

# Interferenzeffekte für Türme von Windenergieanlagen in Gruppenanordnung beim Seetransport

Francesca Lupi<sup>2</sup>, Dimitrios Livanos<sup>3</sup>, Joris Daamen<sup>3</sup>, Marc Seidel<sup>3</sup>, Rüdiger Höffer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Windingenieurwesen und Strömungsmechanik, Bochum

<sup>2</sup> Niemann Ingenieure GbR, Bochum, Germany

<sup>3</sup> Siemens Gamesa Renewable Energy GmbH & Co. KG, Hamburg, Germany

**Zusammenfassung:** Die Türme von Offshore-Windenergieanlagen werden in Gruppen im Hafen zusammengebaut und dann in Gruppenkonfigurationen auf Installationsschiffen ins Meer transportiert. Während dieser Bauphasen muss das Risiko von Schwingungen aufgrund von Interferenzeffekten bewertet und minimiert werden. Abhängig vom Abstand der Türme und der Windrichtung kann die Strömung zwischen den Türmen große Querkräfte erzeugen. Diese können zu einer Fluid-Struktur-Wechselwirkung führen, die als Interferenzgalloping bezeichnet wird. Darüber hinaus bilden sich sowohl im Nachlauf der einzelnen Türme als auch im Nachlauf der gesamten Gruppe Wirbelstraßen aus, die wirbelinduzierte Schwingungen verursachen. Der Eurocode bietet die Möglichkeit, die Eintrittsgeschwindigkeit des Interferenzgalloping zu berechnen. Angesichts der typischerweise niedrigen Eigenfrequenz von Türmen und der hohen Windgeschwindigkeiten, die während der Bauphasen auftreten können, ist es jedoch sehr schwierig, das Eurocode-Kriterium für das Interferenzgalloping zu erfüllen. Es werden sehr hohe Dämpfungsgrade berechnet, um das Auftreten von Interferenzgalloping bei sehr hohen reduzierten Windgeschwindigkeiten zu vermeiden. Windkanalversuche sind notwendig, um die Möglichkeit einer Wechselwirkung zwischen den beiden Phänomenen, nämlich wirbelinduzierten Schwingungen und Interferenzgalloping, zu untersuchen. In der vorgestellten Studie wurden Windkanalversuche im Grenzschichtkanal an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Untersuchung wird ein auf dem Konzept der zulässigen Schwingungsamplituden basierendes Kriterium für den Entwurf von Windenergieanlagentürmen entwickelt, das zusätzlich zum Eurocode-Kriterium für die Eintrittsgeschwindigkeit des Interferenzgalloping angewendet werden kann. Dieses Kriterium ermöglicht eine realistischere Bewertung des erforderlichen Dämpfungsgrads während der Bauphase.

# 1 Einleitung

Abbildung 1 zeigt Türme von Offshore-Windenergieanlagen. Diese werden in Gruppen im Hafen zusammengebaut und dann in Gruppenkonfigurationen auf Installationsschiffen ins Meer transportiert. Während dieser Bauphasen muss das Risiko von Schwingungen aufgrund von Interferenzeffekten bewertet und minimiert werden.



Abbildung 1: Türme von Windenergieanlagen in Gruppenanordnung



Abbildung 2: Wirbelablösung [7] (links) und Gap-flow [3] (rechts) für Zylinder in Gruppenanordnung

Im Kontext von Interferenzeffekten müssen zwei aeroelastische Phänomene berücksichtigt werden: wirbelinduzierte Schwingungen und Interferenzgalloping. Wirbelinduzierte Schwingungen bei Türmen in Gruppen können mit ähnlichen Methoden wie bei einem einzelnen Turm behandelt werden. Dabei werden jedoch Belastungsparameter berücksichtigt, die die Gruppenkonfiguration widerspiegeln. Typischerweise zeigt sich dabei eine niedrigere Strouhal-Zahl aufgrund des breiteren Nachlaufs (siehe Abbildung 2, links), ein höherer Auftriebsbeiwert und eine längere Korrelationslänge. Insgesamt ist die Querschwingung in der Gruppe daher größer als bei einem einzelnen Turm.

Das Interferenzgalloping kann als Übergang zwischen zwei Strömungszuständen interpretiert werden (siehe Abbildung 2, rechts): dem Zustand, in dem der zweite Zylinder vollständig in den Nachlauf des ersten eintaucht, und dem Zustand, in dem eine Strömung im Luftspalt zwischen den gestaffelten Zylindern vorhanden ist. Diese Spaltströmung erzeugt auf der Spaltseite einen hohen Sog, der zu einer Querkraft führt. Bei schwingenden Zylindern kommt es zu einer Phasenverschiebung zwischen Querkraft und Schwingung, da die Spaltströmung zeitlich verzögert auftritt und länger anhält. Dadurch werden wesentlich größere Schwingungen angeregt (s. [3], [6]).

Der Eurocode stellt eine Gleichung zur Berechnung der reduzierten Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloping ( $V_{IG,red}$ ) in Abhängigkeit von der Scruton-Zahl ( $Sc$ ) und dem Turmabstand ( $a/D$ ) bereit, wobei  $a$  den Achsenabstand zwischen den Zylindern und  $D$  den Durchmesser darstellen:

$$V_{IG,red} = \frac{2\pi}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{Sc \cdot \frac{a}{D}}{a_{IG}}} \quad (1)$$

Der Begriff "reduzierte Windgeschwindigkeit" bezieht sich auf das dimensionslose Verhältnis zwischen der tatsächlichen Einsetzgeschwindigkeit  $V_{IG}$  in m/s und dem Produkt aus Eigenfrequenz  $f_1$  und charakteristischer Breite  $D$  (bzw. Durchmesser) des Bauwerks:

$$V_{IG,red} = \frac{V_{IG}}{f_1 \cdot D} \quad (2)$$

Darüber hinaus beschreibt die Scruton-Zahl das Verhältnis zwischen der schwingenden Masse des Bauwerks ( $m_{eq}$  in kg/m) und der Dämpfung des Bauwerks ( $\delta$ ) im Bezug auf die Masse pro m der bewegten Luft ( $\rho \cdot D^2$ ):

$$Sc = \frac{2 \cdot m_{eq} \cdot \delta}{\rho \cdot D^2} \quad (3)$$

$a_{IG}$  ist der Instabilitätsparameter. Der Eurocode empfiehlt den Wert  $a_{IG} = 3$  zur Berechnung der reduzierten Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloping. Dieser Wert wurde aus aeroelastischen Windkanalversuchen bei schwingenden Zylindern in Gruppen abgeleitet ([6], [3]).

Der Eurocode-Ansatz ermöglicht es, den Mindestwert der Scruton-Zahl zu bestimmen, der erforderlich ist, um sicherzustellen, dass auch im ungünstigsten Fall die Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloping während der Bauphase nicht erreicht wird. Aufgrund der besonders niedrigen Eigenfrequenz schlanker Offshore-Windtürme und der zu erwartenden hohen Windgeschwindigkeiten während der mehrwöchigen Installations- und Errichtungsphase ist der Eurocode-Ansatz hinsichtlich der erforderlichen Scruton-Zahl (bzw. Strukturdämpfung) für Offshore-Windkraftanlagen sehr konservativ und nicht praktikabel.

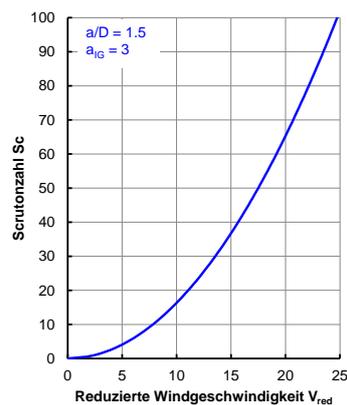
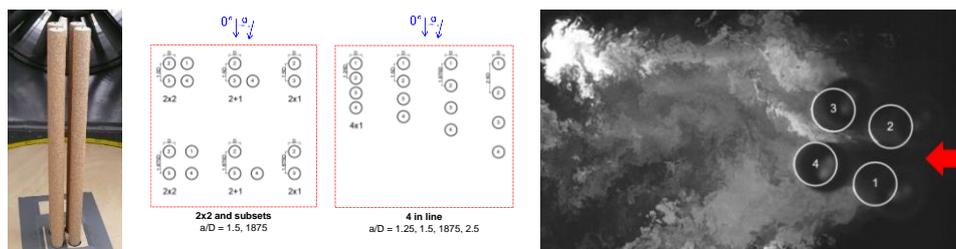


Abbildung 3: Eurocode-Ansatz für Interferenzgalloping [2]

## 2 Windkanalversuche

Zur Untersuchung von Interferenzeffekten wie wirbelinduzierten Schwingungen und Interferenzgalloping wurden Windkanalversuche im Grenzschichtwindkanal der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. In einer ersten Phase wurden die Winddrücke an starren Modellen in Gruppenanordnung gemessen, in weiteren Phasen die Windkräfte am Fuß von schwingenden aeroelastischen Modellen. Die Schwingungen der Zylinder können berechnet werden, indem die Massenkräfte entlang der Höhe den resultierenden Kräften oder Momenten am Fußpunkt entsprechen.

