

## Untersuchungen zur Vorhersage der Wirksamkeit von Wirbelgeneratoren zur Unterdrückung von Druckschwankungen in offenen Windkanalmeßstrecken

### Investigations on the prediction of the effectiveness of vortex generators for the suppression of pressure fluctuations in open wind tunnel measuring sections

**Florian Kopatz, Oliver Meyer**

Institut für Aerodynamik und Flugsimulation, Universität der Bundeswehr München,  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Windkanal, Schwingung, Pulsation, Resonanz, Experiment

Wind tunnel, Oscillation, Pulsation, Resonance, Experiment

#### Zusammenfassung

Windkanäle (WK) mit geschlossener Strömungsrückführung und 3/4- bzw. 4/4-geöffneter Meßstrecke neigen zur Ausbildung von niederfrequenten Druckschwankungen (Low Frequency Fluctuations, LFF). Eine Vielzahl an Untersuchungen in unterschiedlichen WK stützen die These, dass durch eine natürliche Wirbelablösung an der WK-Düsenkante andere LFF-Mechanismen angeregt werden. Es wird vermutet, dass die natürliche Wirbelablösefrequenz die sogenannte "Edgetone"-Eigenfrequenz, die Rohr-Eigenfrequenzen, die Raum-Eigenfrequenzen und die Plenum-Helmholtz-Eigenfrequenzen anregt. Wenn die Frequenz der natürlichen Wirbelablösung mit einer der Eigenfrequenzen zusammentreffen, kann es mitunter zur Resonanz kommen. Die LFF können dadurch verstärkt werden und mindern somit die Messqualität in der Meßstrecke des WK und können im schlimmsten Fall sogar die WK-Gebäudestruktur gefährden. Dieser Beitrag umfasst experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Wirbelgeneratoren in der WK-Düse auf das Auftreten von LFF.

#### Abstract

Wind tunnels (WT) with closed flow recirculation and 3/4- or 4/4-open test sections tend to develop low frequency fluctuations (LFF). A large number of investigations in different WT with open test section support the theory that other LFF mechanisms are excited by the natural vortex shedding at the WK nozzle edge. It is assumed that the natural vortex shedding frequency excites the so-called "edgetone" eigenfrequency, the tube eigenfrequencies, the room eigenfrequencies, and the plenum Helmholtz eigenfrequencies. When the natural vortex shedding frequency coincides with one of these eigenfrequencies, resonance can occur. The LFF can thus be amplified and reduce the measurement quality in the measurement section of the WT and, in the worst case, can even endanger the WT building structure. This paper covers experimental studies on the influence of vortex generators in the WK nozzle on the occurrence of LFF.

## Einleitung

In WK mit offener Messstrecke bildet sich aufgrund des offenen Kernstrahls eine Scherschicht zwischen Kernstrahl und Umgebung von Düse bis Kollektor aus. Innerhalb dieser Scherschicht entstehen Wirbelstrukturen, die sich von der WK-Düsenkante ablösen, sich stromabwärts ausbreiten und schließlich mit dem Kollektor und dem WK-Diffusor interagieren. Die dominante Frequenz der natürlichen Wirbelablösung ist von der Strahlgeschwindigkeit direkt und vom hydraulischen Durchmesser der WK-Düse indirekt proportional abhängig. Die Proportionalitätskonstante wird als Strouhal-Zahl bezeichnet [Wickern et al. 2000].

$$St = \frac{f \cdot d_h}{u} \quad (1)$$

Dabei steht  $f$  für die natürliche Wirbelablösefrequenz,  $d_h$  für den hydraulischen Durchmesser der Windkanaldüse und  $u$  für die Strahlgeschwindigkeit. Für eine 3/4 geöffnete Messstrecke mit rechteckigem Düsenquerschnitt kann eine Strouhal-Zahl von  $St \approx 0,34$  und für eine 4/4 geöffnete Messstrecke mit rechteckigem Düsenquerschnitt eine Strouhal-Zahl von  $St \approx 0,48$  angenommen werden [Rennie 2000].

Niederfrequente Druckschwankungen treten vermehrt in der Nähe der natürlichen Wirbelablösefrequenz auf und der Frequenzbereich mit besonderem Augenmerk liegt zwischen 0 und 20 Hz.

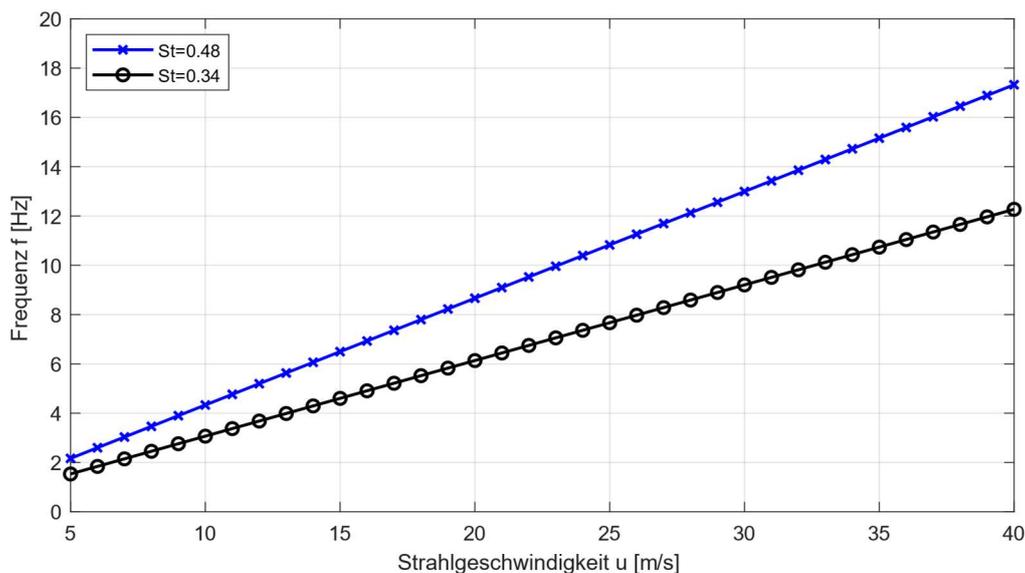


Abb. 1: Natürliche Wirbelablösefrequenz für 3/4- und 4/4-geöffnete Windkanalmessstrecken

Abbildung 1 zeigt den grafischen Zusammenhang der analytischen Auswertung der natürlichen Wirbelablösefrequenz, Gleichung (1), und der Strahlgeschwindigkeit für den untersuchten Windkanal mit 3/4- und 4/4-geöffneter Windkanalmessstrecke auf.

Neben der natürlichen Wirbelablösefrequenz können noch weitere Druckschwankungsphänomene in WK auftreten. Insgesamt sind vier Arten von Resonanz möglich, welche durch vereinfachte Ansätze beschrieben werden können. In der Literatur werden Rohrresonanzen im WK, Hohlraumresonanzen im Plenum, Helmholtz-Resonanzen, bei welchem Kollektor oder Düse als Resonatorhals agieren, und Edgetone-Resonanzen, welche eine Rückkopplungsschleife der Wechselwirkung zwischen Wirbeln und Kollektor beschreibt, genannt [Blumrich et al. 2015, Rennie 2000, Rennie 2004].

## Anregungsmechanismen

Die bereits im vorherigen Abschnitt angesprochenen Anregungsmechanismen lassen sich gemäß der folgenden Formeln analytisch abschätzen:

$$f_{\text{Edgetone}} = \frac{1}{\frac{1}{m} \cdot \frac{L_{TS} + \Delta l}{0.65 \cdot u} + \frac{L_{TS} + \Delta l}{c - u}} \quad (2)$$

$$f_{\text{Rohr}} = \frac{n \cdot (c \pm u)}{2 \cdot L} \quad (3)$$

$$f_{\text{Plenum}} = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{l_x}{n_x}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{n_y}\right)^2 + \left(\frac{l_z}{n_z}\right)^2}} \quad (4)$$

$$f_{\text{Plenum-Helmholtz}} = \frac{c \cdot d_h}{4 \pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{V \cdot \left(L_{\text{Düse}} + \pi \cdot \frac{d_h}{4}\right)}} \quad (5)$$

mit Schallgeschwindigkeit  $c$ , Modennummer  $m, n, n_{xyz}$ , Länge der Messstrecke  $L_{TS}$ , Der Strahlgeschwindigkeit  $u$ , der Kanallänge  $L$ , den räumlichen Abmessungen  $l_x, l_y, l_z$ , dem hydraulischen Düsendurchmesser  $d_h$ , dem Plenumsvolumen  $V$  und der Düsenhalslänge  $L_{Düse}$ . Abbildung 2 stellt die Abhängigkeit der Frequenz der niederfrequenten Druckschwankungen von der Strahlgeschwindigkeit, gem. der Gleichung (2)-(4), für den untersuchten WK dar. Eine analytische Abschätzung der Plenum-Helmholtz-Resonanz, Gleichung (5), weist in dem untersuchten WK auf eine Frequenz von ca. 2,25 Hz hin, welche in den erfolgten Untersuchungen nicht beobachtet wurde. Daher wird dieser Mechanismus in Abbildung 2 nicht dargestellt und in dieser Arbeit lediglich vollständigheitshalber aufgeführt. Des Weiteren wurden die zugehörigen Graphen der Strouhal-Abhängigkeit, gem. Gleichung (1), aufgenommen.

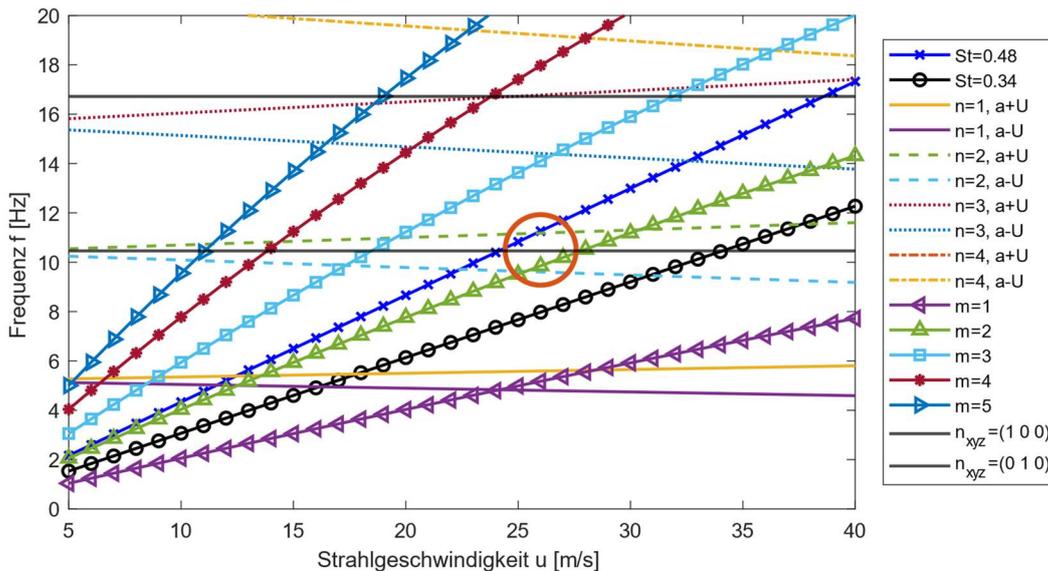


Abb. 2: Frequenz-Strahlgeschwindigkeits-Abhängigkeit der niederfrequenten Druckschwankungen

Es ist in Abbildung 2 erkennbar, dass die erste Raum-Eigenfrequenz ( $n_{xyz} = (1\ 0\ 0)$ ) mit der zweiten Rohr-Eigenfrequenz ( $n=2$ ), bei ruhendem Fluid, im Bereich 10,5 Hz zusammenfällt.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die natürliche Wirbelablösefrequenz ( $St=0,48$ ) und die zweite Edgetone-Eigenfrequenz ( $m=2$ ) zunächst zusammenliegen und mit steigender Strahlgeschwindigkeit auseinanderdriften.

## Experimenteller Aufbau

Zentraler Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist der subsonische Windkanal an der Fakultät für Maschinenbau der Universität der Bundeswehr München. Die Experimente umfassen Druckmessungen mittels Prandtl-Sonden zur Bestimmung des Pulsationskoeffizienten und akustische Messungen zur Bestimmung des auftretenden Frequenzspektrums.

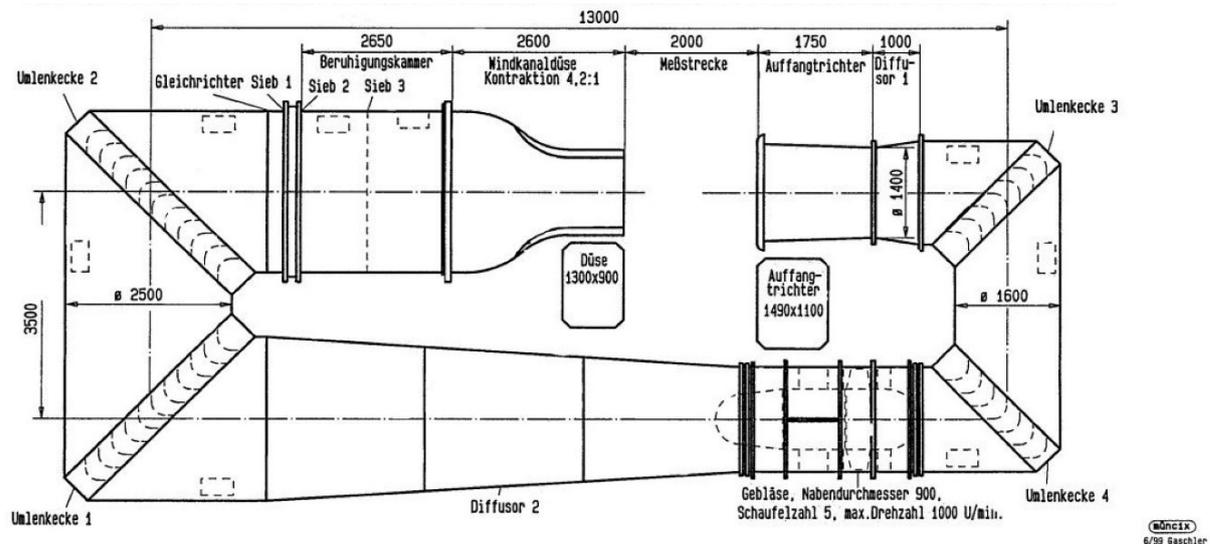


Abb. 3: grafische Darstellung des WK der UniBwM WE4.2, Dimensionen in mm

In Abbildung 3 ist der untersuchte WK dargestellt. Bei dem untersuchten WK handelt es sich um einen Umlaufwindkanal mit einer Messstrecke in den Abmessungen  $2000 \times 1300 \times 900$  mm<sup>3</sup> (Länge x Breite x Höhe). Die Messstrecke kann für Forschungs- und Lehrmöglichkeiten als 3/4- und als 4/4-offene Variante genutzt werden. In der 3/4-geöffneten Variante wird ein Laufband eingebracht, um bei Untersuchungen an Kfz-Modellen die Fahrbahn zu simulieren. Alle Untersuchungen zum Resonanzverhalten des WK wurden im Strahlgeschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 m/s ( $Ma = 0 - 0,117$ ) durchgeführt. Die auf den hydraulischen Durchmesser der Düse bezogene maximale Reynoldszahl liegt bei  $Re_D = 2,63 \cdot 10^5$ .

Frühe Arten von Wirbelgeneratoren (WG) zur Unterdrückung von niederfrequenten Druckschwankungen basierten hauptsächlich auf angestellten Flügeln, Lamellen oder Zähnen. Seiferth-Flügel (SF) [Seiferth 1947] sind beispielsweise eine an der Düsenaustrittskante installierte Flügelvorrichtung, siehe Abbildung 4. Diese bilden Längswirbel aus und vermischen somit die Scherschicht intensiv, sodass diese die natürlichen Wirbelringe abschwächen und somit nicht mehr mit dem Kollektor interagieren können. Schlussendlich wird dadurch die kritische Phase der Resonanzentwicklung gestört. Jedoch haben WG einige Nachteile, denn diese verringern die Effizienz des WK, stören die Geschwindigkeitsverteilung des Kernstrahls und die statische Längsdruckverteilung in der Messstrecke. Zusätzlich steigert die erhöhte Durchmischung die Scherschichtdicke und beeinträchtigt akustische Messungen. SF sind durchaus gut geeignet LFF zu unterdrücken, neigen jedoch dazu breitbandige Strömungsgeräusche zu erzeugen.

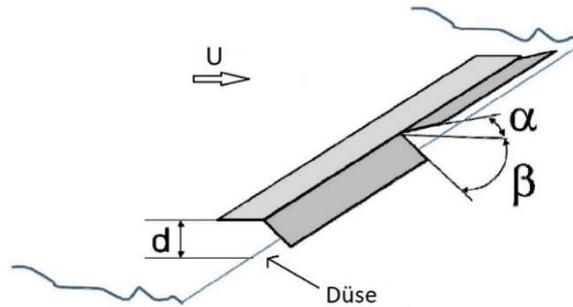


Abb. 4: schematische Darstellung Seiferth-Flügel

In Abbildung 5 sind die Grundform und die geometrischen Parameter der untersuchten WG dargestellt, welche vom hydraulischen Durchmesser ( $d_h$ ) der WK-Düse abhängig sind [Blumrich et al. 2015, Jin et al. 2021].

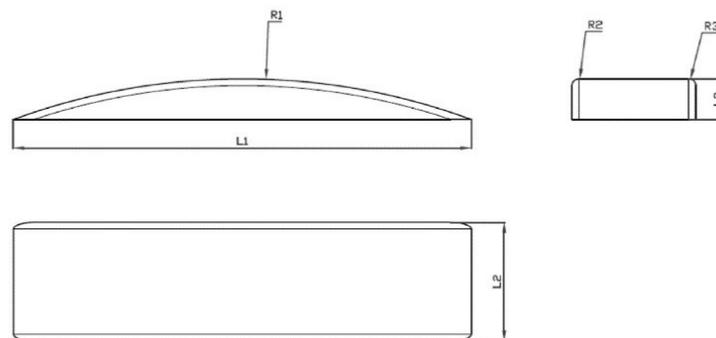


Abb. 5: schematische Darstellung verwendeter Wirbelgeneratoren

In Untersuchungen dieses WG-Typs wurde festgestellt, dass diese dazu geeignet sind, die Edgetone-Resonanz zu unterdrücken und gleichzeitig einen geringeren negativen Einfluss auf breitbandige Strömungsgeräusche haben. Der untersuchte WK wird in beiden Messstreckenvarianten (3/4- und 4/4-geöffnet) mit SF betrieben. Es wurde eine akustische Verbesserung des WK in beiden Messstreckenvarianten mit dem Ziel angestrebt, die durch SF erreichte Unterdrückung der LFF mindestens beizubehalten und die breitbandigen Strömungsgeräusche zu minimieren.

## Ergebnisse und Diskussion

Das WG grundsätzlich dazu geeignet sind Edgetone-Eigenfrequenzen positiv zu beeinflussen wurden in einer Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen [Seiferth 1947, Jin et al. 2021]. Jedoch kann bisher keine allgemeingültige Aussage zur Anzahl, Ausrichtung und Anordnung gemacht werden. Die Untersuchungen von Jin et al. 2021 wurden bspw. an einer rechteckigen Düsenaustrittsfläche durchgeführt, der untersuchte WK hat ebenso eine rechteckige Düsenaustrittsfläche jedoch mit Fasen, siehe Abbildung 3. In einer Variationsuntersuchung wurde schließlich eine optimale Anzahl und Anordnung gefunden, siehe Abbildung 6, zur Bewertung wurde der Pulsationskoeffizient, Gleichung (6), zugrunde gelegt.

In Abbildung 7 sind für beide Messstreckenvarianten die Pulsationskoeffizienten (Düse nackt (naked), mit Seiferth-Flügel (SF), mit Wirbelgenerator (WG)) in Abhängigkeit zur Strahlgeschwindigkeit dargestellt. Der Pulsationskoeffizient kann bei unbeeinflussten WK-Düsen dazu genutzt werden, die Strahlgeschwindigkeitsbereiche, welche hohe Pulsation aufweisen, ausfindig zu machen und dient als aerodynamisches Bewertungskriterium eines WK.

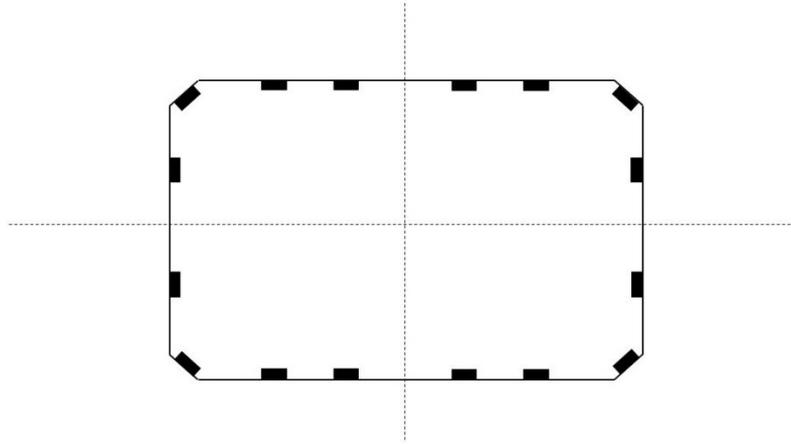


Abb. 6: optimale WG-Anordnung im untersuchten WK, schematisch

$$c_{p,RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_s(t) - \bar{p}_s)^2}}{\bar{q}} \quad (6)$$

In beiden Messstreckenkonfigurationen ist erkennbar, dass Pulsationen im Strahlgeschwindigkeitsbereich von circa 23 bis 30 m/s auftreten. Des Weiteren ist in Abbildung 7 erkennbar, dass die optimale WG-Anordnung in der 4/4-geöffneten Messstreckenvariante die Pulsationen etwas besser unterdrücken, als die SF. In der 3/4-geöffneten Variante unterdrücken die SF und die WG die Pulsationen gleich gut.

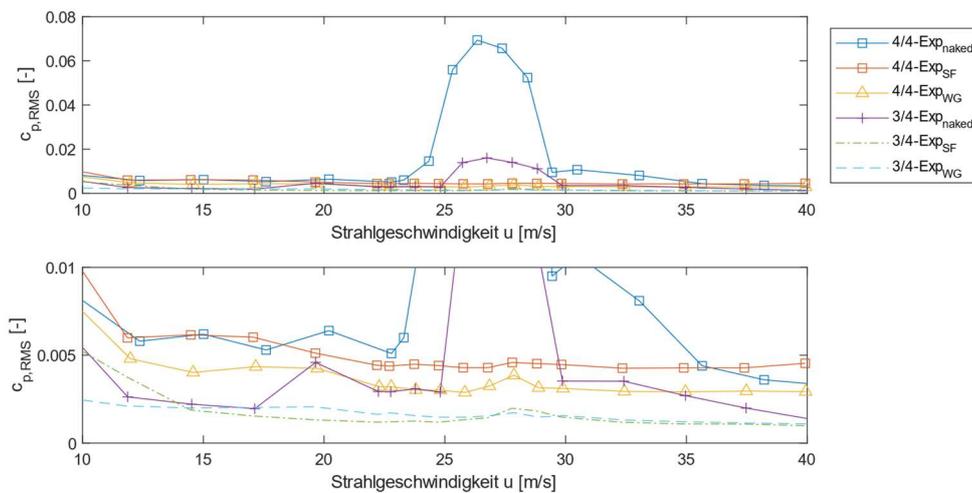


Abb. 7: Vergleich Pulsationskoeffizient-Strahlgeschwindigkeit

In Abbildung 8 und 9 sind die Campbell-Plots der WK-Düse ohne WG mit 3/4- und 4/4-geöffneter Messstrecke, der Graph zur Abhängigkeit der natürlichen Wirbelablösefrequenz ( $St=0,48$ ) und die Auswertungen der Gleichungen (2)-(4) in Abhängigkeit zur Strahlgeschwindigkeit dargestellt. In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass zwei lokale Frequenzpeaks auftreten. Der erste Peak befindet sich bei ca. 11 Hz (25 bis 28 m/s) und der zweite bei ca. 16 Hz (28 bis 34 m/s). Der 11 Hz-Peak ist in beiden Messstreckenvarianten am stärksten. Bei dem Vergleich beider Messstreckenvarianten fällt auf, dass sich die Frequenzpeaks im niederfrequenten Druckbereich nicht unterscheiden. Somit hat die quasi Schließung einer Düsenseite (Änderung von 4/4-geöffneter zu 3/4-geöffneter Messstrecke) keinen Einfluss auf das Resonanzverhalten des WK.

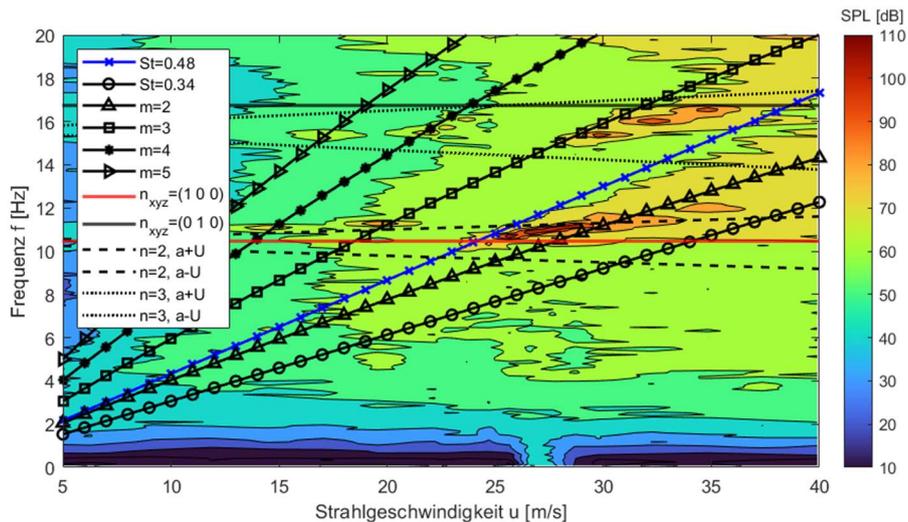


Abb. 8: Campbell-Plot mit 3/4-geöffneter Messstrecke (ohne WG), Abgleich mit Gleichung (1)-(4)

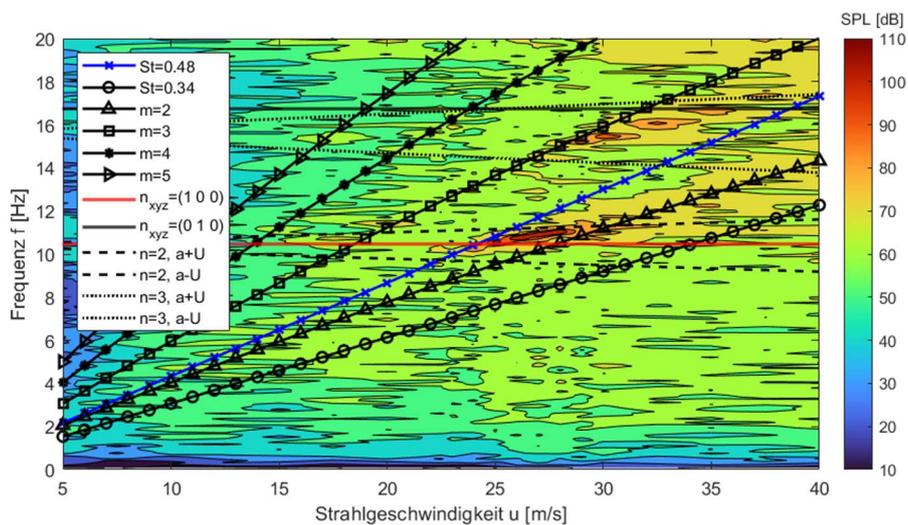


Abb. 9: Campbell-Plot mit 4/4-geöffneter Messstrecke (ohne WG), Abgleich mit Gleichung (1)-(4)

Der Abgleich der analytischen Abschätzung der Anregungs-Eigenfrequenzen, gem. Gleichung (2)-(4), mit den gemessenen Frequenzspektren legt nahe, dass der Frequenzpeak bei 11 Hz eine gemischte Anregung erfährt, siehe Abbildung 8 und 9. Es wird deutlich, dass in der Nähe des 11 Hz-Peaks nicht nur der Funktionsgraph der natürlichen Wirbelablösung ( $St = 0,48$ ) verläuft, sondern ebenso auch die zweite Edgetone-Eigenfrequenz ( $m=2$ ), die erste Raum-Eigenfrequenz ( $n_{xyz} = (1\ 0\ 0)$ ) und auch die zweite Rohr-Eigenfrequenz ( $n=2, a+U$ ), welche die Schallausbreitung in Strömungsrichtung berücksichtigt. Dieses Gebiet hat somit eine Vielzahl an Überschneidungen von Anregungsmechanismen und kann somit zur Resonanz neigen. Des Weiteren ist erkennbar, dass ein weiterer Frequenzpeak bei ca. 15 Hz unterhalb des Graphen der dritten Edgetone-Eigenfrequenz ( $m=3$ ) und bei der dritten Rohr-Eigenfrequenz ( $n=3, a\pm U$ ) beginnt. Durch das Zusammenfallen der Anregungsmechanismen, kann es auch in diesem Gebiet zu Resonanz kommen.

In den Abbildungen 10 und 11 sind die Campbell-Plots beider Messstreckenvarianten mit der WG-Anordnung gem. Abbildung 6 dargestellt. Beim Vergleich der Abbildung 8 und 10, sowie 9 und 11 ist erkennbar, dass die Pegel beider Peaks reduziert sind. Der 11 Hz-Peak tritt noch auf, aber der 15 Hz-Peak ist in beiden Messstreckenvarianten vollständig unterdrückt.

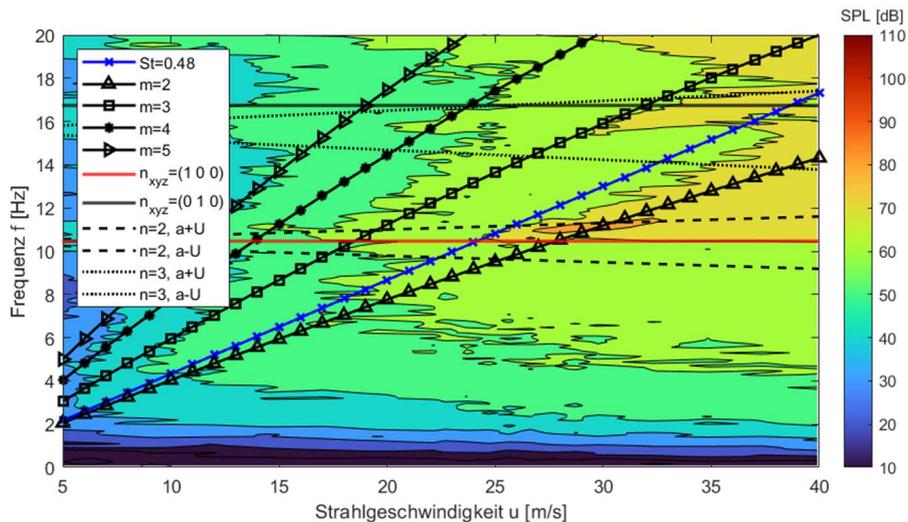


Abb. 10: 3/4-geöffnete Messstrecke (mit WG-Anordnung gem. Abbildung 6)

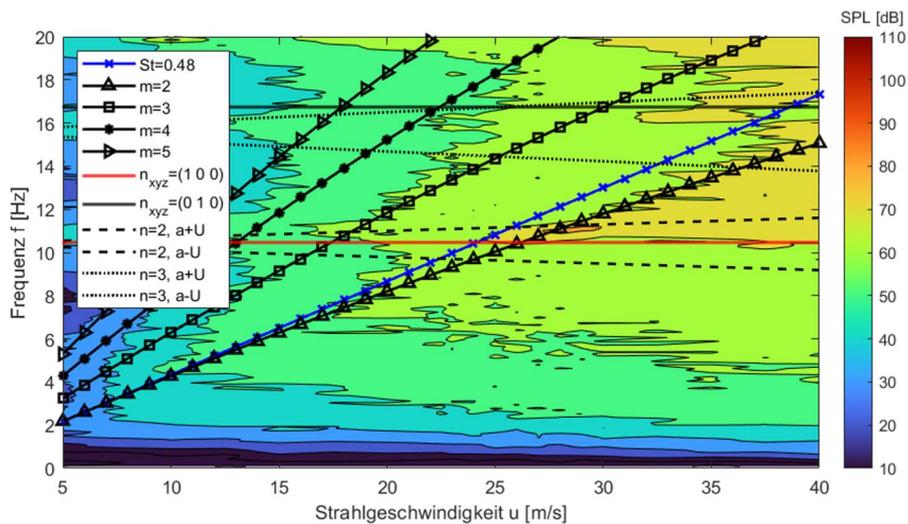


Abb. 11: 4/4-geöffnete Messstrecke (mit WG-Anordnung gem. Abbildung 6)

Dies stützt die These, dass der 15 Hz-Peak durch die dritte Edgetone-Eigenfrequenz ( $m=3$ ) angeregt wird und eine Verstärkung durch die dritte Rohr-Eigenfrequenz ( $n=3, \pm U$ ) erfährt. Durch die generelle Unterdrückung der Edgetone-Eigenfrequenzen, mittels WG, werden andere Anregungsmechanismen weniger stark bis gar nicht angeregt. In Abbildung 10 und 11 ist der 11 Hz-Peak jedoch noch deutlich erkennbar. In der Betrachtung der Abbildung 10 und 11 liegt die Annahme nahe, dass eine nicht vollständig unterdrückte natürliche Wirbelablösung durch Ihre Ablösefrequenz die zweite Rohr-Eigenfrequenz ( $n=2$ ) anregt und es somit zur verringerten Resonanz kommt. Um nachzuweisen, ob unter Einsatz der optimalen WG-Anordnung weiterhin die zweite Rohr-Eigenfrequenz ( $n=2$ ) auftritt, wurde die Schalldruckverteilung entlang der Windkanalröhre vermessen. Abbildung 12 zeigt die Schalldruckpegelverteilung entlang der WK-Achse für die Pulsationsfrequenzen 11 Hz und 15 Hz. Die Strahlgeschwindigkeit wurde für die maximale Pulsationsamplitude bei 11 Hz mit 28 m/s gewählt und mit dieser die Schalldruckpegelverteilung gemessen. Das Wellenmuster des 11 Hz-Verlaufs in Abbildung 12 zeigt die Charakteristik einer stehenden Welle entlang der Kanalachse, der Abstand aufeinander folgenden Minima entspricht der halben Wellenlänge. Für 11 Hz beträgt der Abstand zwischen den Minima 16,3 m. Unter Berücksichtigung einer mittleren Kanalströmungsgeschwindigkeit, welche bei einer Strahlgeschwindigkeit in der Messstrecke von 28 m/s ca. 11 m/s beträgt, ergibt sich eine Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 358,9 m/s. Die daraus resultierende halbe Wellenlänge beträgt 16,3 m.

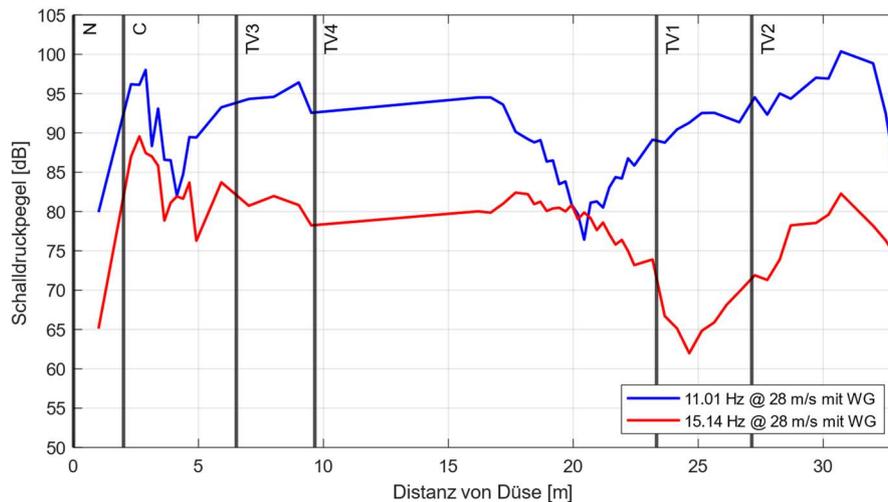


Abb. 12: gemessene Wellenform für Strahlgeschwindigkeit 28 m/s

Es lässt sich somit daraus schließen, dass neben der zweiten Edgetone-Eigenfrequenz ( $m=2$ ) auch die zweite Rohr-Eigenfrequenzen ( $n=2, a+U$ ) einen Anteil an der auftretenden Resonanz bei 11 Hz hat.

Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für die Entwicklung eines CFD-Ansatzes, mit welchem das niederfrequente Druckschwankungsverhalten des WK vorhergesagt und optimiert werden soll.

## Dankesworte

An dieser Stelle möchte ich Herrn TROIA Radunz für sein Engagement und die Übernahme der Datenerhebung danken, diese bildeten die Grundlage zur Entstehung dieses Beitrages.

## Literatur

**Wickern, G., von Heesen, W., and Wallmann, S., 2000:** „Wind Tunnel Pulsations and their Active Suppression“, SAE Technical Paper 2000-01-0869

**Rennie, M., 2000:** „Effect of Jet Length on Pressure Fluctuations in  $\frac{3}{4}$ -Open Jets“, Motor Industry Research Association Vehicle Aerodynamics 2000 Symposium

**Blumrich, R., Widdecke, N., Wiedemann, J., Michelbach, A., Wittmeier, F. and Beland, O., 2015:** „New FKFS Technology at the Full-Scale Aeroacoustic Wind Tunnel of University of Stuttgart“, SAE Technical Paper 2015-01-1557

**Rennie, M., 2004:** „Suppression of Open-Jet Pressure Fluctuations in the Hyundai Aeroacoustic Wind Tunnel“, SAE Technical Paper 2004-01-0803

**Seiferth, R., 1947:** „Pre-Calculation and Removal of Oscillations in Free-jet Wind Tunnels“, AVA Monographs on German Aeronautical Research carried out since 1939, Vol. D4.4

**Jin, L., Sun, H., Jiang, Y., Liang, Y., Zhang, J., 2021:** „Suppression of low-frequency pressure pulsations in an open jet wind tunnel by corner vortex generators“, AIP Advances 11, 065306