

7. KÖTTER Workshop

Gasmengenmessung 2014

26. / 27. März 2014

Vortrag 07

Numerische und experimentelle Untersuchung
pulsierender Strömungen in Wirkdruckmess-
einrichtungen am Beispiel einer Blende

**Patrick Tetenborg, M.Sc., Dipl.-Ing. Roland Edlerherr,
Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer**

TU Dortmund – Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Fluidtechnik

Inhalt

1. Einleitung.....	2
2. Motivation	2
3. Grundlagen der Blendenströmung	3
3.1 Stationäre Durchflussbestimmung	3
3.2 Instationäre Durchflussbestimmung	4
4. Ausstattung.....	6
4.1 Experimentelle Ausstattung	6
4.2 Strömungssimulation	10
5. CFD-Simulationen zur Blendenströmung	10
5.1 Stationäre CFD-Untersuchungen.....	11
5.2 Instationäre CFD-Untersuchungen	14
6. Messtechnische Untersuchungen zu Blendenströmung.....	17
6.1 Stationäre messtechnische Untersuchungen.....	17
6.2 Instationäre messtechnische Untersuchungen.....	19
7. Vergleich Messung und CFD-Simulation	22
8. Zusammenfassung und Ausblick	23
9. Literatur	24

1. Einleitung

Obwohl die Entstehungsmechanismen für instationäre Strömungsvorgänge und mögliche Abhilfemaßnahmen zur Reduktion von Geschwindigkeits- und Druckpulsationen bereits seit langer Zeit erforscht wird, lässt sich deren ungewünschte Ausprägung bislang trotzdem nicht gänzlich vermeiden. So können unter anderem auch Gasmengenmesseinrichtungen Pulsationen ausgesetzt werden. Dies kann zu einer Beeinflussung der Messgenauigkeit führen [1], [2].

Um die unter Pulsationseinfluss auftretenden Effekte und physikalischen Wirkzusammenhänge näher zu betrachten, wurde am Fachgebiet Fluidtechnik der TU Dortmund ein Versuchsstand zur Untersuchung instationärer Strömungsvorgänge in Rohrleitungen errichtet und in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um einen geschlossenen Kreislauf, der es ermöglicht, bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen instationäre Strömungsfelder mit Hilfe eines Pulsationsgenerators zu erzeugen.

Neben der experimentellen Betrachtung von Strömungsvorgängen sind Strömungssimulationen ein inzwischen unabdingbares Hilfsmittel zur vorzeitigen Analyse von Strömungszuständen in Anlagen und Maschinen. Insbesondere bei Simulationen mithilfe der CFD-Methode werden planerisch jedoch häufig nur stationäre Vorgänge betrachtet. Im Rahmen dieses Artikels sollen darauf aufbauend die Ergebnisse der instationären Simulation einer Blendenströmung mit Messergebnissen verglichen und eine Aussage über die erreichbare Abbildungsgüte getroffen werden.

Bei ausreichender Übereinstimmung der simulierten Blendenströmungen mit den realen Strömungsverhältnissen gilt es abschließend, die zeitlichen Durchsatzschwankungen näher zu betrachten. Neben dem resultierenden Messfehler soll das Augenmerk dabei auf dem Einfluss der für die instationäre Durchflussbestimmung mitentscheidenden trägen Fluidmasse zwischen den Druckentnahmestellen liegen.

2. Motivation

Der Einfluss stationärer bzw. instationärer Strömungseffekte auf den Mengemessfehler einer Wirkdruckmesseinrichtung – wie zum Beispiel einer Blende – ist in der Vergangenheit bereits untersucht worden [3], [4], [5]. Im Rahmen dieser Veröffentlichung steht der primäre Fokus der Untersuchungen daher auf der Validierung der durchgeführten CFD-Simulationen von instationären Strömungsvorgängen, sowie deren physikalischen Interpretation. Dementsprechend wurde auf ein sowohl empirisch als auch analytisch bereits tiefgründig betrachtetes Untersuchungsobjekt wie eine Wirkdruckblende nach DIN 5167 zurückgegriffen. Neben dem bekannten Betriebsverhalten als Wirkdruckmesseinrichtung lässt sich eine Blende aufgrund ihrer dissipativen Wirkung ebenfalls zur Dämpfung von Pulsationen einsetzen. Im Kontext zu einem in Kooperation mit KÖTTER Consulting Engineers laufenden Forschungsvorhaben, welches sich mit der Entwicklung eines passiven, adaptiven

Pulsationsdämpfers für Rohrleitungen auseinandersetzt, lassen sich anhand der instationären Simulation der Blendenströmung grundlegende Erkenntnisse gewinnen. Anhand dieser Erkenntnisse gilt es zu einem späteren Zeitpunkt mögliche Wirkprinzipien zur adaptiven Dämpfung pulsierender Strömungen zu erarbeiten und hinsichtlich ihrer Effektivität mithilfe der CFD-Methode zu prüfen.

3. Grundlagen der Blendenströmung

Die Durchflussmessung mithilfe einer Blende stellt eines der auf einer Querschnittsverengung basierenden Wirkdruckverfahren dar, welches alternativ auch über Düsengeometrien oder Venturirohre realisiert werden kann. Bei der Bestimmung der Durchflussmenge mithilfe des Wirkdruckmessverfahrens muss generell differenziert werden, ob in einer ggf. pulsierenden Strömung eine stationäre Betrachtung ausreichend genaue Mengemessungen ermöglicht oder ob instationäre Betrachtungen erforderlich sind.

3.1 Stationäre Durchflussbestimmung

Anhand der Betrachtung der stationären Blendenströmung lässt sich das grundlegende Messprinzip des Wirkdruckverfahrens anschaulich erläutern: Durch die Einschnürung der Strömung im Bereich der Verengung ergibt sich lokal eine höhere Strömungsgeschwindigkeit, welche zu einer Absenkung des statischen Druckes in diesem Bereich führt. Abbildung 1 zeigt eine hierfür typische Strömungskontur mit dem dazugehörigen, statischen Druckverlauf über der Längsachse einer Rohrleitung. Durch den Abgriff der statischen Drücke an zwei Positionen (vor und hinter der Blende) lässt sich über die bekannte Blendengeometrie und ebenfalls bekannten Stoffparameter der Durchsatz q_m gemäß nachfolgender Gleichung aus [1] bestimmen:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

Dabei entspricht das $\Delta p = p_1 - p_2$ dem Differenzdruck zwischen den beiden Messpunkten, welcher auch als Wirkdruck bezeichnet wird. Neben den geometrischen Parametern – Blendendurchmesser d und Durchmesser Verhältnis $\beta = d/D$ (D = Rohrinne Durchmesser) – lassen sich der Durchflusskoeffizient C und die Expansionszahl ε mithilfe empirischer Formeln aus [1] entnehmen.

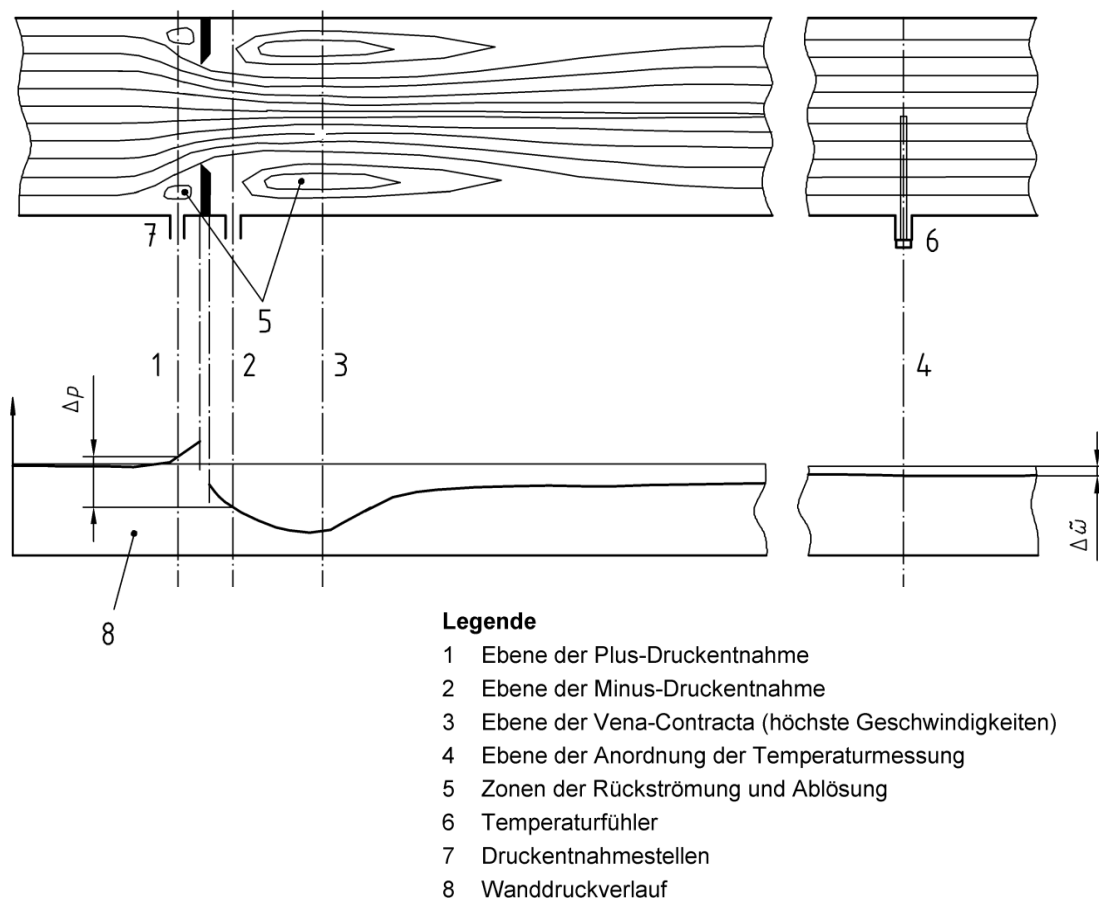


Abbildung 1: Qualitativer Verlauf einer stationären Blendenströmung mit dazugehörigem Druckverlauf nach [1]

Neben den in Abbildung 1 gezeigten Druckentnahmestellen unmittelbar vor und hinter der Blende besteht die Möglichkeit, in definierten Abständen vor (z.B. einfacher Rohrdurchmesser) und hinter (z.B. halber Rohrdurchmesser) der Blende die Drücke zu erfassen – (D-D/2-Druckentnahme).

3.2 Instationäre Durchflussbestimmung

Idealerweise wird der Wirkdruck bei stationären Strömungsbedingungen erfasst. Bei praktischen Anwendungen lässt sich dieses jedoch nicht immer realisieren, so dass zur Vermeidung von Messfehlern instationäre Effekte bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen.

Für erste Abschätzungen bzgl. des Durchsatzes bei instationären Vorgängen kann zunächst von einem quasi-stationären Zustand ausgegangen werden. Dieses beinhaltet, dass der Durchsatz weiterhin abhängig von der Wurzel des Differenzdruckes ist. Dementsprechend muss hierzu stets die Wurzel des Differenzdruckes gemittelt werden, da es sonst zum sogenannten „Wurzelfehler“ kommt:

$$(richtig) \sqrt{\overline{\Delta p}} \neq \overline{\sqrt{\Delta p}} \quad (falsch)$$

Um den instationären Durchsatz korrekt wiederzugeben, muss die stationäre Durchflussgleichung um den Einfluss der lokalen Fluidmassenträgheit erweitert werden:

$$\Delta p(t) = \frac{8}{\pi^2 \cdot \rho \cdot \varepsilon^2 \cdot C^2 \cdot d^2} \cdot (1 - \beta^4) \cdot q_m^2(t) + \frac{dq_m(t)}{dt} \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{A(s)} ds$$

Der erste Term der Gleichung beschreibt die auf der konvektiven Beschleunigung über der Blende basierenden Druckänderung, während der zweite Teil die lokale Beschleunigung der trägen Fluidmasse beinhaltet. Da die zu berücksichtigende relevante Querschnittsfläche $A(s)$ zwischen den Druckentnahmestellen unbekannt ist, wird nach ISO TR 3313 zur vereinfachten Handhabung ein mit der effektiven Länge l_E gebildeter Quotient eingeführt:

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{A(s)} ds = \frac{l_E}{\pi \cdot C \cdot \beta^2 \cdot D^2}$$

Zur korrekten Bestimmung des instationären Durchflusses lassen sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung dieser Ersatzlänge l_E finden. Im Rahmen der hier durchgeführten Betrachtungen werden insbesondere zwei Ansätze behandelt. Der Ansatz in [2] geht davon aus, dass die effektive Länge dem Blendendurchmesser entspricht, siehe auch [3]. Alternativ wird auf die Bestimmung der Ersatzlänge nach Hebrard aus [7] zurückgegriffen, welche insbesondere das Durchmesser Verhältnis β und die Lage der Druckentnahmestellen differenzierter berücksichtigt.

Zur vereinfachten Auswertung der oben genannten Durchflussgleichung lässt sich diese nach [6] in die dimensionslose Form

$$\pi(\tau) = \delta^2(\tau) + G \cdot St \cdot \frac{d\delta(\tau)}{d\tau}$$

überführen. Hierin enthalten sind die dimensionslosen Parameter

- $\tau = t \cdot f_1$ dimensionslose Zeit (bezogen auf die Grundfrequenz f_1 der Wirkdruckschwankung)
- $\pi(\tau) = \frac{\Delta p(\tau)}{\Delta p_0}$ dimensionslose Wirkdruckschwankung
- $\delta(\tau) = \frac{q_m(\tau)}{q_{m,Fehl}}$ dimensionslose Massenstromschwankung

sowie der geometrische Parameter G und die auf die Grundfrequenz bezogene Strouhal-Zahl der Strömung:

- $G = \frac{2 \cdot C \cdot \varepsilon^2}{1 - \beta^4}$ Geometrie-Parameter
- $St = \frac{f_1 \cdot l_E}{q_{m,Fehl}} \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2$ Strouhal-Zahl

Auf Basis der gemessenen Wirkdruckschwankung und den bekannten Geometrie- und Stoffparametern lässt sich die nichtlineare Differentialgleichung für den dimensionslosen Massenstrom numerisch integrieren. In Analogie zum Vorgehen in [6] wurde im Rahmen dieser Arbeit das klassische Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung angewendet.

4. Ausstattung

Zur Erforschung unterschiedlicher strömungstechnischer Fragestellungen wird am FG Fluidtechnik sowohl auf experimentelle Ergebnisse als auch die analytische oder numerische Modellierung und Simulation des Forschungsgegenstandes zurückgegriffen. Nachfolgend werden dementsprechend der Aufbau und die Ausstattung des Versuchsstandes sowie die Grundlagen der CFD-Methode erläutert.

4.1 Experimentelle Ausstattung

Der Gasmengenversuchsstand des FG Fluidtechnik lässt sich vielseitig zur Untersuchung unterschiedlicher, stationärer sowie instationärer Fragestellungen aus dem Bereich der Strömungstechnik einsetzen. Um dieses zu ermöglichen wurde bereits bei der Planung und Konzeptionierung des Versuchsstandes auf eine nachhaltige Variabilität geachtet.

Gasmengenversuchsstand

Der Versuchsstand ist ein Closed-Loop, bestehend aus einer Antriebseinheit ($P_{el} = 100 \text{ kW}$), einer Druckregelung und einem Wärmeübertrager zur Realisierung gleichbleibender Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur, Volumenstrom) im Kreislauf. Der schematische Aufbau wird in Abbildung 2 dargestellt. Das Betriebsmedium ist Luft. Ein Referenzmessstreckenbereich mit zwei Referenzmessstrecken dient der Bestimmung des im Kreislauf bzw. in der Messstrecke durchgesetzten Massenstroms. In der Messstrecke werden Strömungsuntersuchungen unter dem Einfluss eines eigens konstruierten Pulsationsgenerators durchgeführt. Vor und hinter der Antriebseinheit befinden sich Pulsationsdämpfer zur Vermeidung hochfrequenter Druckschwankungen in der Referenz- bzw. Untersuchungsmessstrecke, hervorgerufen durch die als Antrieb eingesetzte modifizierte Schraubenmaschine. Ein weiterer Pulsationsbehälter, in dem der Pulsationsgenerator eingebaut ist, dient der Konditionierung der Strömung in der Messstrecke sowie der Vermeidung von Pulsationen zurück in die Referenzmessstrecken.

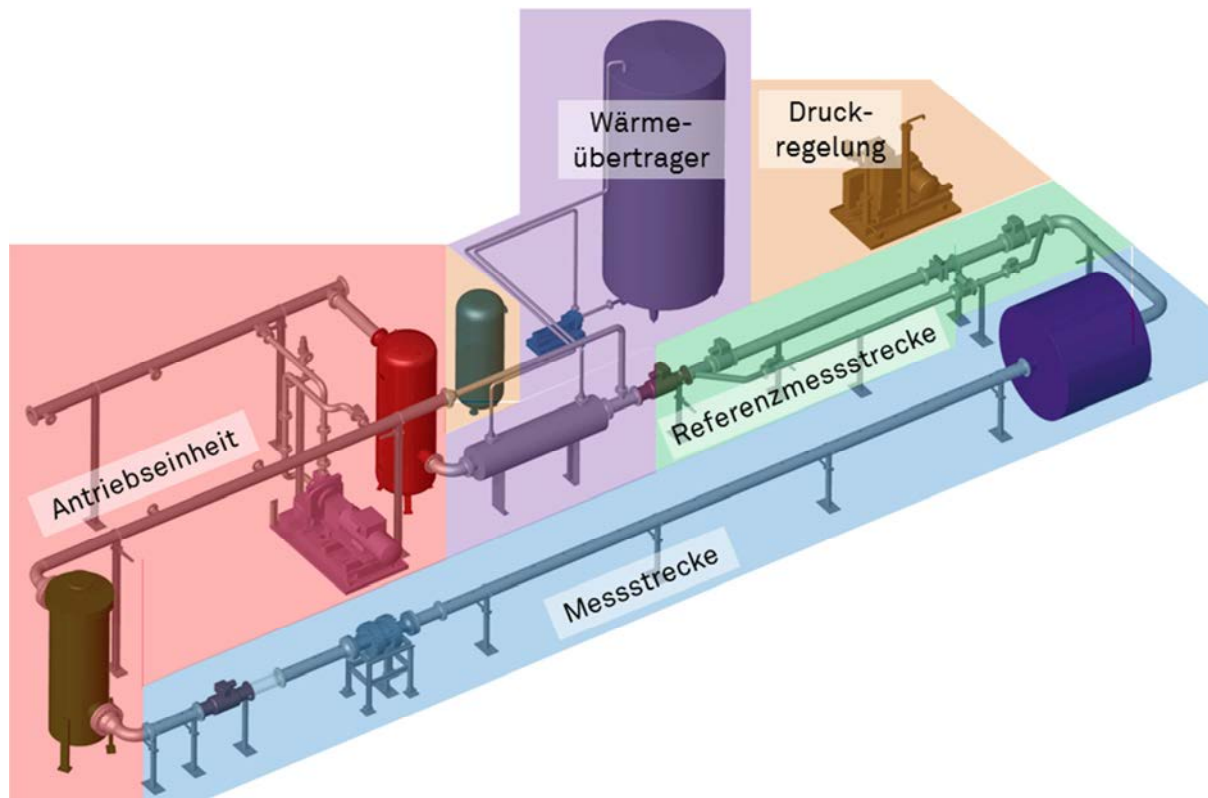


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsstandes

Die Messstrecke hat eine Nennweite von DN 200 und es lassen sich mit dem momentan installierten Schraubenkompressor Betriebsvolumenströme von bis zu 500 m³/h bei absoluten Betriebsdrücken von bis zu 8 bar a realisieren. In Anlehnung an die bevorstehenden Forschungsvorhaben ist für das Quartal 2/2014 eine Erweiterung des Versuchsstandes um ein Drehkolbengebläse ($P_{el} = 75 \text{ kW}$) zur Erhöhung des Volumenstroms auf 2.000 m³/h geringen Betriebsdrücken geplant.

Als Referenzzähler kommt in der ersten Referenzmessstrecke ein Doppelturbinenradzähler ETTM der Firma Flow Meter Group (FMG) der Nennweite DN200 (G1600) (125-2500m³/h) zum Einsatz. In der zweiten Referenzmessstrecke findet ein Ultraschallzähler FlowSic600 der Firma Sick der Nennweite DN100 (G650) (20-1000m³/h) seinen Einsatz. Alle Mengenumessungen werden im Weiteren auf den Ultraschallgaszähler als Referenz bezogen. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse der Referenzzähler wird von beiden Herstellern mit 0,1% vom Messwert angegeben. Die Referenzzähler werden abhängig von der Reynoldszahl entsprechend der Prüfpunkte der Kalibrierkurven abschnittsweise linear interpoliert korrigiert. Für die Temperaturmessung werden PT 100 Temperatursensoren der Toleranzklasse A nach DIN EN 60 751 eingesetzt. Die temperaturkompensierten Relativdrucksensoren zur Messung der statischen Drücke sind vom Hersteller mit einer Kennlinienabweichung von 0,1% des jeweiligen Messbereichsendwertes angegeben (i.d.R. 0-6 bar bzw. 0-10 bar Relativdruck).

Pulsationsgenerator

Der in einen Behälter eingebaute Pulsationsgenerator ermöglicht es in der Messstrecke eine niederfrequente Pulsation anzuregen. Die Anordnung ist in Abbildung 3 näher dargestellt. Dazu wird eine Schlitzblende von einem Schrittmotor bewegt, die rotierend gelagert ist. Möglich sind dabei sowohl ein vollständig rotierender Betrieb sowie ein oszillierender Betrieb für niedrige Frequenzen. Zurzeit ist es möglich, Frequenzen im Bereich von 0-80 Hz anzuregen.

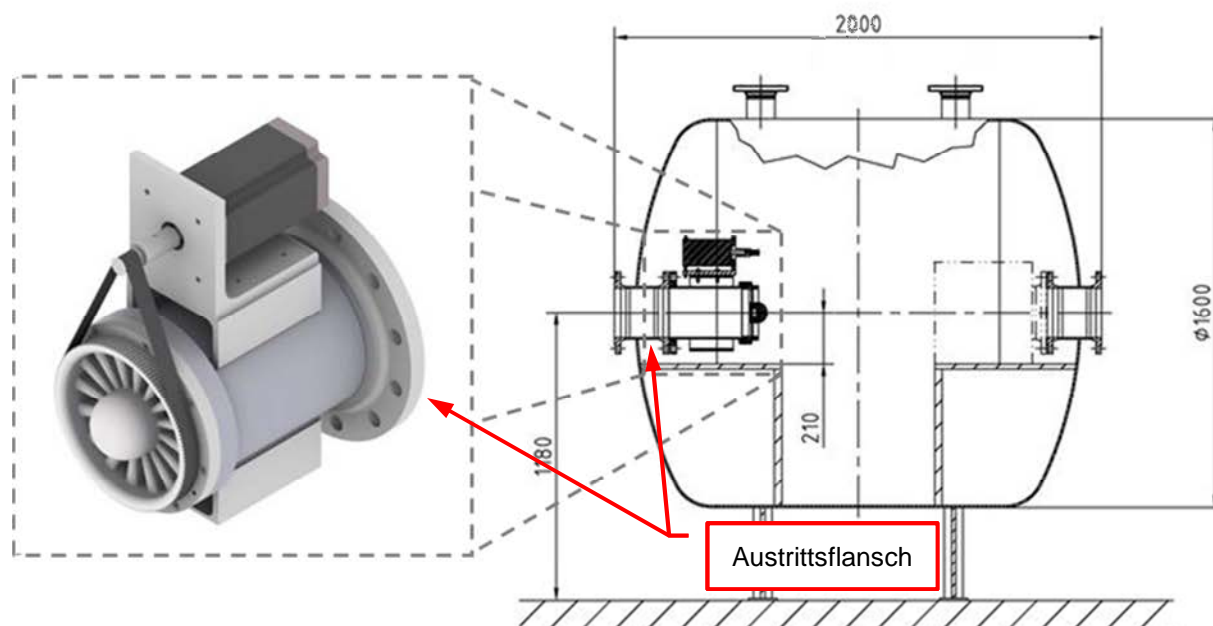


Abbildung 3: Pulsationsgenerator und Einbausituation im Behälter

Die akustische Übertragungsfunktion der Messstrecke ist frequenzabhängig, so dass es in der Regel zu unterschiedlich ausgeprägten Amplituden in Abhängigkeit vom Messort sowie der Frequenz kommt. Messungen zum Betriebsverhalten des Pulsationsgenerators zeigen, dass es sich akustisch um eine Geschwindigkeitsanregung (geschlossenes Ende) am Ort der rotierenden Blende handelt. Am Pulsationsdämpfer am Ende der Messstrecke ist ein akustisch offenes Ende. In der Regel stellt sich in der Messstrecke ein akustisch ebenes Wellenfeld ein, das aus der Überlagerung einer hin- und rücklaufenden Welle besteht. Mittels eines Regelkugelhahns am Ende der Messstrecke kann das Reflexionsverhalten im Bereich des Pulsationsdämpfers am Ende der Messstrecke gezielt beeinflusst werden.

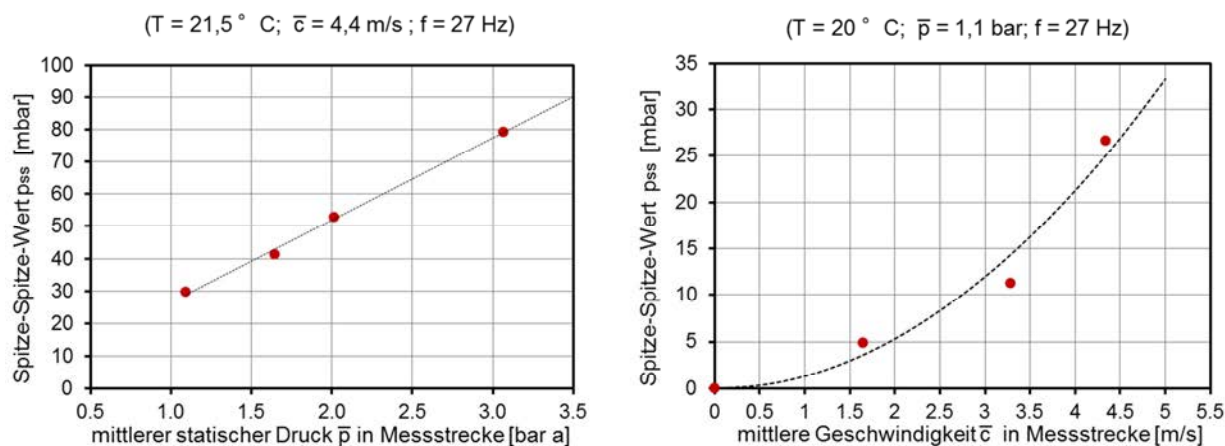


Abbildung 4: Beispiele für Spitze-Spitze Werte der Pulsation in der freien Messstrecke in Abhängigkeit vom mittleren Druck und der mittleren Geschwindigkeit

Beispielhafte Messungen in Abbildung 4 zeigen, dass der Druckverlust an der rotierenden Blende annähernd proportional zur Dichte bzw. quadratisch abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit in der Messleitung ist. Entsprechend stellen sich bei konstanter Frequenz mit größerer Strömungsgeschwindigkeit bzw. größerem mittlerem Druck höhere Spitze-Spitze Werte der Druckpulsation in der Messstrecke ein.

Blendenversuch

Abbildung 5 zeigt den Aufbau für die Messungen an einer Blende nach DIN 5167. Um den zeitabhängigen Wirkdruck zu erhalten, werden der Wirkdruckmessung mithilfe eines trägen Differenzdrucktransmitters die dynamischen Drucksignale, die in den beiden Druckentnahmeebenen zeitlich erfasst werden, überlagert. Der Absolutdruck vor der Blende wird mittels eines weiteren statischen Relativdrucksensors erfasst. Alle Messungen wurden bei einem Betriebsdruck von 2 bar a durchgeführt. Somit sind sowohl die mittleren Absolutdrücke vor und hinter der Blende als auch die Amplituden und Phasen der schwankenden Anteile vor und hinter der Blende bekannt. Diese Kombination der Messtechnik ermöglicht es, die vorteilhaften Messcharakteristiken von beiden Sensorprinzipien optimal auszunutzen. Die Abtastrate der dynamischen Drucksensoren liegt bei 2 kHz und damit hoch genug, um die betrachteten Frequenzen im Bereich bis 100 Hz abzubilden. Die Abtastrate der statischen Sensoren liegt bei 500 Hz und wurde durch Mittelung in den Teilintervallen bei einer Unterabtastung auf 1 Hz für die Auswertung berücksichtigt. Für die Messebenen vor und hinter der Blende wurden dafür gemäß der Norm [1] Messstellen im Abstand $D/2$ bzw. D in die Rohrleitung eingebracht. Die Rohrleitung hat im Bereich der Blende einen Innendurchmesser von $D = 206,5 \text{ mm}$. Für die Blende wurde ein Durchmesser Verhältnis von $\beta = 0,4$ gewählt.

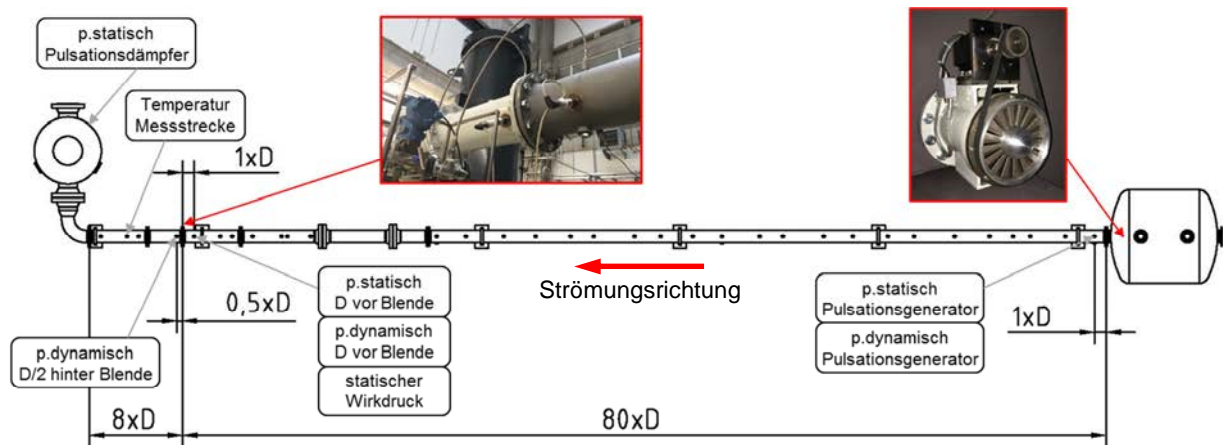


Abbildung 5: Versuchsaufbau der Untersuchung mit Blende

4.2 Strömungssimulation

Die Strömungssimulationen wurden mithilfe der kommerziellen Software ANSYS CFX 12 durchgeführt, welche den Preprocessor, den Solver und den Postprocessor beinhaltet. Vorab wird mithilfe der Software ICEM CFD anhand der Modellgeometrie das Netz für die Simulation erstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei auf ein strukturiertes Blocking zurückgegriffen, da hier eine differenzierte Beeinflussung der Netzqualität bzgl. Grenzschichtauflösung sowie Längen- und Winkelverhältnissen der Volumina ermöglicht wird. Anschließend werden im Preprozessor die Randbedingungen des Modells sowie die zu verwendenden Gleichungssysteme und das zu verwendende Turbulenzmodell sowie das Fluid vorgegeben. Um das instationäre Verhalten korrekt abzubilden, wird bei der Luft von einem kompressiblen Fluid ausgegangen, dessen Zustandsgleichung dem idealen Gasgesetz entspricht. Als Gleichungssystem wird auf die instationären reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen in Kombination mit dem SST-Turbulenzmodell [7] zurückgegriffen. Bei den Ein- und Austrittsbedingungen der simulierten Rohrabschnitte wurde – unter der Prämisse einer hohen Berechnungsstabilität – ein dynamischer Totaldruck am Eintritt und ein konstanter statischer Austrittsdruck vorgegeben. Die Oberflächenbeschaffenheit der Rohr- und Blendenwandungen wurde als ideal glatt angenommen.

Anschließend wurden die zahlreichen Simulation durchgeführt und die Ergebnisse mithilfe des Postprocessors ausgewertet. Nähere Angaben zu den betrachteten Kennwerten und Berechnungsergebnissen werden bei den Untersuchungen zur Blendenströmung genannt.

5. CFD-Simulationen zur Blendenströmung

Nachfolgend werden zunächst stationären CFD-Betrachtungen durchgeführt um für die Simulationen eine Validierung mit den empirischen Ergebnissen aus der DIN 5167 zu ermöglichen. Die bei den Messungen ermittelten Ein- und Austrittsdrücke werden dazu als Randbedingungen für die CFD-Simulation verwendet.

5.1 Stationäre CFD-Untersuchungen

Es soll nun zuerst ein geeignetes CFD-Modell zur Abbildung der Blendenströmungen ermittelt werden. Unter dem Aspekt eine möglichst feine Netzauflösung bei gleichzeitig akzeptablen Rechenzeiten zu erhalten, wurde die Rotationssymmetrie eines Rohres ausgenutzt und eine ausgebildete stationäre Rohrströmung betrachtet. Des Weiteren wurde die Annahme getroffen, dass neben turbulenzbedingten Querströmungen lediglich axiale und bei der Blendenströmung ggf. zusätzlich radiale Geschwindigkeitsanteile, jedoch unter der Annahme einer drallfreien Strömung keinesfalls azimutale Strömungsanteile vorliegen. Diese Annahme ermöglicht die Reduktion der vollen Kreisfläche auf ein einzelnes Kreissegment (4°- Ausschnitt), Abbildung 6.

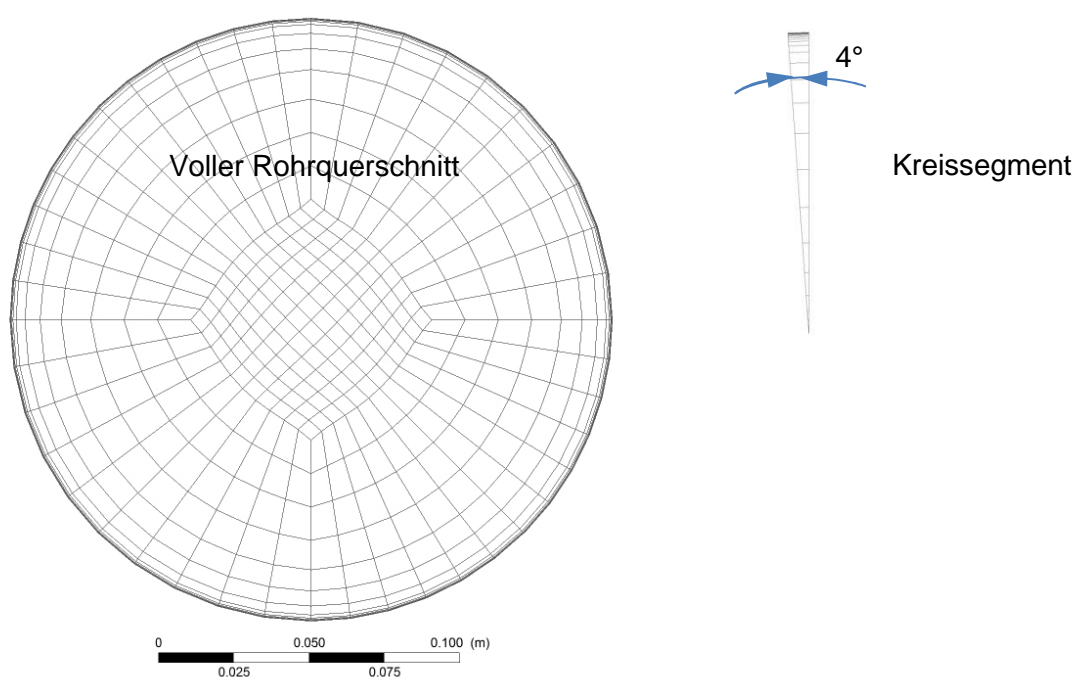


Abbildung 6: Vergleich der Netzquerschnitte normal zur Rohrachse

Neben den üblicherweise vorliegenden Randbedingungen für den Ein- und Auslass sowie die Rohrwandung eines CFD-Modells sind für die korrekte Abbildung mithilfe des Kreissegments weitere Randbedingungen notwendig. Um weiterhin eine axiale Rohrströmung im Sinne eines durchströmten Rohres zu erhalten, werden an den Seitenflächen zwei Symmetrieebenen eingefügt, welche eine Strömung durch diese Ebenen verhindern. Des Weiteren ergibt sich aufgrund der beim strukturierten Netz verwendeten Hexaeder-Elemente eine parallel zur Rohrwandung verlaufende Ebene im Bereich der Rohrmitte. Um das reale Rohrleitungsprofil realitätsnah abzubilden wird hier – im Gegensatz zur Rohrwandung – keine Haftbedingung vorgegeben, was den in der Rohrmitte zu vernachlässigenden Schubspannungen innerhalb des Fluids entspricht.

Um die Eignung dieser Modellreduzierung zu überprüfen, wurden Vergleiche bzgl. des radialen Strömungsprofils sowie dem differentiellen Druckverlust dp/dx über der Länge für gleiche Ein- und Auslassbedingungen durchgeführt.

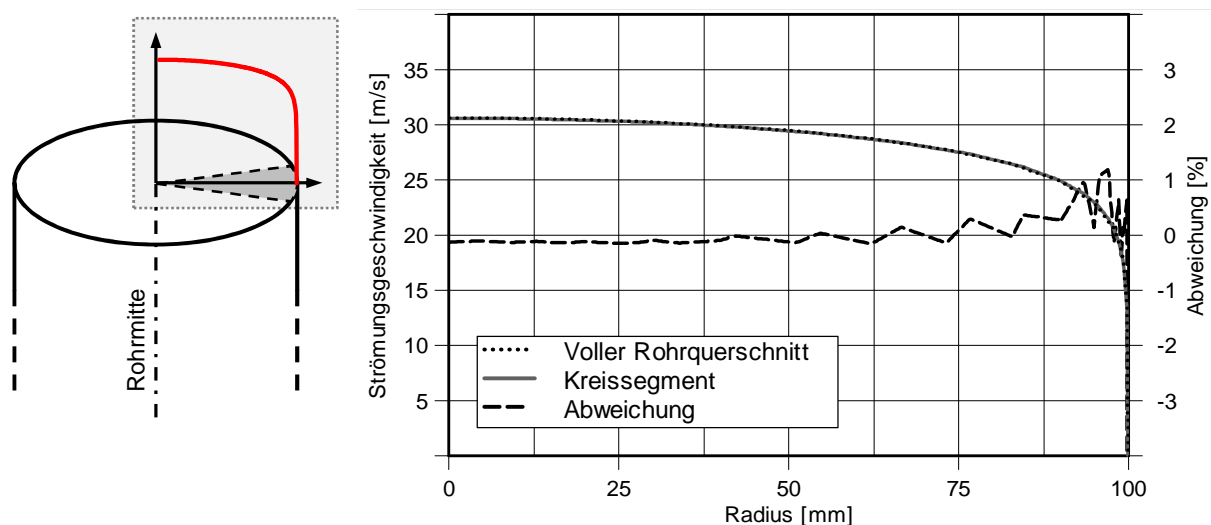


Abbildung 7: Vergleich der Strömungsprofile über dem Radius ($D = 200$ mm, $Re_D = 700.000$)

Die in Abbildung 7 gezeigten Strömungsprofile zeigen die sehr gute Übereinstimmung der beiden Rohrleitungsmodelle. Die maximale Abweichung der axialen Strömungsgeschwindigkeiten liegt bei 1 %. Bei dem Vergleich des aus der Rohrreibung resultierenden Druckverlustes zeigen sich ebenfalls geringfügige Abweichungen der Modelle untereinander sowie zu dem sich ergebenden Druckverlust für eine technisch glatte Rohrwandung nach Nikuradse [9] ($Re_D = 700.000$), Tabelle 1.

CFD-Modell	Nikuradse	Voller Rohrquerschnitt	Kreissegment
Druckabfall dp/dx	54,6 Pa/m	56,0 Pa/m	56,4 Pa/m
Abweichung	-	+2,5 %	+3,3%

Tabelle 1: Vergleich der Druckverluste entlang der Rohrleitung

Aufgrund der geringen Abweichungen zur Theorie und den vernachlässigbaren Abweichungen zur Simulation eines vollen Rohrquerschnitts werden die nachfolgenden Untersuchungen zur Blendenströmung mit einem auf ein Kreissegment reduzierten Modell durchgeführt.

Bei der Vernetzung der Anordnung mit Blende wurde insbesondere in dem Bereich um die Blende eine besonders hohe Elementdichte gewählt, Abbildung 8. Hierbei wurde auf eine sehr feine Auflösung der Grenzschicht um die Blende sowie eine normgetreue Abbildung der Blendengeometrie mit dazugehöriger Fase geachtet. Um eine nach DIN 5167 optimale Anströmung mit einem vollkommen ausgebildeten Strömungsprofil zu erzielen wurde die Einlaufänge mit dem 75fachen des Rohrinneindurchmessers von $D = 206,5$ mm gewählt.

Das Durchmesser Verhältnis wurde analog zu der am Versuchsstand eingesetzten Messblende mit $\beta = 0,4$ gewählt (Blendendurchmesser $d = 82,6$ mm).

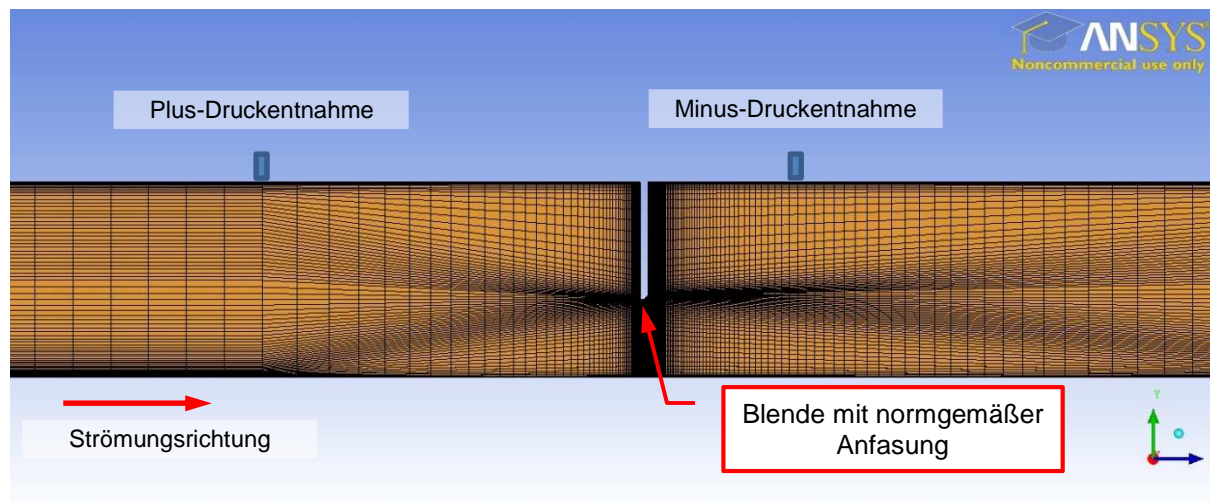


Abbildung 8: Strukturiertes Netz des Kreissegmentes im Nahbereich der Blende

Zur Auswertung der Simulationsergebnisse wurde an den der Norm entsprechenden D-D/2-Druckentnahme-Positionen der statische Druck an der Rohrwand sowie der Wirkdruck Δp_{Blende} erfasst und mithilfe der Auswerterroutine nach DIN 5167 der Massendurchfluss bestimmt. Der daraus resultierende Massenstrom \dot{m}_{Blende} wurde anschließend mit dem tatsächlichen Massenstrom \dot{m}_{Ist} verglichen, der sich aus der Integration der differentiellen Massenströme über dem Radius ergibt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Simulation für verschiedene Differenzdrücke zwischen dem Modellein- und -austritt (Δp_{Modell}). Die Fehlerbestimmung E_{CFD} erfolgt über den Quotienten:

$$E_{CFD} = \frac{\dot{m}_{Blende} - \dot{m}_{Ist}}{\dot{m}_{Ist}}$$

Δp_{Modell}	Re_D	Δp_{Blende}	\dot{m}_{Blende}	\dot{m}_{Ist}	E_{CFD}
500 Pa	60.000	591 Pa	0,173 kg/s	0,174 kg/s	-0,62 %
1.500 Pa	101.000	1.776 Pa	0,299 kg/s	0,301 kg/s	-0,81 %
2.000 Pa	117.000	2.369 Pa	0,345 kg/s	0,348 kg/s	-0,91 %
10.000 Pa	240.000	11.850 Pa	0,760 kg/s	0,773 kg/s	-1,62 %

Tabelle 2: Vergleich des Massendurchsatzes der Simulationsergebnisse mit den gemäß der DIN 5167 bestimmten Massendurchsätzen

Die Ergebnisse zeigen eine relativ gute Übereinstimmung der simulierten Durchsätze mit den anhand der Druckmessstellen gemäß DIN 5167 berechneten Durchsätzen.

5.2 Instationäre CFD-Untersuchungen

Nach erfolgreicher Verifikation der CFD-Modellierung für die stationäre Blendenströmung soll das zweidimensionale Kreissegmentmodell nun an die geometrischen Längenabmessungen der Messtrecke angepasst werden, Abbildung 9.

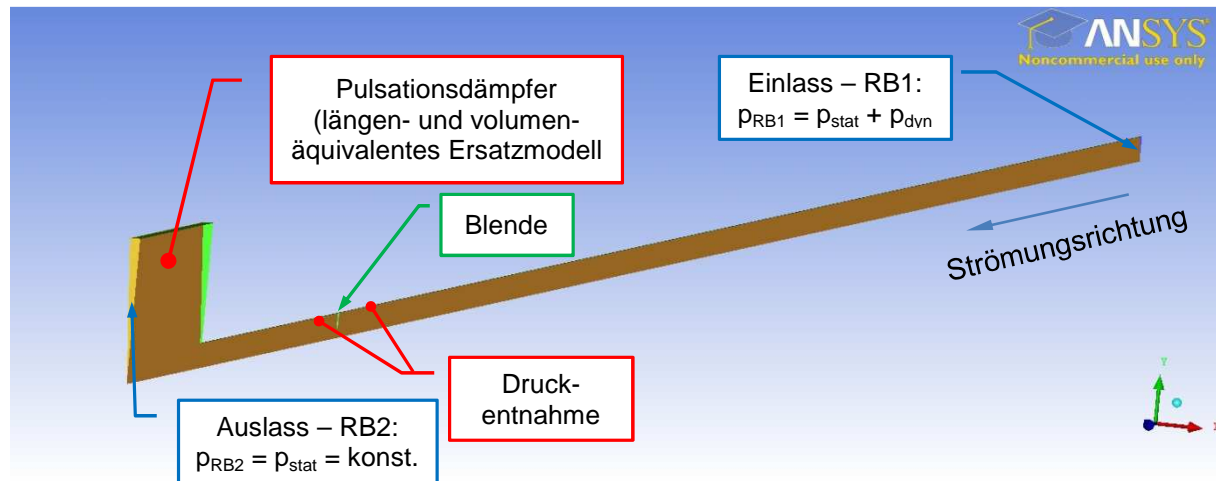


Abbildung 9: Kreissegmentmodell der Messtrecke sowie die verwendeten Randbedingungen

Anhand von bereits durchgeführten Untersuchungen zur Anregungscharakteristik des Pulsationsgenerators bei Pulsationsfrequenzen f von 4 bis 27 Hz werden Randbedingungen für die Simulation definiert. Am Systemeintritt (RB1) wird eine harmonische Schwankung des Gesamtdruckes vorgegeben, während am Pulsationsdämpfer (RB2) ein konstanter statischer Austrittsdruck von 2 bar aufgeprägt wird. Die Simulationsdauer wird so gewählt, dass von einem aus akustischer Sicht eingeschwungenen Zustand der Geschwindigkeits- und Druckpulsationen ausgegangen werden kann.

Anschließend wird über den anhand der statischen Druckverläufe an den virtuellen Druckentnahmestellen bestimmten Wirkdruck einerseits der Durchsatz nach DIN 5167 andererseits anhand der instationären Durchflussgleichung (vgl. Abschnitt 3.2) bestimmt. Die Ergebnisse werden anschließend mit dem tatsächlich im zeitlichen Mittel durchgesetzten Massenstrom \dot{m}_{Ist} (Integration über die differentiellen Massenströme über der Blende) verglichen und der jeweilige Messfehler E_{CFD} bestimmt.

In Abbildung 10 sind die sich bei einer Anregungsfrequenz von 27 Hz einstellenden Druckschwankungen an den virtuellen Druckentnahmestellen der Blende sowie die sich daraus anhand der instationären Durchflussgleichung ergebende Massenstromschwankung für eine Periode über der dimensionslosen Zeit τ dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass der Massenstrom dem Wirkdruck aufgrund der Trägheit der Masse zeitlich versetzt folgt.

Abschließend wird nach einer zeitlichen Mittelung des Wirkdruckes der Durchsatz nach DIN 5167 bestimmt und mit den nach Abschnitt 3.2 korrigierten Massenströmen verglichen, Abbildung 11.

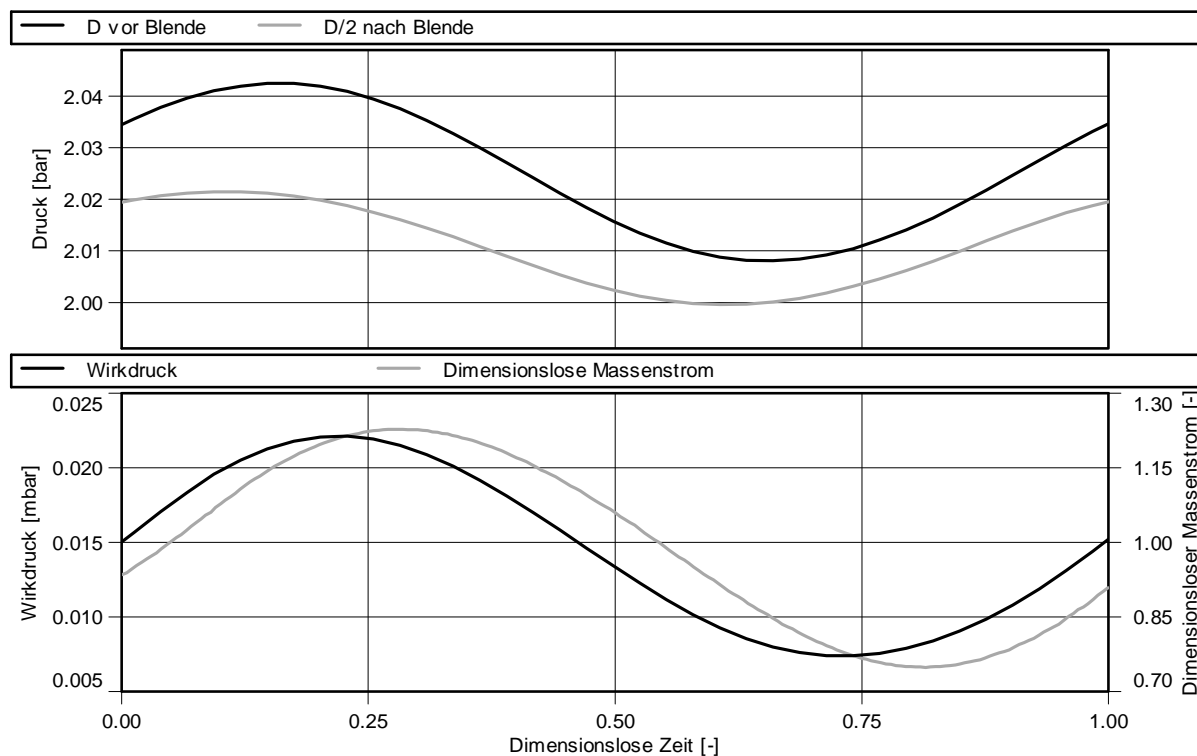


Abbildung 10: Simulierte Druckverläufe an den virtuellen Druckentnahmestellen der Blende sowie Wirkdruck und dimensionsloser Massenstrom über der dimensionslosen Zeit ($f = 27 \text{ Hz}$, $l_E = d$)

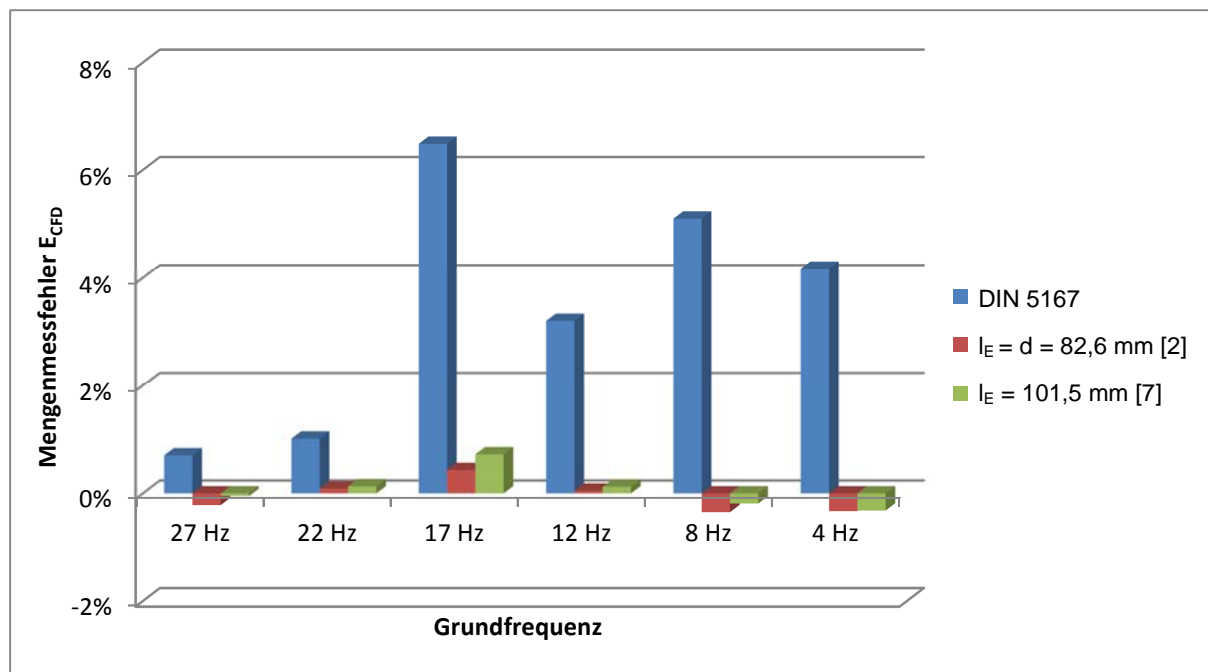


Abbildung 11: Ausgewertete Mengemessfehler E_{CFD} der instationären CFD-Simulationen bei stationärer (DIN 5167) und instationärer Durchsatzbestimmung

Die Ergebnisse zeigen unkorrigierte Messfehler E_{CFD} bei stationärer Betrachtung von bis zu 6,3 %. Durch Korrektur mit der instationären Durchflussgleichung (vgl. Abschnitt 3.2) lassen

sich diese Abweichungen auf Mengennmessfehler von ca. $\pm 0,05 - 0,4\%$ korrigieren. Hierbei zeigt sich unter anderem, dass die gewählten Ersatzlängen l_E in Abhängigkeit von den Frequenzen ähnlich gute Übereinstimmungen liefern. Eine generelle Aussage über eine mehr oder weniger geeignete Ersatzlänge ist demzufolge anhand dieser Ergebnisse nicht möglich. Festhalten lässt sich jedoch, dass die Annahme einer größeren Ersatzlänge hier zu geringeren Korrekturfaktoren führt.

Um einen Eindruck über das instationäre Strömungsprofil im Bereich der Blende zu erhalten, ist dieses in Abbildung 12 neben dem stationären Strömungsprofil qualitativ über einer Periode dargestellt.

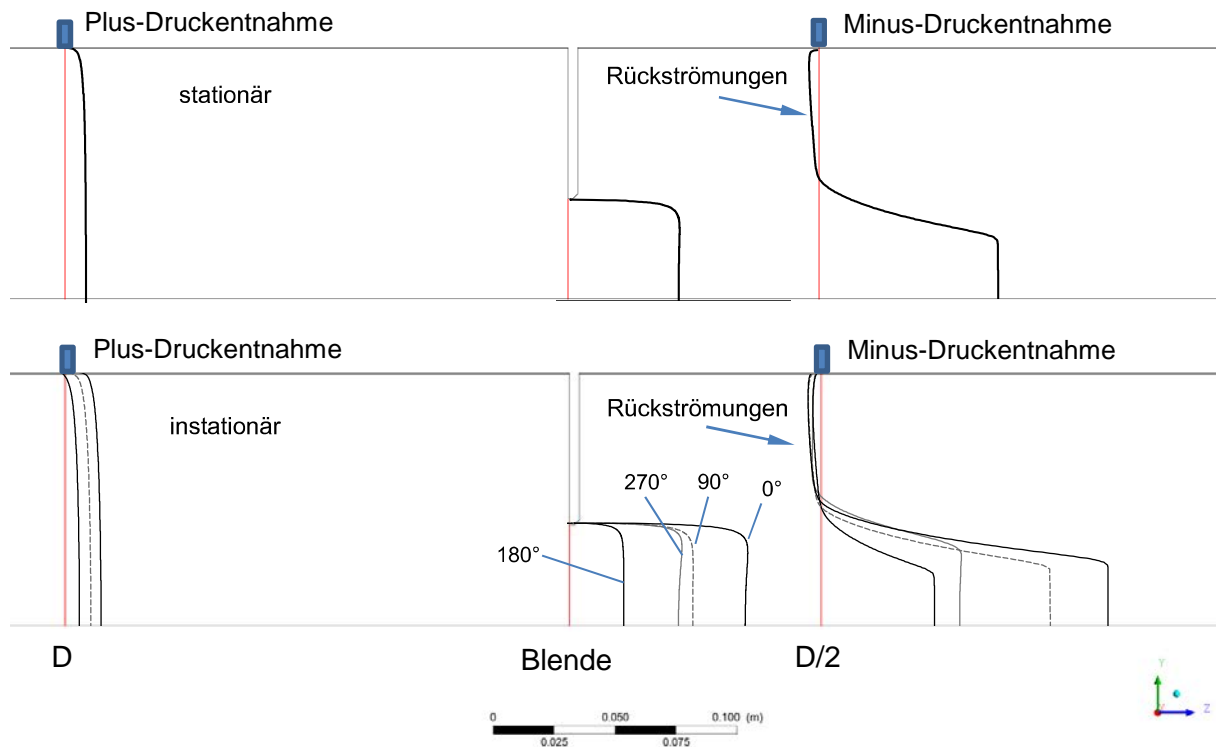


Abbildung 12: Qualitative Darstellung der simulierten, stationären und instationären Strömungsprofile im Blendenquerschnitt sowie den Druckentnahmeebenen ($f = 27 \text{ Hz}$)

Hierbei werden insbesondere die abweichenden Geschwindigkeitsprofile für die beschleunigte Strömung ($dc/dt > 0$) und die verzögerte Strömung ($dc/dt < 0$) ersichtlich. Insgesamt haben die instationären Strömungssimulationen somit gezeigt, dass die beschriebene CFD-Simulation eine hohe Abbildungsgüte bei akzeptablem Berechnungsaufwand ermöglicht. Des Weiteren lassen sich anhand der Detailbetrachtungen – bspw. der Strömungsprofile – nähere Erkenntnisse über das generelle Betriebsverhalten von Strömungsvorgängen gewinnen.

6. Messtechnische Untersuchungen zu Blendenströmung

Nachdem bei den CFD-Simulationen eine gute Übereinstimmung mit der eindimensionalen Theorie ermittelt wurde, soll nun ein Vergleich zu experimentellen Versuchen erfolgen.

6.1 Stationäre messtechnische Untersuchungen

Mithilfe der in Abbildung 5 gezeigten Messpunktconfiguration soll zunächst der Messaufbau sowie die verwendete Messtechnik hinsichtlich der Übereinstimmung mit der DIN 5167 für stationäre Bedingungen verifiziert werden. Dazu wird für unterschiedliche Durchsatzmengen der über die USZ-Referenzmessung ermittelte Massenstrom mit dem anhand des Wirkdrucks über der Blende nach DIN 5167 ermittelten Massenstrom verglichen, Abbildung 13. Der Mengemessfehler der messtechnischen Untersuchungen wird dabei wie folgt definiert:

$$E_{\text{Versuch}} = \frac{\dot{m}_{\text{Blende}} - \dot{m}_{\text{USZ}}}{\dot{m}_{\text{USZ}}}$$

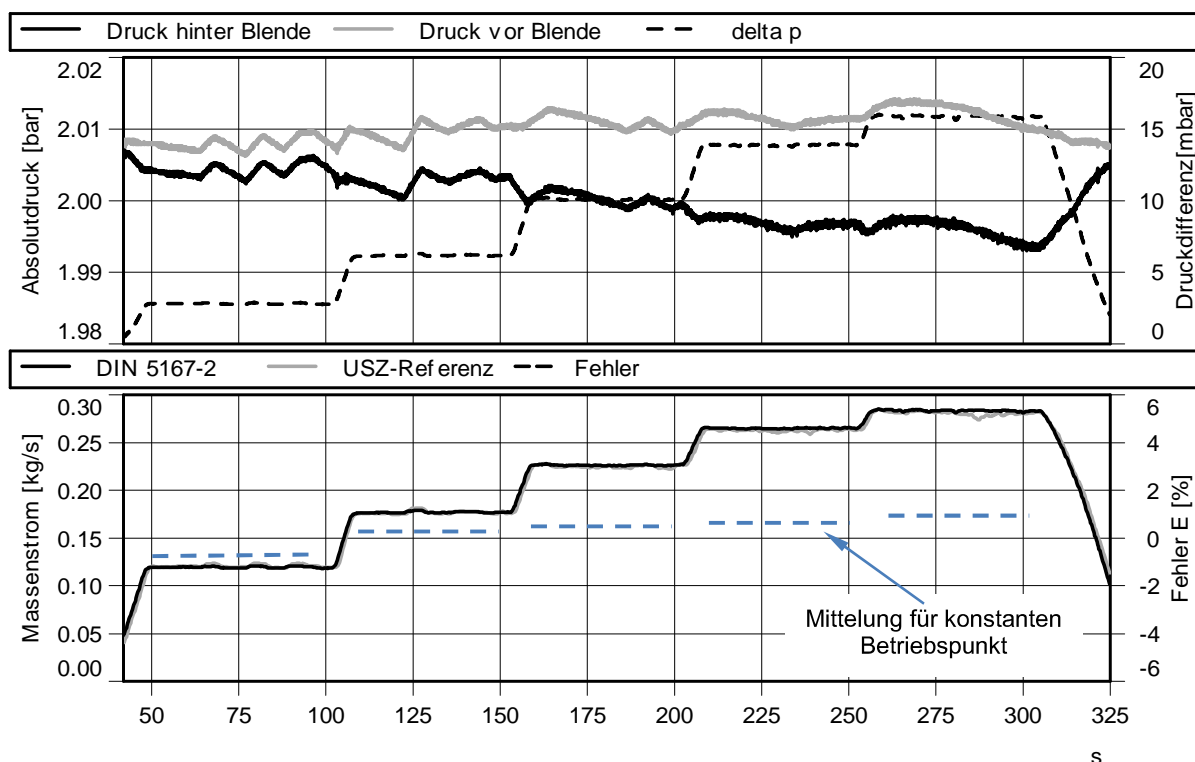


Abbildung 13: Statische Drücke vor und hinter der Blende und Wirkdruck (oben) sowie Blendenmassenstrom, USZ-Massenstrom und Mengemessfehler über der Zeit für verschiedene Betriebspunkte

Die geringfügigen Abweichungen insbesondere während der Drehzahländerungen basieren auf den unterschiedlichen Messpositionen im Kreislauf bzw. dem Line-Pack-Effekt am Behälter des Pulsationsgenerators. Für die nahezu stationären Betriebspunkte liegt der Mengemessfehler E_{Versuch} im Bereich von unter einem Prozent.

Anhand der guten Übereinstimmung mit der DIN 5167 kann der messtechnische Versuchsaufbau inklusive der verwendeten Sensorik als geeignet erachtet werden und für differenzierte instationäre Untersuchungen verwendet werden.

Im Rahmen erneuter stationärer Referenzmessungen nach dem Betrieb des Pulsationsgenerators zeigten sich zwischenzeitig jedoch unerklärliche Abweichungen des Durchflusses von über sieben Prozent zur Referenzmessung mit dem USZ. Eine gezielte Untersuchung dieses Sachverhalts hinsichtlich der momentanen Pulsationsgeneratorposition offenbarte die Abhängigkeit des Messfehlers von ungünstigen Stellwinkeln des Pulsationsgenerators. Abbildung 14 zeigt die Abhängigkeit des über den Wirkdruck bestimmten Durchsatzes für konstante Betriebsparameter bei unterschiedlichen Pulsationsgeneratorstellungen (PG-Ausgang).

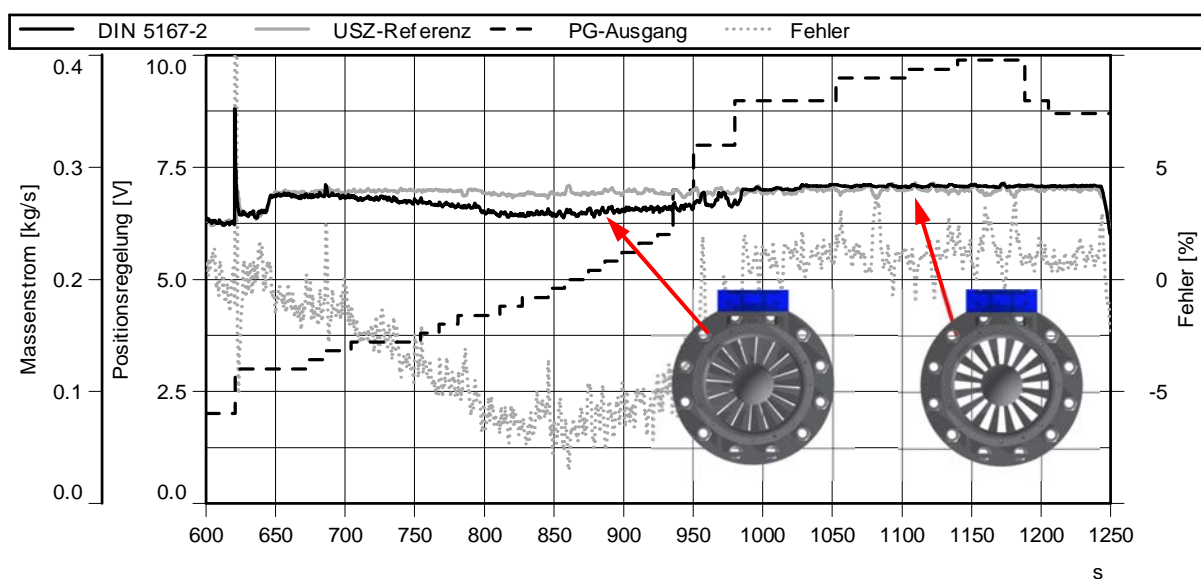


Abbildung 14: Abhängigkeit des über die Blende bestimmten Massenstroms von der Ruhelage des Pulsationsgenerators

Da im Betrieb zu diesem Zeitpunkt keine Positionsbestimmung der rotierenden Scheibe möglich war, kann hier nur vermutet werden, dass ein inhomogenes bzw. nicht voll ausgeprägtes Strömungsprofil für diese Messfehler verantwortlich ist. Es wird angenommen, dass die Abweichungen bei besonders geringen Öffnungsflächen der Pulsationsgeneratorblende zustande kommen, welches anhand der dargestellten Blendenöffnungen verdeutlicht werden soll. Da dieser Effekt der Vorstörung des Strömungsprofils gemäß der DIN 5167 bei Einlaufängen von über 75 D ausgeschlossen sein sollte, gilt es diesen Einfluss – nach dementsprechender Ausstattung des Pulsationsgenerators mit geeigneter Positionsmessung – zu einem späteren Zeitpunkt näher zu untersuchen.

6.2 Instationäre messtechnische Untersuchungen

Nachdem die stationären Untersuchungen zufriedenstellende Ergebnisse liefern, soll nun das instationäre Verhalten der Versuchsstrecke untersucht werden.

Um die instationären Untersuchungen bei einem möglichst großen Pulsationsniveau durchzuführen, wurden diese bei maximalem Volumenstrom realisiert. Der Pulsationsgenerator wurde hierbei – analog zu den bereits durchgeführten Simulationen – mit unterschiedlichen Drehfrequenzen betrieben. In Abbildung 13 ist der zeitliche Verlauf der dynamischen Wirkdrücke an der Blende für unterschiedliche Pulsationsfrequenzen dargestellt.

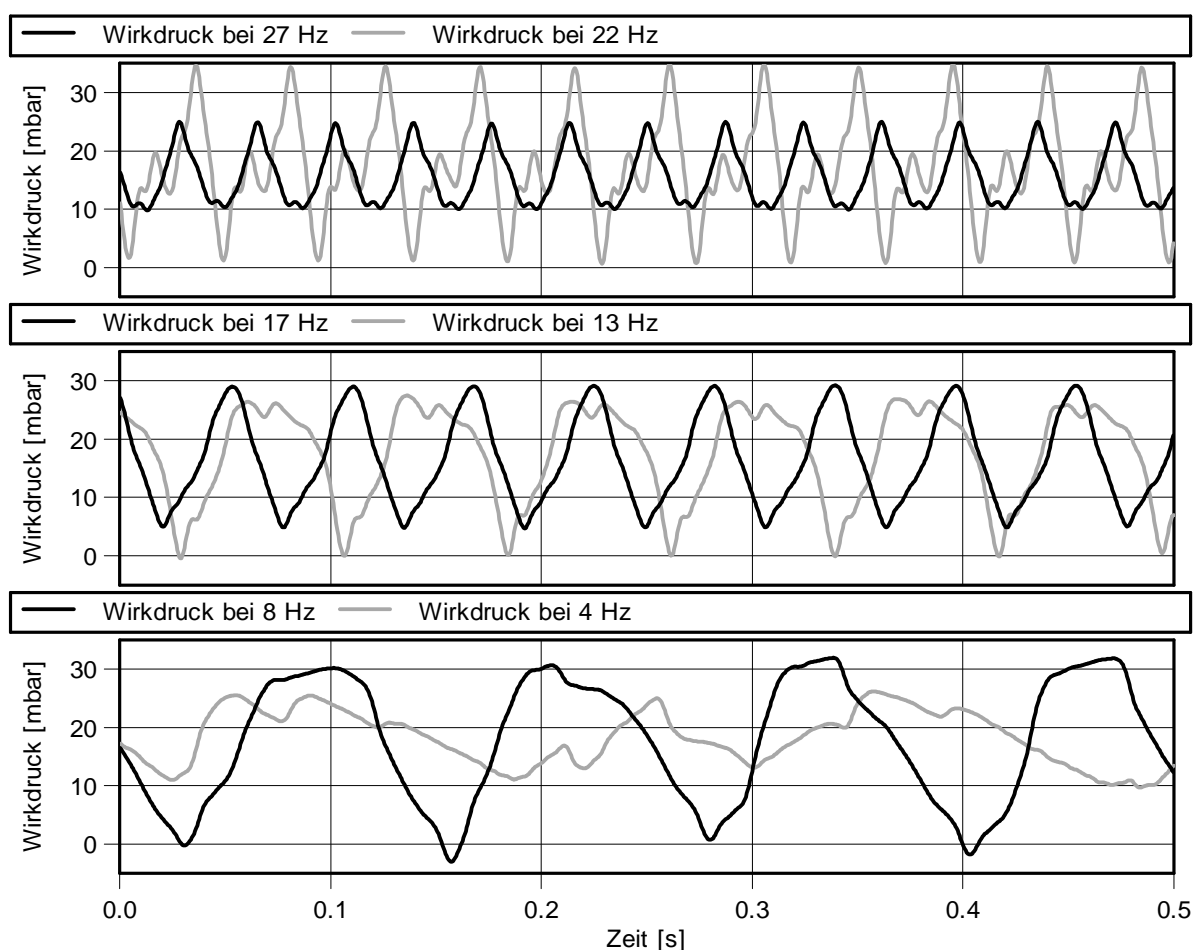


Abbildung 13: Experimentell ermittelte Zeitverläufe des Wirkdruckes für unterschiedliche Grundfrequenzen des Pulsationsgenerators

Die Druckverläufe zeigen, dass die Grundfrequenzen des Pulsationsgenerators von höherharmonischen Frequenzanteilen überlagert werden. Aufgrund der ausreichenden Periodizität der Grundharmonischen lassen sich die Massenstromschwankungen dennoch durch die in Abschnitt 3.2 beschriebene Lösung der nichtlinearen Durchflussgleichung mithilfe des klassischen Runge-Kutta-Verfahrens bestimmen. Beispielhaft für eine Grundfrequenz von 27 Hz sind die Massenstromschwankungen mit dem dazugehörigen Wirkdruck in Abbildung 14 über der dimensionslosen Zeit dargestellt.

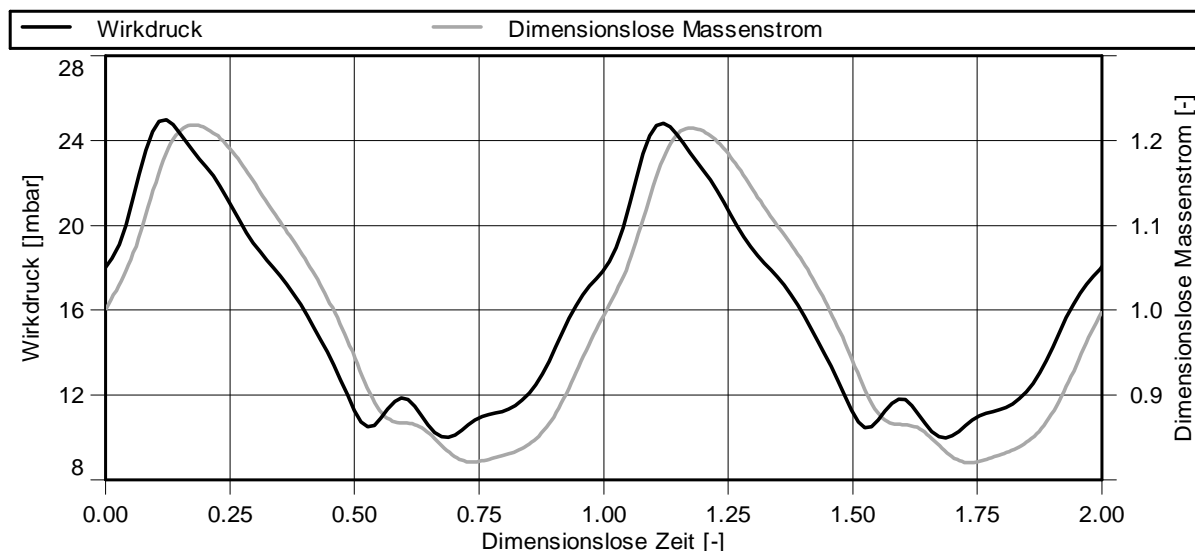


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen dem Wirkdruck und dem daraus resultierenden, dimensionslosen Massenstrom für eine Grundfrequenz von 27 Hz ($l_E = d$)

Anhand der Darstellung über einzelne Perioden wird ersichtlich, dass der Massenstrom dem Wirkdruck aufgrund der Trägheit der Masse zeitlich versetzt folgt. Zudem spielen höherfrequente Anteile im Wirkdruck aufgrund der Trägheit hinsichtlich des Massenstroms eine untergeordnete Rolle und die maßgebliche Massenstromschwankung setzt sich primär aus der Grundfrequenz sowie der zweiten und dritten Harmonischen zusammen.

Wie bereits im Abschnitt der instationären Durchflussbestimmung beschrieben, stellt die angenommene Ersatzlänge l_E einen wesentlichen Einflussparameter auf die Massenstromschwankung dar. Der zeitliche Versatz nimmt mit zunehmender Masse bzw. größeren Ersatzlängen zu. Die Massenstromschwankungen werden gleichzeitig mit zunehmender Ersatzlänge kleiner. Nachfolgend sind in Abbildung 15 die ermittelten Abweichungen zur USZ-Referenz für die Durchsatzbestimmung ohne instationäre Korrekturfaktoren (stationäre Betrachtung), mit der vereinfachten Annahme des Blendendurchmessers als Ersatzlänge [2] und den Betrachtungen für die Ersatzlänge nach [6] vergleichend dargestellt.

Hierbei zeigt sich, dass bei stationärer Betrachtung teilweise sehr große Mengemessfehler zur USZ-Referenz von bis zu 8 % auftreten. Zudem wird ersichtlich, dass die Korrektur mithilfe der instationären Durchflussgleichung bei den erfassten Zuständen keine gänzliche Fehlerkorrektur ermöglicht.

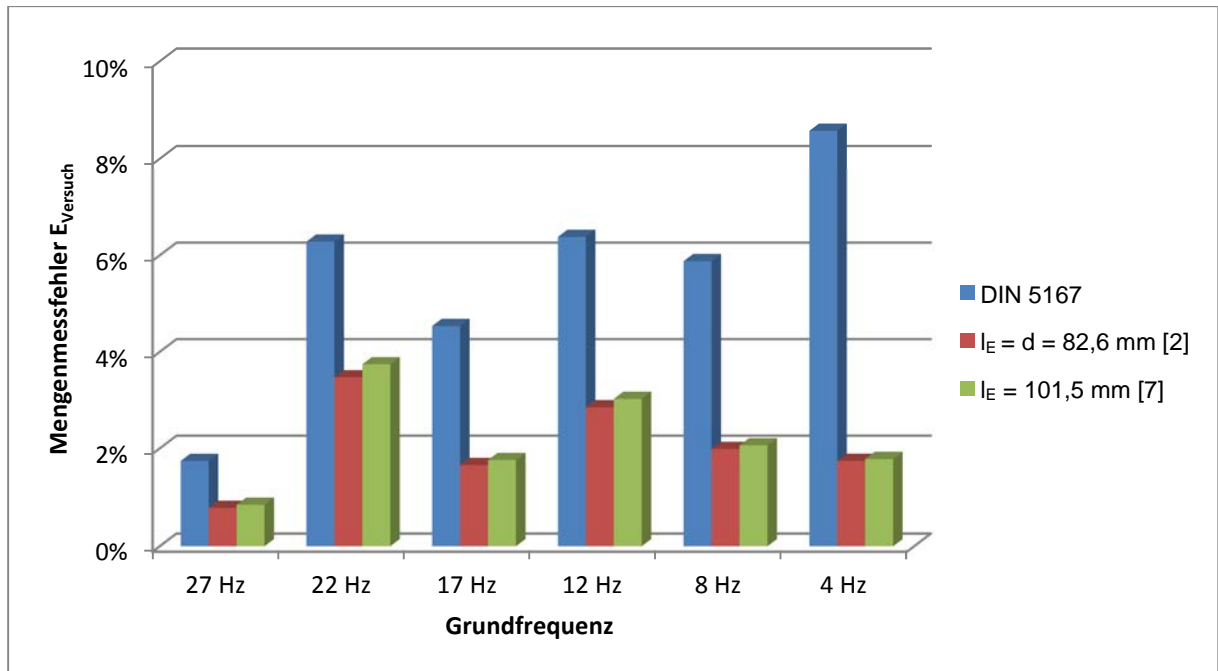


Abbildung 15: Mengenmessfehler E_{Versuch} bei stationärer und instationärer Durchsatzbestimmung mit unterschiedlichen Korrekturansätzen

Um den zunächst gering erscheinenden Einfluss der Ersatzlänge näher zu untersuchen, wird diese nachfolgend variiert. Die sich daraus ergebenden Mengenmessfehler E_{Versuch} werden in Abbildung 16 miteinander verglichen.

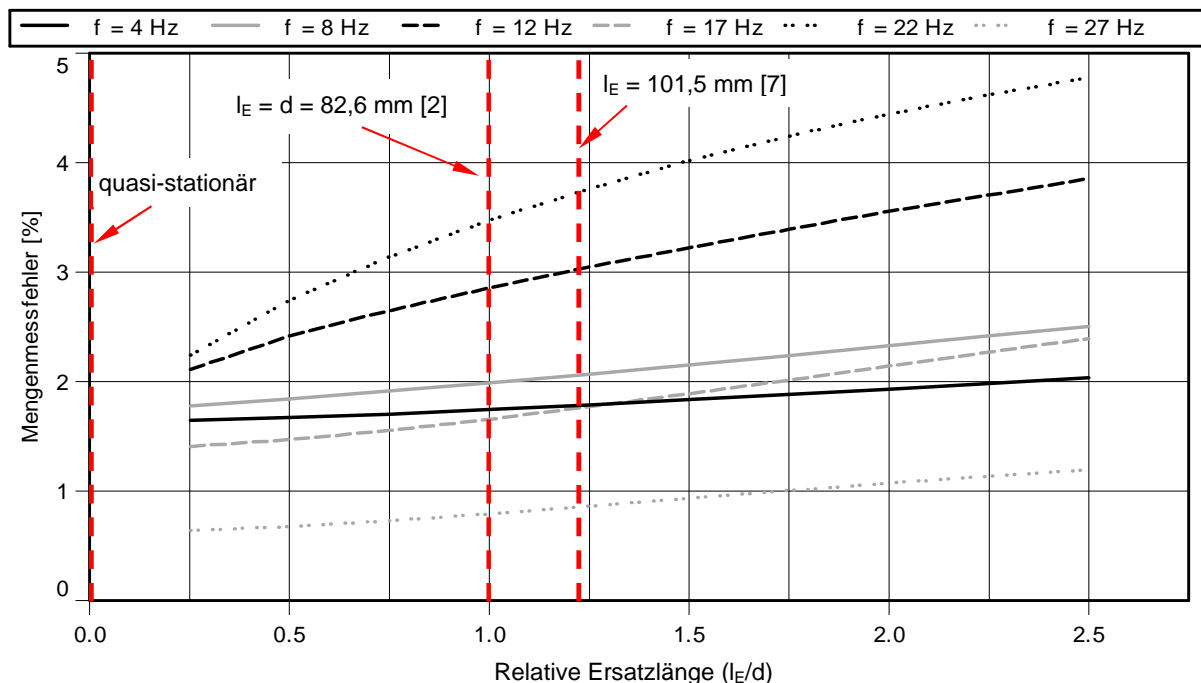


Abbildung 16: Abhängigkeit der Mengenmessfehler E_{Versuch} von der gewählten Ersatzlänge l_E (hier auf den Blendendurchmesser d bezogen)

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Grundfrequenzen verdeutlichen, dass für die ermittelten Messdaten keine vollständige Übereinstimmung mit der Referenzmessung

gefunden werden kann. Gemäß Abbildung 16 würde die quasi-stationäre Betrachtung (Vernachlässigung der Trägheit) sogar für sämtliche Messungen den geringsten Messfehler E_{Versuch} liefern. Da dieser Sachverhalt anhand von empirischen Untersuchungen und der physikalischen Gesetze jedoch nicht korrekt sein kann, wird von einer anderen Fehlerquelle ausgegangen.

Es wird vermutet, dass das bereits bei den stationären Betrachtungen beobachtete, inhomogene Strömungsprofil des Pulsationsgenerators für den verbleibenden Messfehler nach Korrektur verantwortlich ist.

7. Vergleich Messung und CFD-Simulation

Um einen direkten Vergleich der Messung mit der Simulation zu ermöglichen, soll ein Betriebspunkt betrachtet werden, der möglichst prägnant durch die Grundharmonische Pulsationsfrequenz gekennzeichnet ist. Hierzu wurden zeitlich aufeinanderfolgende Frequenzspektren der Druckpulsationen an der Plus-Druckentnahme vor der Blende gebildet, Abbildung 17.

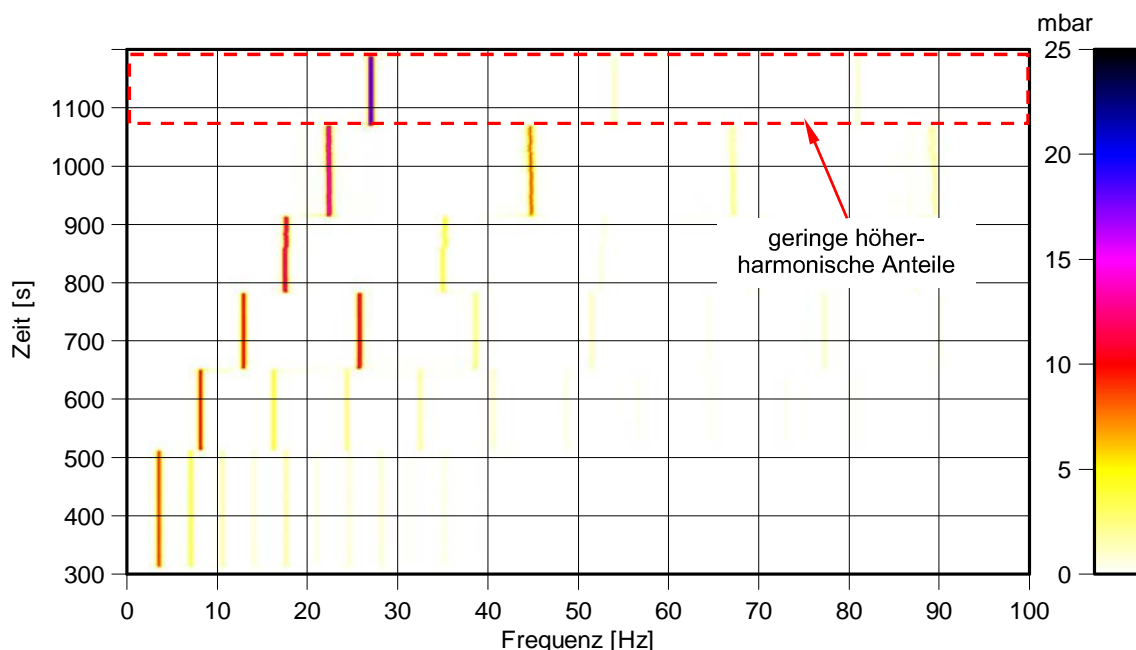


Abbildung 17: Amplitudenspektrum der Druckpulsationen an der Plus-Druckentnahme vor der Blende während der instationären Messungen

Die Amplitudenspektren zeigen, dass die Druckschwankungen der Grundfrequenz von 27 Hz nur geringfügige höherharmonische Anteile besitzt und für einen Vergleich mit den harmonischen Simulationen somit am ehesten geeignet ist.

Da die detaillierte Erfassung von Strömungsprofilen während der Messungen nicht möglich war, soll der exemplarische Vergleich anhand der qualitativen Betrachtung der Drucksignale an den beiden Druckentnahmepositionen erfolgen, Abbildung 18.

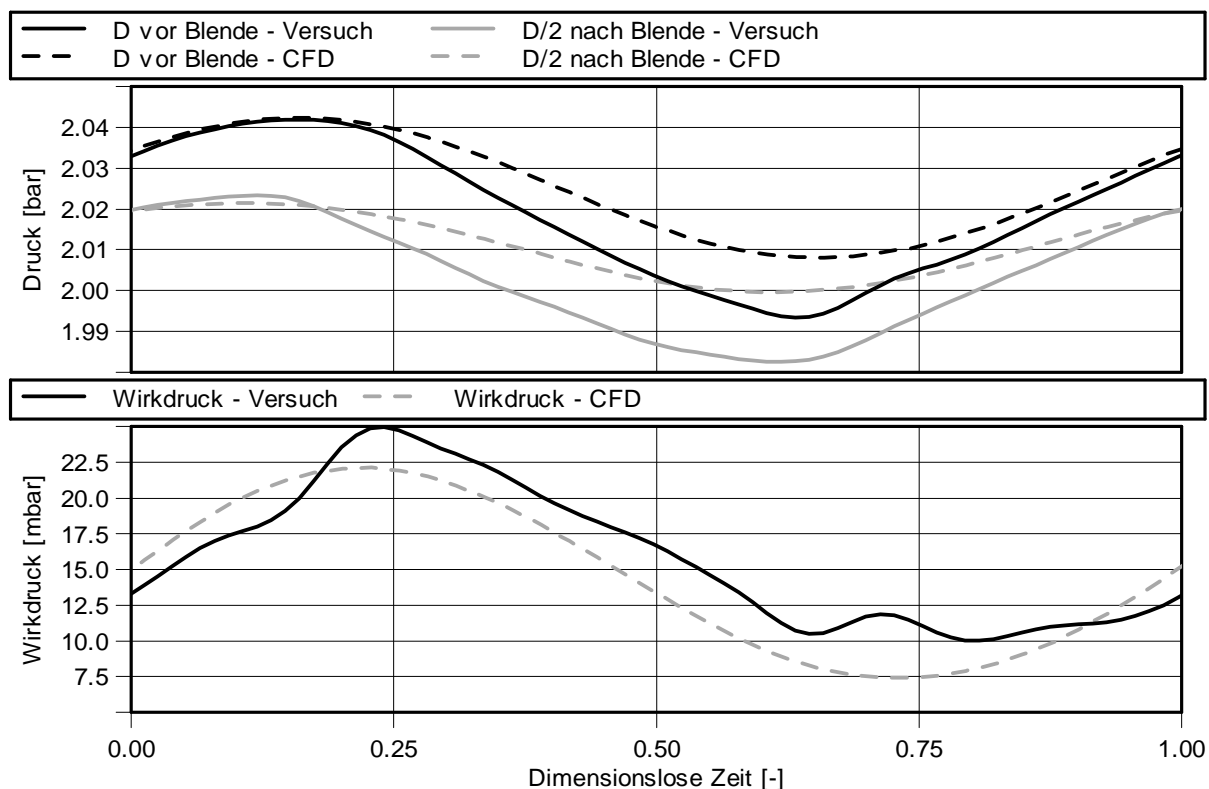


Abbildung 18: Vergleich der simulierten und experimentellen Druckverläufe an den Druckentnahmestellen sowie des Wirkdruckes über der dimensionslosen Zeit ($f = 27 \text{ Hz}$)

Anhand des Vergleichs wird ersichtlich, dass sich qualitativ ähnliche Verläufe einstellen. Allerdings zeigt sich beim Versuch trotz der relativ harmonischen Druckverläufe eine deutliche Ausprägung höherharmonischer Anteile im Wirkdruck. Eine eindeutige Ursache für die fehlerhafte Mengenummessung bei den durchgeführten Versuchen lässt sich jedoch nicht ausmachen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde das instationäre Verhalten einer Blendenströmung sowohl messtechnisch als auch in Form einer numerischen CFD-Simulation untersucht. Das bei der CFD-Simulation verwendete Kreissegmentmodell liefert generell gute Übereinstimmungen mit dem aus der Theorie [1], [2] bekannten Betriebsverhalten. Hierbei zeigt sich insbesondere für die instationären Untersuchungen eine zufriedenstellende Genauigkeit mit maximalen Fehlern von $E_{\text{CFD}} = 0,4\%$ nach instationärer Durchsatzkorrektur. Die experimentellen Untersuchungen der Blendenströmung haben gezeigt, dass der Gasmengenversuchsstand des FG Fluidtechnik der TU Dortmund eine gute Versuchsbasis zur Erforschung unterschiedlicher stationärer und instationärer strömungsmechanischer Effekte darstellt. Die Messgenauigkeit bei der stationären Blendenströmung lag mit maximalen Fehler von $E_{\text{Versuch}} = 1\%$ in einem akzeptablen Bereich. Lediglich bei den

instationären Untersuchungen war eine akzeptable Fehlerkorrektur anhand der instationären Durchflussgleichung nicht möglich.

Nach momentanem Stand scheint der Pulsationsgenerator und das von ihm ausgehende Strömungsprofil für die Abweichungen verantwortlich zu sein. Um diesbezüglich nähere Erkenntnisse zu erzielen, sind zeitnah numerische und ggf. experimentelle Untersuchungen des detaillierten Betriebsverhaltens geplant. Sollte der Pulsationsgenerator tatsächlich die Ursache für die beobachteten Mengemessfehler darstellen, so gilt es, diesen Sachverhalt bei den Anforderungen nach DIN 5167 ggf. zu berücksichtigen.

Generell bleibt festzuhalten, dass die Simulation instationärer Strömungsvorgänge in Verbindung mit gezielten Experimenten zu einem tiefgehenden Verständnis der Wirkmechanismen beitragen kann. Im Rahmen laufender Forschungsarbeiten soll daher die Kombination aus Simulation und Experiment bei der Entwicklung – z. B. innovativer passiver, adaptiver Pulsationsdämpfer – eingesetzt werden.

Danksagung

Wir danken der Firma KÖTTER Consulting Engineers für die freundliche finanzielle Unterstützung zur Durchführung der vorgestellten Forschungsarbeit.

9. Literatur

- [1] N.N.: Durchflußmessung von Fluiden mit Drosselgeräten. Teil 1: Blenden, Düsen und Venturirohre in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt. DIN EN ISO 5167-1.
- [2] N.N.: Measurement of pulsating fluid flow in a pipe by means of orifice plates, nozzles or Venturi tubes. Technical Report ISO/TR 3313.
- [3] Doblhoff-Dier, K. et al.: Time resolved measurement of pulsating flow using orifices. Flow Measurement and Instrumentation, 2011.
- [4] Gajan, P., Mottram, R.C., Herbrard, P., Handriamihafi, H., Platet, B.: The influence of pulsating flows on orifice plate flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 3(3):118-29. 1992.
- [5] Keyser, D.R., Unsteady orifice flow measurement, its theory and observation. Flow – Measurement and Control in Science and Industry, 1981.
- [6] Brümmer, A.: Gasmengenmeßfehler und deren Ursachen am Beispiel der Wirkdruckverfahren. Erdöl, Erdgas, Kohle, 114. Jahrgang, Heft 11, November 1998.
- [7] Hebrard, P. et al.: An investigation of behavior of orifice meter in pulsation flow conditions. International conference on flow measurement in Melbourne, Australia, S. 223 – 230. 1985.

- [8] Laurien, E. et. al.: Numerische Strömungsmechanik. Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit. 5. Auflage. Springer Verlag. 2013.
- [9] Nikuradse, J.: VDI Forschungsheft 356 – Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Rohrströmung in glatten Rohren. VDI-Verlag GmbH, Berlin. 1932.