Die umfangreichen Windkanaluntersuchungen ermöglichten eine Variation der Strouhal-Zahlen zwischen 13 und 77. Es wurden verschiedene Gruppenanordnungen, d.h. die 2x2-Konfiguration und deren Subkonfigurationen 2x1 und 2+1, sowie 4 Zylinder in Reihe getestet. Die meisten Versuche wurden mit den relativen Abständen  $a/D = 1,5$  und  $a/D = 1,875$  durchgeführt, wobei  $a$  dem Achsabstand entspricht. Ausgewählte Konfigurationen wurden auch mit den Abständen  $a/D = 1,25$  und  $a/D = 2,5$  ergänzt (s. Abbildung 4, links und Mitte).



**Abbildung 4:** Windkanalmodelle der Windenergietürme (links), Konfigurationen der Windkanalversuche (Mitte); Visualisierung der Strömung in den Windkanalversuchen für die ausgewählte Konfiguration 2x2, Windrichtung  $15^\circ$  (rechts)

In Abbildung 4 (rechts) wird die experimentelle Strömungsvizualisierung durch Rauchgenerierung im Windkanal einer 2x2-Gruppenanordnung bei einer Windrichtung von  $\alpha=15^\circ$  dargestellt. Generell zeigen die Experimente in verschiedenen Gruppenanordnungen drei Strömungsphänomene: Abhängig vom Zylinderabstand und der Windrichtung können Spaltströmungen zwischen den Zylindern, Wirbelstraßen im Nachlauf jedes Zylinders und Wirbelstraßen im Nachlauf der gesamten Gruppe auftreten. Diese Strömungsphänomene können selbstinduzierte Schwingungen an den schwingenden Zylindern hervorrufen. Die Spaltströmung kann selbstinduzierte Schwingungen durch das Interferenzgalloping (IG) verursachen, während die Wirbelablösung wirbelinduzierte Schwingungen (VIV) auslösen kann.

Die Frequenz der Wirbelablösung  $f_s$  wird durch die Strouhal-Zahl dimensionslos beschrieben:

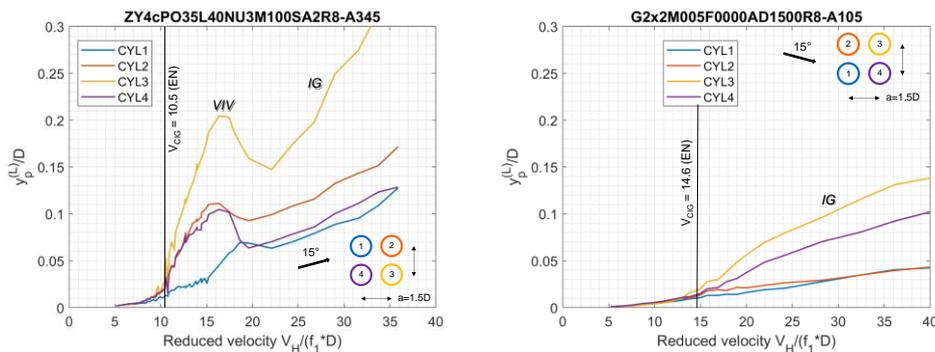
$$f_s = \frac{St \cdot V}{D} \quad (4)$$

Die Strouhal-Zahl ist abhängig von der Querschnittsform bzw. der Gruppenanordnung und umgekehrt proportional zur Nachlaufbreite. Die Strouhal-Zahl lässt sich sehr gut aus Versuchen am starren Modell bestimmen. Es sind aber zwei Fälle zu unterscheiden. Wenn

sich die Wirbelstraßen im Nachlauf jedes Zylinders entwickeln, stimmt die Strouhal-Zahl gut mit dem Eurocode für Zylinder in Gruppenanordnung überein ( $St = 0,1$  bis  $0,20$ ). Für geneigte Windrichtungen und kleine Turmabstände (zum Beispiel  $a/D = 1,5$ ) bildet sich eine breitere Wirbelstraße im Nachlauf der gesamten Gruppe aus. In diesem Fall ist die Strouhal-Zahl kleiner als  $0,1$ . Das bedeutet, dass die wirbelinduzierten Schwingungen bei einer höheren kritischen Windgeschwindigkeit auftreten. Die kritische Windgeschwindigkeit  $V_{cr}$  ist definitionsgemäß die Windgeschwindigkeit, bei der die Frequenz der Wirbelablösung gleich der Frequenz der Turmschwingung ist ( $f_s = f_1$ ).

