

---

## IGF-Vorhaben Nr. 17261 N/1

### **Numerische Berechnung des durch Turbulenz erzeugten Innenschalldruckpegels von Industriearmaturen auf der Basis von stationären Strömungsberechnungen (CFD)**

Die Vorhersage der Schallentwicklung von Industriearmaturen ist Schwerpunkt des von der AiF geförderten Projektes. Dabei sollen zum einen experimentelle Daten in ausreichender Qualität gewonnen werden, zum anderen auch vergleichende numerische Simulationen durchgeführt werden. Ziel des Projektes ist eine Beurteilung, in wie weit im industriellen Einsatz bei der CFD-basierten Schallvorhersage auf stationäre, in der Rechenzeit weniger kritische Verfahren gesetzt werden kann.

Für die numerische Simulation wird ein hybrider Simulationsansatz verwendet, der auf einer Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Simulation basiert. Eine RANS-Simulation ist dadurch charakterisiert, dass die Strömung zeitlich gemittelt simuliert wird und bei der Modellierung der turbulenten Skalen stark vereinfachende Annahmen getroffen werden. Basierend auf einer solchen RANS-Simulation werden in einem zweiten Schritt künstliche instationäre Quellterme berechnet, die in einem dritten Schritt in eine Berechnung der eigentlichen Schallausbreitung eingebunden werden.

Das Institut für Fluidsystemtechnik verfügt über einen nach dem sog. Kanalverfahren spezialisierten Aeorakustikkanal, an welchem zunächst drei Normlochblenden sowie eine Mehrlochblende aerodynamisch und akustisch vermessen wurden. Hierbei wurde das Medium Luft verwendet. An dem ebenfalls am Institut für Fluidsystemtechnik befindlichen Armaturenprüfstand mit dem Medium Wasser wurden weiterhin Versuche mit mehreren Normblenden durchgeführt. Ziel war, sowohl verschiedene Fluide (Wasser und Luft), als auch verschiedene Strömungsregime untersuchen zu können.

Beim aerodynamischen Vergleich am Akustikprüfstand werden für die Einlochblenden jeweils die gemessenen, durch CFX-Simulationen berechneten und die zu erwartenden Wirkdruckdifferenzen zur Berechnung der Druckverlustbeiwerte herangezogen. Für beide Blenden ist erkennbar, dass alle Druckverlustbeiwerte sehr nahe beieinander liegen, Messung, Simulation und Normberechnung stimmen überein. Bei Betrachtung der Messwerte für die Mehrlochblende ist zu erkennen, dass die Druckverluste durch die CFD-Simulation unterschätzt werden. Dies äußert sich in größeren Abweichungen der Druckverlustbeiwerte zwischen Experiment und Simulation. Eine erhebliche Erhöhung der Zellanzahl des Simulationsmodells, als auch eine Variation verschiedener Simulationsparameter wie des Turbulenzmodells für nicht zu einer Reduktion der Abweichung.

Gefördert durch:

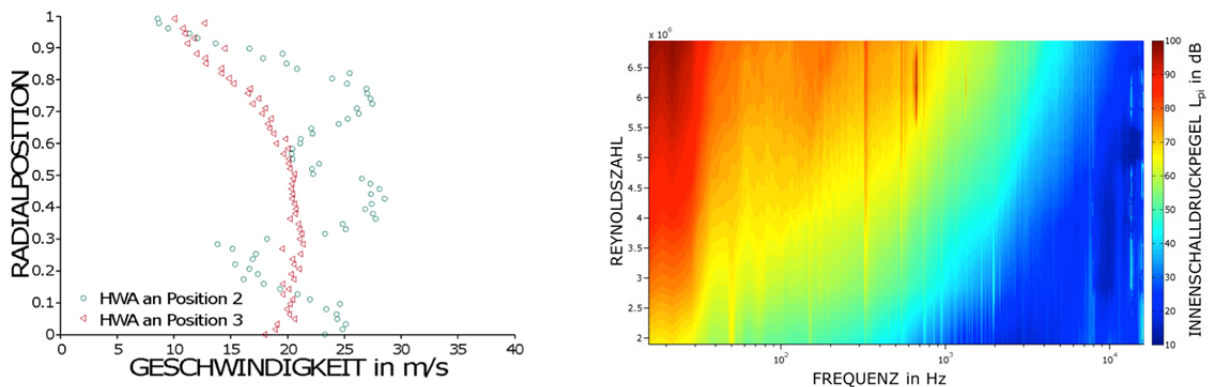


Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das akustische Profil des Innenschalldruckpegels ist in allen aufgezeichneten Betriebspunkten durch ein gleichförmiges Rauschen dominiert. Die höchsten Pegel wurden bei geringen Frequenzen um 20Hz gemessen, im hochfrequenten Bereich fällt der gemessene Pegel stark ab. Frequenzen unterhalb von 100Hz werden allerdings häufig als Schwingungen wahrgenommen werden und sind nicht zwingend akustischen Ursprungs. Weiter sind drei von der Reynoldszahl (also dem Durchfluss durch die Blende) unabhängige Peaks im akustischen Profil erkennbar. Diese Frequenzen stellen charakteristische Frequenzen des Prüfstands dar und liegen in der Geometrie des Prüfstands begründet, sie sind unabhängig von der Reynoldszahl und damit vom Betriebspunkt des Hilfsventilators.

Das grundlegende Profil, d.h. ansteigende Werte des gemessenen Innenschalldruckpegels hin zu niedrigeren Frequenzen und höheren Reynoldszahlen, findet sich auch bei der Mehrlochblende wieder. Jedoch sind bei dieser Messung zusätzliche durchflussunabhängige Frequenzpeaks erkennbar. Diese Frequenzen entsprechen bei Umgebungsbedingungen charakteristischen Wellenlängen, welche sich auch bei der Geometrie des Prüfstandes wiederfinden lassen.



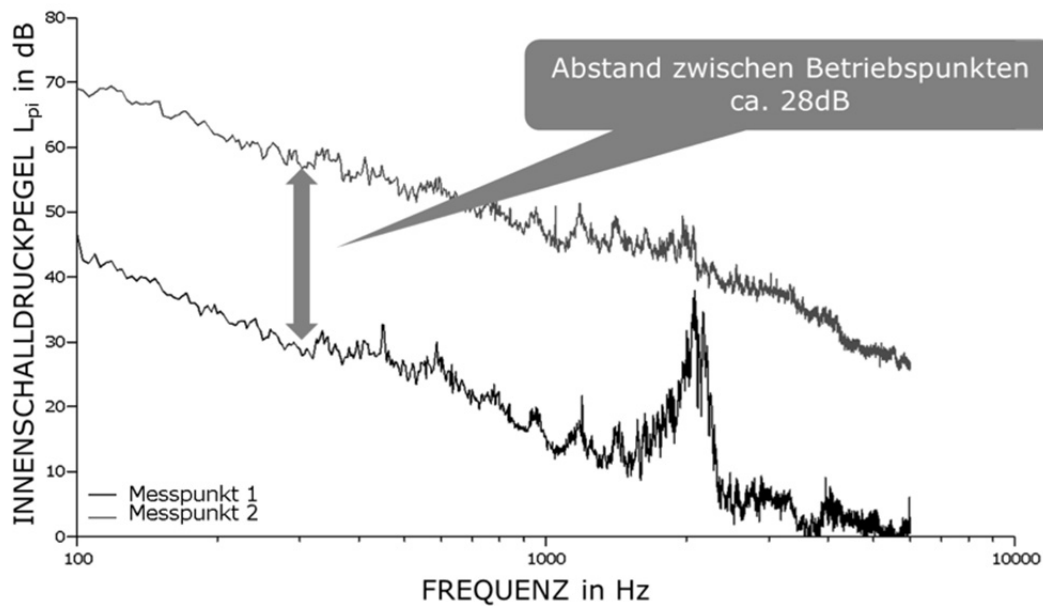
**Abb. 1** Akustikprüfstand, gemessene Geschwindigkeitsprofile hinter der Mehrlochblende (links); Spektrogramm der Mehrlochblende (rechts)

