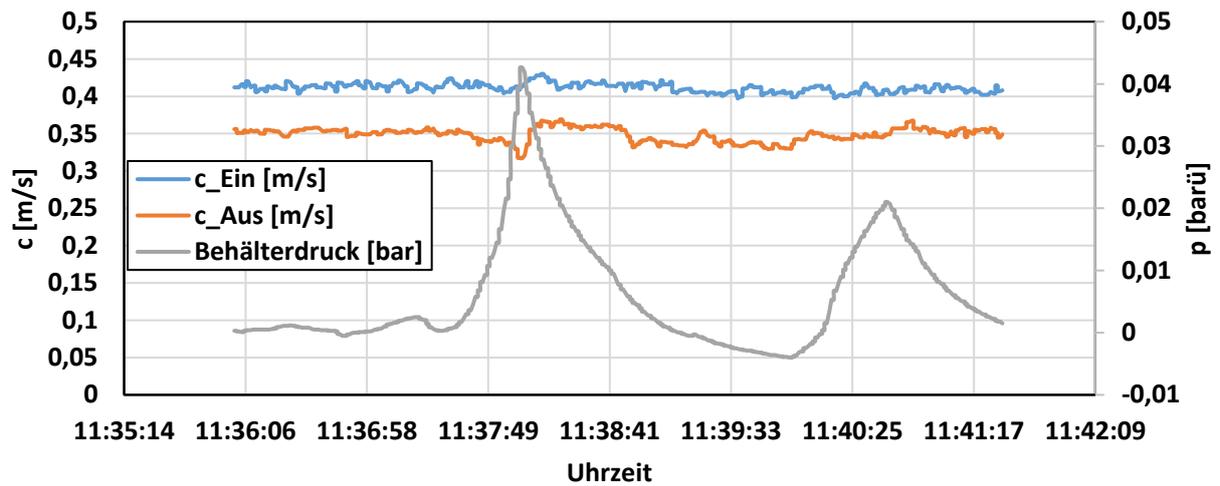


Abbildung 15: Setup 4.2; 0,38 m/s; Küchenhahn-Stellung 0°; 40% Dämpfungsgrad

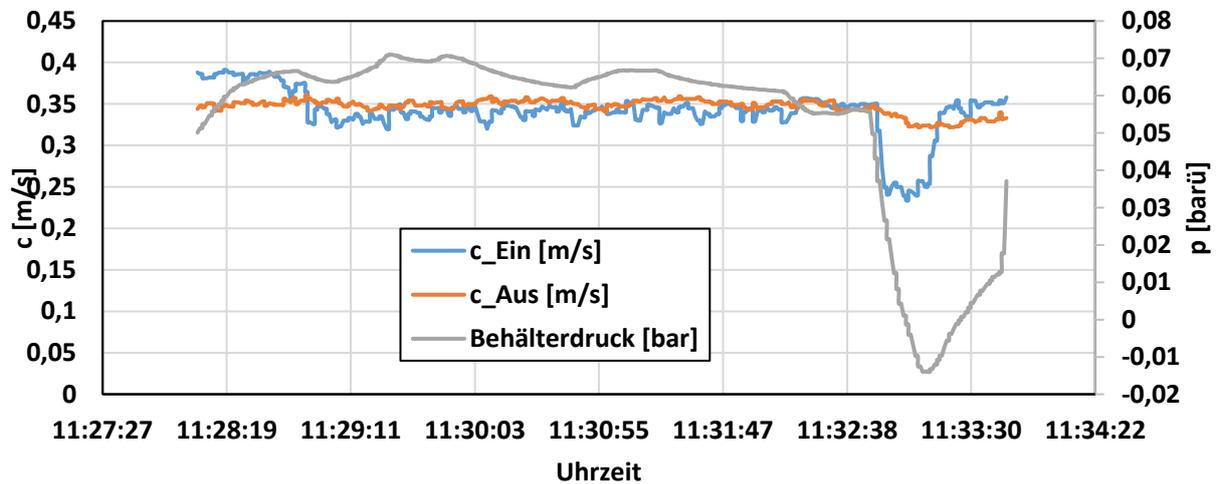


Abbildung 16: Setup 4.4; 0,35 m/s; Küchenhahn-Stellung 45°; 66% Dämpfungsgrad

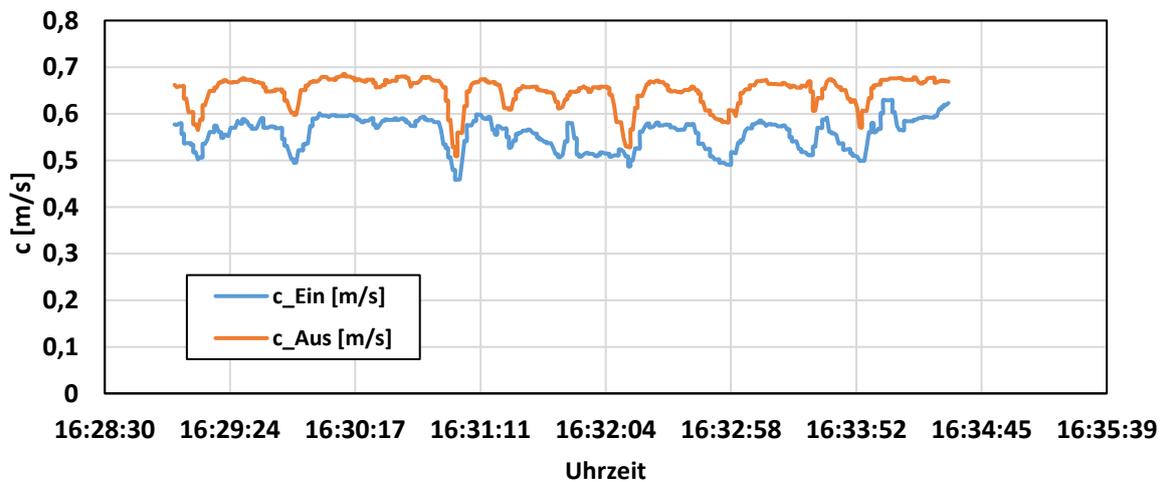


Abbildung 17: Setup 5.1; 0,6 m/s; 16% Dämpfungsgrad

Das nachstehende Diagramm zeigt Messdaten der Pulsationsdämpfungsversuche für das Setup 3.1. Dieses soll darstellen in welchen Größenordnungen sich die Schwankungen des Volumenstromes bzw. der Strömungsgeschwindigkeit bewegen. Es sind für Ein- und Austrittsgeschwindigkeit jeweils die Minima und Maxima gekennzeichnet zwischen denen die Messwerte, wie im Histogramm dargestellt, unterschiedlich oft auftreten. In Richtung des Mittelwertes wird das Auftreten, ähnlich einer Glockenkurve, häufiger.

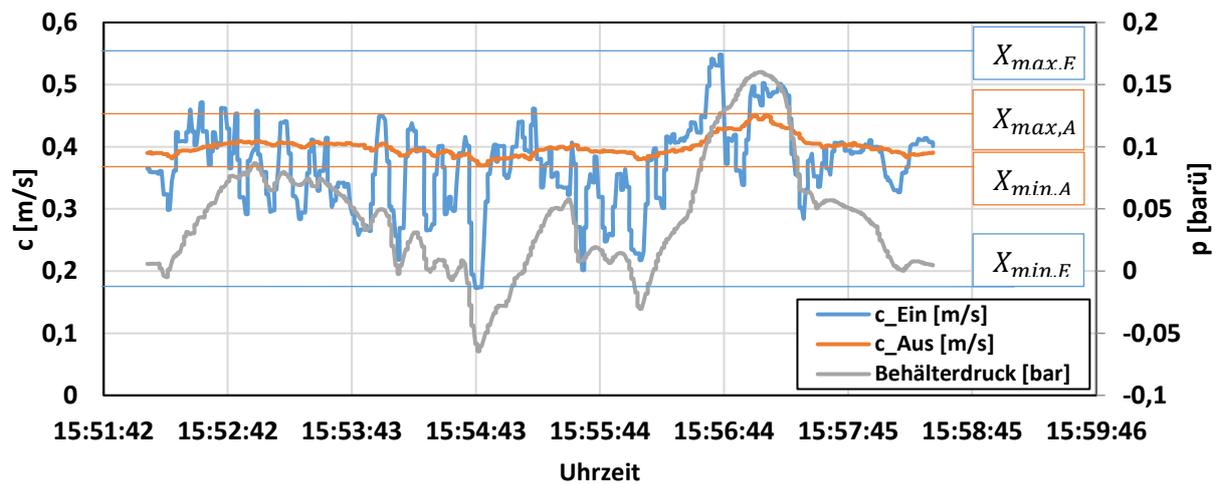


Abbildung 18: Setup 3.1; 0,4 m/s; Kükenhahn-Stellung 0°, 74% Dämpfungsgrad

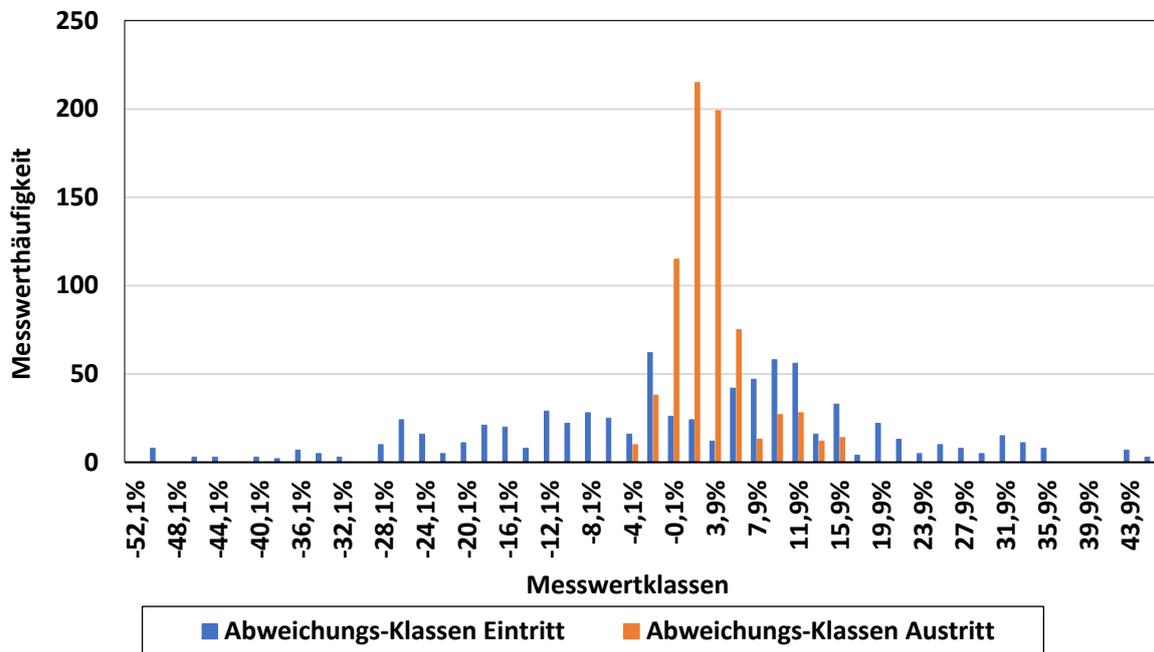


Abbildung 19: Histogramm Setup 3.1 von Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten orientiert am Mittelwert

Auswertung

Das Histogramm veranschaulicht den jeweils für Eintritts- und Austrittsvolumenstrom in 50 Klassen unterteilte Messwertbereich, sowie die Häufigkeit der Messwertklassen pro Messfahrt. Es verdeutlicht somit die Anzahl der gemessenen Volumenströme von Ein- bzw. Austritt und deren relativen Abweichung vom Mittelwert bzw. Median.

Ein- und Austrittshistogramm beziehen sich dabei nicht zwangsläufig auf den gleichen Volumenstrom. Durch messtechnische Unregelmäßigkeiten (z.B. die Positionierung des Hitzdrahtanemometers in der Messstrecke) und Druckunterschiede können diese trotz des Kontinuitätsgesetzes und gleiche gearteter Messstrecken voneinander abweichen. Zur Bewertung einer vorliegenden Volumenstromdämpfung oder zur Feststellung einer vorliegenden Pulsation ist dies qualitativ ausreichend.

Anhand der belegten Klassenanzahl pro Messgröße (Eintritt- bzw. Austrittsgeschwindigkeit/Volumenstrom) wird der Dämpfungsgrad bestimmt. Es wird dabei der Quotient aus der Anzahl von Eintritts- und Austritts- Klassen gebildet.

$$DG = 1 - \frac{N_{K,A}}{N_{K,E}}$$

Die Klassenschrittweite wird dabei von den größten positiven und negativen Amplituden beider Messgrößen bestimmt, indem der Bereich zwischen minimaler und maximaler relativer Abweichung vom Mittelwert in 50 Klassen geteilt wird.

Beispiel zu obenstehenden Histogramm zu Setup 3.1

$$\bar{c}_i = \frac{\sum c_{c,i}}{N_{c,i}}$$

$$\bar{c}_E = 0,377 \text{ m/s}$$

$$\bar{c}_A = 0,398 \text{ m/s}$$

$$e_{\min,E} = \frac{(c_{\min,E} - \bar{c}_E)}{\bar{c}_E} = \frac{\left(0,173 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,377 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0,377 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -54,11 \% = e_{\min,HG}$$

$$e_{\min,A} = \frac{(c_{\min,A} - \bar{c}_A)}{\bar{c}_A} = \frac{\left(0,37 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,398 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0,398 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = -7,04 \%$$

$$e_{\max,E} = \frac{(c_{\max,E} - \bar{c}_E)}{\bar{c}_E} = \frac{\left(0,548 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,377 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0,377 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 45,36 \% = e_{\max,HG}$$

$$e_{\max,A} = \frac{(c_{\max,A} - \bar{c}_A)}{\bar{c}_A} = \frac{\left(0,451 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0,398 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0,398 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 13,32 \%$$

Kleinstes Minimum und größtes Maximum sind die Grenzen des Histogrammbereiches

(-54,11 %; 45,36 %)

$$N_{K,HG} = 50 \text{ (im Excel – Tool)}$$

$$\Delta e_{HG} = \frac{(e_{\max,HG} + |e_{\min,HG}|)}{N_{K,HG}} = \left(\frac{45,36 + 54,11}{50} \right) = 2 \% \text{ (gerundet)}$$

$$DG_{SU3.1} = 1 - \frac{N_{K,A}}{N_{K,E}} = 1 - \frac{11 \text{ (orange Säulen)}}{43 \text{ (blaue Säulen)}} = 0,744 \rightarrow 74,4 \%$$

Für eine automatisierte Auswertung der Messwerte für jedes Setup und die dazugehörigen Parameter wurde ein Excel-Tool erstellt, welches die Messwerte einer Klasse zuordnet, summiert und die somit die Säulenwerte des Histogramms bildet. Zur Anwendung des Tools müssen nur die Messwerte und die dazugehörigen Zeiten reinkopiert werden. Die Anzahl der Messdatenpunkte für Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten ist nicht vorgeschrieben und kann somit variieren.

Ergebnisse

Tabelle 2: Ergebnisübersicht der Pulsationsmessungen

Setup		Kükenhahn- Stellung [°]	mittl. Strömungs- geschwindigkeit [m/s]	Dämpfungsgrad [%]
0	.1	-	0,2	5,26
	.2	-	0,38	6,98
	.3	-	0,6	2,56
1	.1	0	0,41	0
	.2		0,6	5
	.3		1	11,11
	.4	35	0,41	4,88
	.5		0,8	16,67
	.6		1,1	21,43
	.7	45	0,45	16,67
	.8		0,8	43,24
	.9		1	47,62
2	.1	0	0,25	85,29
	.2		0,4	82,93
	.3	45	0,33	68,42
	.4		0,22	69,7
3	.1	0	0,38	74,42
	.2	30	0,35	73,81
	.3	45	0,33	74,36
	.4	50	0,31	77,27
4	.1	0	0,25	68,42
	.2		0,38	40
	.3	45	0,28	33,33
	.4		0,35	65,57
5	.1	-	0,6	15,79

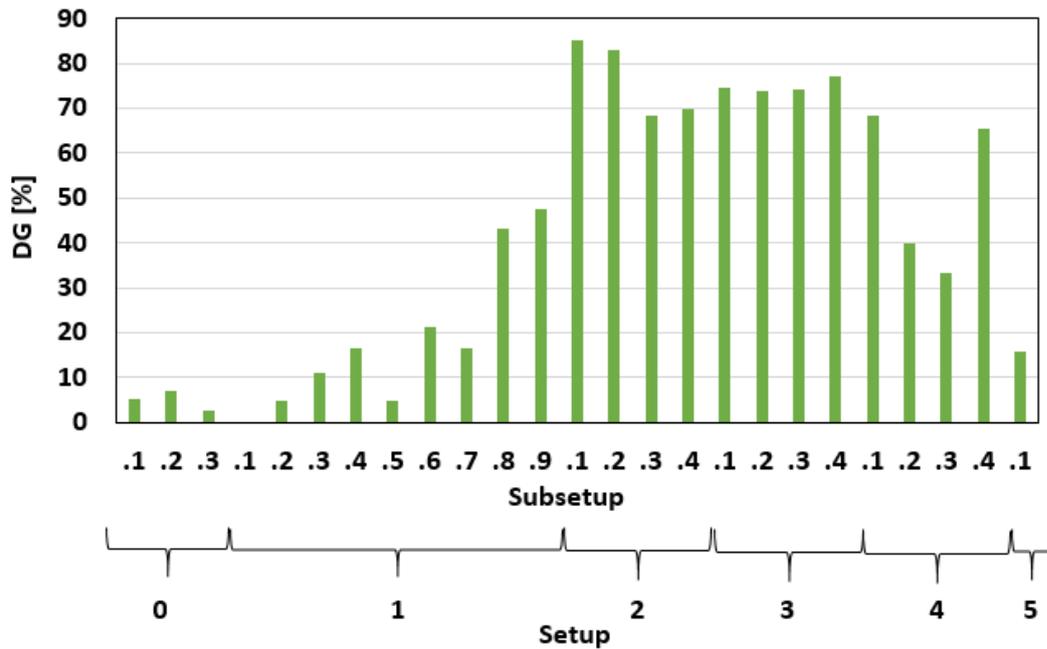


Abbildung 20: Dämpfungsgrade aller Versuchssetups als Säulendiagramm

Setup

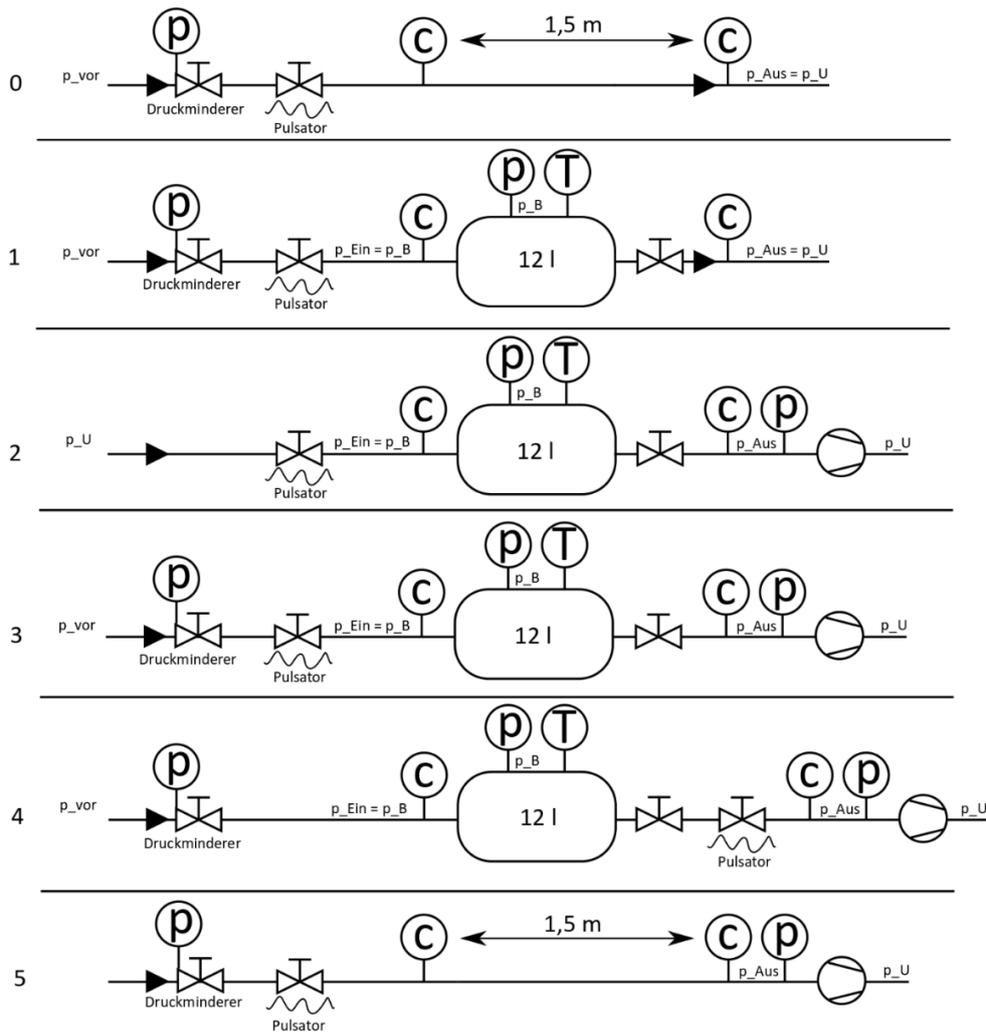


Abbildung 21: Wiederholung - Setups der Pulsationsversuche

Ergebnisinterpretation

Der Dämpfungseffekt ist nach den Ergebnissen stark von einem Druckverlust abhängig, welcher sich über den Verlauf des Rohrleitungssystems ergibt. Mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten ist der Effekt ebenfalls zu beobachten, wobei mit dadurch auch der Druckverlust über die Versuchsstrecke und vor allem über das Ventil hinter dem Behälter steigt. Die besten Dämpfungseffekte werden mit saugendem Fluidtransport erreicht. Das Vorhandensein eines Behälters bzw. eines erweiterten Gasvolumens im Rohrleitungssystem verstärkt den Effekt und bringt auch ohne Absaugung gute Ergebnisse beim Vergleichmäßigen von Gasströmungen mit sich.