$$V_{cr} = \frac{f_1 \cdot D}{V} \quad (5)$$

Die höhere kritische Windgeschwindigkeit aufgrund der kleineren Strouhal-Zahl nähert sich der Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloppings an. Das Zusammenwirken dieser beiden aeroelastischen Phänomene verstärkt die Schwingungen erheblich.



**Abbildung 5:** Schwingungen quer zum Wind der vier Zylinder in 2x2-Gruppenanordnung bei 15° Windrichtung. Scruton-Zahl = 18 (links), Scruton-Zahl = 35 (rechts).

Abbildung 5 (links) zeigt die Wechselwirkung der Wirbelerregung mit dem Interferenzgallopping für die Scruton-Zahl 18. Aufgrund dieser starken Interaktion der zwei Phänomene ist es nicht möglich, die Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloppings eindeutig zu bestimmen. Die Prognose des Eurocodes (siehe Abschnitt 1) stellt jedoch eine zuverlässige Grundlage für die Bemessung dar.

Abbildung 5 (rechts) zeigt den Vergleich der Schwingungen bei einer Scruton-Zahl von 35. Die etwa doppelt so große Scruton-Zahl reduziert die wirbelinduzierten Schwingungen deutlich. Die Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloppings kann aus dem Experiment eindeutig bestimmt werden und stimmt sehr gut mit dem Eurocode-Ansatz überein.

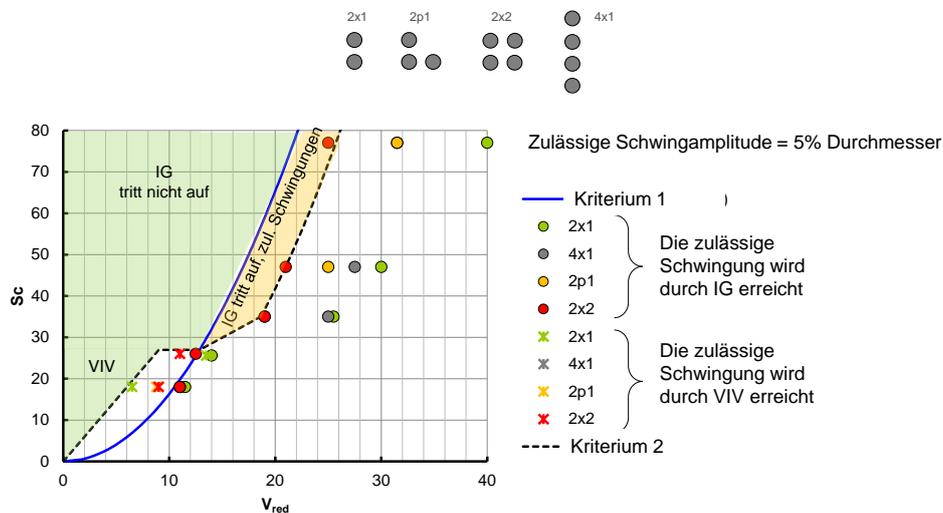
In Übereinstimmung mit dem Eurocode nimmt die Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloppings in den Versuchen mit der Wurzel der Scruton-Zahl zu. Das bedeutet, dass sehr hohe Scruton-Zahlen erforderlich sind, um die Einsetzgeschwindigkeit des Interferenzgalloppings auf sehr hohe reduzierte Windgeschwindigkeiten zu verlagern. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, den Einfluss der Scruton-Zahl auf das Schwingungsverhältnis nach dem Auftreten des Interferenzgalloppings zu betrachten. Dies ist in Abbildung 5 (links und rechts) dargestellt. Aufgrund der fehlenden Wechselwirkung zwischen dem Interferenzgallopping und der Wirbelerregung (Abbildung 5, rechts) ist der

Gallopinganstieg flacher und somit bleibt die aeroelastische Schwingung über einen wesentlich größeren Windgeschwindigkeitsbereich innerhalb zuverlässiger Grenzen.