Aufgrund des hohen Aufwands zur Simulation eines einzelnen Betriebspunkt, musste sich bei der numerischen Berechnung des Innenschalldruckpegels auf eine exemplarische Simulation ausgewählter Betriebspunkte beschränkt werden. Es ist erkennbar, dass der gemessene Innenschalldruckpegel auf unterschiedlichen Niveaus zu tiefen Frequenzen hin ansteigt. Charakteristisch ist der Peak im Frequenzband, der auch bei der Normblende im Bereich niedriger Reynoldszahlen erkennbar ist. Dieser wird bei Messpunkt 2 von dem höheren Rauschpegel der Blendenströmung überlagert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Abb. 2** Messung am Akustikprüfstand mit Normblende, Referenzmesspunkte für Simulation

Im Bereich höherer Frequenzen werden die Frequenzbänder signifikant von der künstlichen Periodizität durch das zyklische Einlesen der zuvor berechneten Quellterme überlagert. Diese Quellen- sowie deren Vielfache (sog. Harmonische) sind in den simulierten Frequenzbändern deutlich erkennbar und sind durch den Aufbau der Simulationskette und nicht physikalisch begründet.

Im Rahmen der Messungen auf der Armaturen-Wasserstrecke wird der durch die Drosselung verursachte Druckverlustbeiwert  $\zeta$  zum Vergleich mit den zugehörigen CFD-Simulationen herangezogen. Hierbei zeigt sich, dass im betrachteten Strömungsbereich weder bei den Messungen, noch bei den Simulationen (es wurde kein Kavitationsmodell verwendet) eine erkennbare Abhängigkeit des Druckverlustbeiwerts von der Reynoldszahl auftritt. Ebenfalls ist erkennbar, dass die auf Basis der CFX-Simulationen berechneten Druckverlustbeiwerte die auf Basis der Messdaten berechneten Werte sehr gut treffen.

Der Innenschalldruckpegel wurde über den Frequenzbereich von 40-20.000Hz aufgezeichnet, durch eine Variation des Anlagendrucks kann das Differenzdruckverhältnis  $\alpha_F$  für diese Kombination aus Blende und Reynoldszahl variiert werden. Das gemessene Frequenzprofil verändert sich für einen breiten Anfangsbereich kaum. Im niederfrequenten Bereich sind Peaks im Frequenzband erkennbar, welche unabhängig vom eingestellten Betriebspunkt konstant sind.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

Diese Schwingungen sind sowohl von der Reynoldszahl, als auch vom Differenzdruckverhältnis unabhängig und lassen auf Strukturschwingungen schließen, welche von dem Schallsensor aufgezeichnet worden sind. Vergleichbare Peaks sind bei allen vermessenen Blenden erkennbar, ihre konkrete Ausprägung variiert jedoch zwischen den Blenden.

Über das gesamte Frequenzband werden vergleichsweise hohe Schalldruckpegel aufgezeichnet. Die höchsten Pegel werden im analogen Bereich zum nicht-kavitierenden Betriebsbereich verzeichnet, weshalb hier Eigenfrequenzen des Systems vermutet werden. Diese werden durch die einsetzende Kavitation verstärkt angeregt.

Durch höhere Reynoldszahlen kann bei den Messungen auch eine größere Variation des Differenzdruckverhältnisses erreicht werden. Analog zu den vorherigen Ergebnissen ist erkennbar, dass im nicht-kavitierenden Strömungsbereich nur eine Überlagerung des Innenschalldruckpegels durch niederfrequente Schwingungen zu erkennen ist. Für beide Reynoldszahlen zeigt sich, dass die jeweils höchsten gemessenen Pegel in einem Bereich von  $0.5 \leq x_F \leq 0.6$  erreicht werden und die Pegel oberhalb davon wieder abfallen. Dies ist durch die vollständig ausgebildete Kavitation begründet und ist typisch für eine derartige Strömungskonfiguration. Daraus ergibt sich eine Unabhängigkeit des Kavitationsbeginns an den verwendeten Prüfständen des Instituts von der Reynoldszahl  $Re$ , der maximal erreichte Schallpegel hängt jedoch wesentlich von  $Re$  ab.

Beim Vergleich der Gesamtschalldruckpegel der Blenden untereinander zeigt sich, dass sich für beide Blenden ein vergleichsweise leises Plateau im nicht-kavitierenden Bereich ausbildet, bis für beide Blenden die Kavitation einsetzt. Die erreichten Maximalpegel für gleiche Reynoldszahlen liegen bei der Mehrlochblende höher als bei der identischen Strömungskonfiguration bei der Normblende. Dies kann dadurch begründet werden, dass bei der Mehrlochblende aufgrund eines instabileren Strömungszustandes erhebliche Fluktuationen in der Wirkdruckdifferenz auftreten. Derartige Druckspitzen führen zu einer stärkeren Kavitation und nachfolgend zu höheren Summenpegeln.