### 3 Kriterien für die Bemessung

Aufgrund der experimentellen Ergebnisse werden zwei Kriterien empfohlen. Das erste Kriterium folgt dem Eurocode-Ansatz für aeroelastische Instabilitäten und ermöglicht die Bestimmung der Einsatzgeschwindigkeit des Interferenzgalloping. Wenn dieses Kriterium erfüllt ist, tritt Interferenzgalloping im Bemessungsgeschwindigkeitsbereich nicht auf. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Kriterium sehr anspruchsvoll sein kann, insbesondere im Hinblick auf die erforderliche Scruton-Zahl bzw. Strukturdämpfung. Daher haben wir zusätzlich ein zweites Kriterium entwickelt, das als Kriterium der zulässigen Schwingungen bezeichnet wird. Dieses Kriterium liefert die minimal zulässige Scruton-Zahl, die zu bestimmten zulässigen Schwingungsamplituden gehört. Dies ist definiert als die Scruton-Zahl, die erforderlich ist, um sicherzustellen, dass die Schwingungsamplituden innerhalb des gewünschten Windgeschwindigkeitsbereichs die zulässigen Werte nicht überschreiten. Da das Kriterium 2 die minimal zulässige Scruton-Zahl angibt, muss es immer erfüllt sein.

Ein weiterer Vorteil des Kriteriums 2 besteht darin, dass es nicht nur für das Interferenzgalloping, sondern auch für die wirbelinduzierten Schwingungen angewendet werden kann. Tatsächlich kann es vorkommen, dass bei kleinen Scruton-Zahlen die wirbelinduzierten Schwingungen für die Bemessung maßgebend sind, so dass das Kriterium 1 allein für das Interferenzgalloping auf der unsicheren Seite liegen könnte.



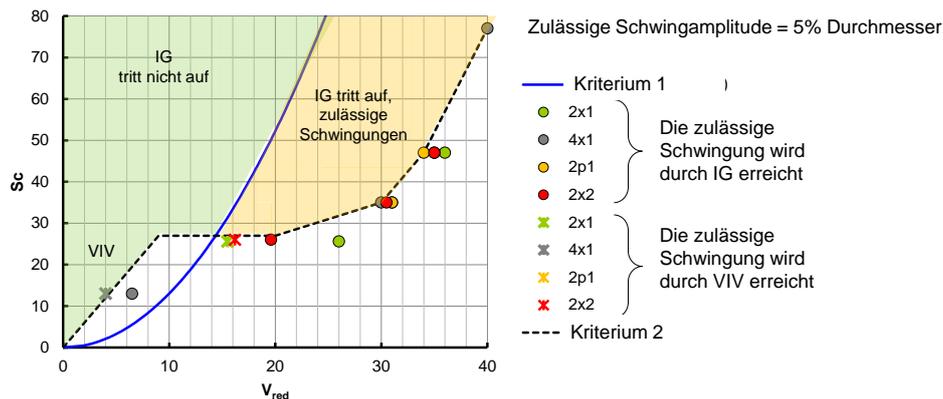
**Abbildung 6:** Bemessungskonzept für Wirbelerregung und Interferenzgalloping. Erforderliche Scruton-Zahl in Abhängigkeit vom gewünschten Windgeschwindigkeitsbereich ( $a/D = 1.5$ ).

Abbildung 6 zeigt alle Ergebnisse für verschiedene Gruppenkonfigurationen und Scruton-Zahlen in einem Diagramm. Diese Ergebnisse gelten für jede Gruppenkonfiguration (2x1, 2+1, 2x2 und 4x1) für  $a/D = 1,5$  und den Wert der zulässigen Schwingung von  $5\%D$ . Jeder

Punkt stellt den Wert der reduzierten Geschwindigkeit dar, bei dem die zulässige Schwingung von 5%D für jede Scruton-Zahl überschritten wird. Die Kreise zeigen an, dass in diesem Fall die zulässige Schwingung von 5%D aufgrund von Interferenzgalloping überschritten wird, während die Kreuze zeigen, dass die zulässige Schwingung von 5%D aufgrund von wirbelinduzierten Schwingungen überschritten wird.

Das Bild unterscheidet zwischen grünen und orangen Bereichen. Liegt die Scruton-Zahl für die gewünschte reduzierte Windgeschwindigkeit im grünen Bereich, so tritt das Interferenzgalloping nicht auf. Dies ist die optimale Situation, die jedoch hohe Anforderungen an die erforderliche Dämpfung stellt. Alternativ kann auch eine niedrigere Scruton-Zahl zugelassen werden (oranjer Bereich). In diesem Fall kann Interferenzgalloping auftreten, aber die Schwingungen werden den zulässigen Wert (5%D) nicht überschreiten.

Bei ausreichend kleinen Scruton-Zahlen, d. h. kleiner als 26, wird die Bemessung durch das Phänomen der wirbelinduzierten Schwingungen beherrscht. Die minimale Scruton-Zahl, die erforderlich ist, um sicherzustellen, dass die wirbelinduzierten Schwingungen im Bereich der Bemessungsgeschwindigkeit unter dem zulässigen Schwingungsniveau bleiben, ist größer als die Scruton-Zahl, die nach dem Eurocode für das Phänomen des Interferenzgalloping berechnet worden wäre.



**Abbildung 7:** Bemessungskonzept für Wirbelerregung und Interferenzgalloping. Erforderliche Scruton-Zahl in Abhängigkeit vom gewünschten Windgeschwindigkeitsbereich ( $a/D = 1.875$ ).

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse für einen größeren Abstand, nämlich  $a/D = 1.875$ . Dieser größere Abstand hat wesentlich günstigere Auswirkungen auf das Interferenzgalloping. Das resultiert in einer größeren orangefarbenen Fläche für die zulässigen Scruton-Zahlen, die der zulässigen Schwingung amplitude von 5%D entsprechen.

## 4 Zusammenfassung

Die Windkanalversuche haben gezeigt, dass eine Erhöhung des Massendämpfungsparameters (Scruton-Zahl) sehr effektiv ist, um die wirbelinduzierten Schwingungen der Gruppe zu reduzieren. Die dadurch abgeschwächte Wechselwirkung

zwischen Wirbelerregung und Interferenzgalloping führt dazu, dass die aeroelastischen Schwingungen aufgrund des Interferenzgalloping mit zunehmender Geschwindigkeit nicht stark ansteigen. Daher bleiben die aeroelastischen Schwingungen in einem viel größeren Bereich reduzierter Windgeschwindigkeiten unter den zulässigen Werten.

Der Eurocode-Ansatz für das Interferenzgalloping liefert im Allgemeinen eine gute Abschätzung der Eintrittsgeschwindigkeit, trotz komplexer Strömungsfelder und der Wechselwirkung der Wirbelerregung mit dem Interferenzgalloping. Eine Auslegung von Windenergieanlagen, die ausschließlich auf diesem Kriterium für Interferenzgalloping basiert, kann jedoch zu extrem konservativen Mindestdämpfungsanforderungen führen. Außerdem werden wirbelinduzierte Schwingungen nicht berücksichtigt. Zusätzlich zu dem traditionellen Kriterium der Eintrittsgeschwindigkeit sind spezifische Kriterien erforderlich, die auf zulässigen Schwingungen basieren. Diese Kriterien wurden in dieser Studie für verschiedene Abstände und Gruppenkonfigurationen entwickelt.

## Literatur

- [1] ALAM M.M., MEYER J.P.: Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross flow, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 41, 135-145, 2013.
- [2] DIN EN 1991-1-4:2010-12 EUROCODE 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Dez. 2010.
- [3] DIELEN B., RUSCHEWEYH H.: Mechanism of interference galloping of two identical circular cylinders in cross flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volumes 54–55, Pages 289-300, 1995.
- [4] LUPI F., SEIDEL M., HÖFFER R., HÖLSCHER N., NIEMANN H.-J., Mitigation of interference-induced vibrations for towers in group arrangements. Conference Proceedings of 17th International Conference of the Italian Association for Wind Engineering IN-VENTO 2022, Milan, Italy.
- [5] LUPI F., SEIDEL M., HÖFFER R., HÖLSCHER N., NIEMANN H.-J., Interference effects on four free-standing circular cylinders in group arrangement. Proceedings of the 8th European African Conference on Wind Engineering (8EACWE) held in Bucharest (Romania) in September 2022. Editors Ileana Calotescu, Adriana Chitez, Costin Coşoiu, Alexandru Cezar Vlăduţ, Conspress, 2022, ISBN 978-973-100-532-4.
- [6] RUSCHEWEYH H.: Aeroelastic interference effects between slender structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 14, Issues 1–3, Pages 129-140, 1983.
- [7] SUMNER D.: Two circular cylinders in cross-flow: A review. *Journal of Fluids and Structures*, Volume 26, Issue 6, Pages 849-899, 2010.
- [8] ZDRAVKOVICH M.M.: Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 28, Issues 1–3, Pages 183-199, 1998.