Diese Deutung wird Messungen der Gesamttinnenschalldruckpegel von zwei Mehrlochblenden mit identischem Öffnungsverhältnis  $\beta$  gestützt, wobei eine scharfkantig ausgeführt ist. Hier ist erkennbar, dass die erreichten Maximalpegel bei der Mehrlochblende in scharfkantiger Ausführung höher liegen als bei der gefasteten Ausführung. Dies lässt sich ebenfalls mit der stabilen Ausbildung der Strömung bei der Blende in gefaster Ausführung im Vergleich zur ungefasteten Ausführung erklären. Eine zusätzliche Fase auf der Abströmseite einer Mehrlochblende reduziert den maximalen Schallpegel also signifikant.

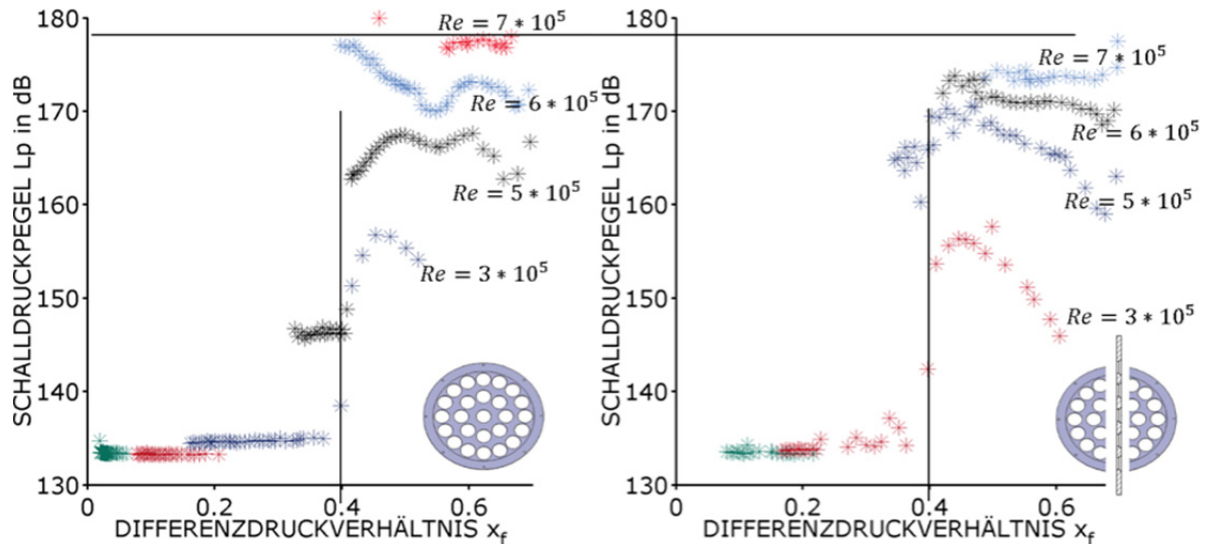
Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die durchgeführten Messungen der Normblenden wurden auch verwendet, um einen Zusammenhang zwischen dem Öffnungsverhältnis der Blende und dem daraus resultierenden kritischen Druckverhältnis bei Kavitationsbeginn zu ermitteln. Werden die Größen übereinander aufgetragen ergibt sich ein linearer Zusammenhang.



**Abb. 3** Wasserstrecke, Gesamtinnenschalldruckpegel bei  $\beta = 0.509$ , Mehrlochblende scharfkantig (links) und gefast (rechts)

Die für diesen Prüfstand exemplarisch berechneten Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Trendvorhersage mit der gewählten Methode prinzipiell möglich ist. Eine universelle und zuverlässige Methode zur numerischen Vorhersage des Innenschalldruckpegels schon im Designprozess ist jedoch zum Zeitpunkt des Abschlusses des hier dargestellten Forschungsprojekts nicht absehbar.

*Das IGF-Vorhaben Nr. 17261 N/1 des Forschungskuratoriums Maschinenbau e.V. (FKM) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages