

Winderregte Querschwingungen
infolge Wirbelablösung bei kreiszylind-
rischen Bauwerken in Gruppen- und
Reihenanzordnung

T 2481

T 2481

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Forschungsvorhaben

**Winderregte Querschwingungen infolge
Wirbelablösung bei kreiszylindrischen Bauwerken
in Gruppen- und Reihenanordnung**

Auftraggeber: Institut für Bautechnik,
IfBT-Az.: N 1-5-657/91

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Spaethe
Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Vorwort

Am 24.11.1984 stürzte ein 150m hoher Stahlbetonschornstein im Kraftwerk Boxberg ein, der im Windschatten eines 300m hohen Stahlbetonschornsteines stand. Die Ergebnisse der vorgenommenen Schadensbegutachtungen ergaben, daß der Einsturz vorrangig durch winderregte Schwingungen quer zur Anströmrichtung erfolgte.

Mit dem Ziel, dem Praktiker Berechnungsgrundlagen über die effektiv zu erwartenden dynamischen Belastungen bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanzordnung zu übergeben, wurde durch die Bauakademie mit der Bearbeitung eines Forschungsthemas begonnen. Auftraggeber war das damalige Spezialbaukombinat Magdeburg, Kombinatbetrieb Beton- und Kühlturmbau.

Durch die politische Wende und die darauf folgende Auflösung der Kombinate und der Bauakademie, mußte die Bearbeitung des Themas abgebrochen werden. Im Jahr 1991 konnte die Arbeit, durch finanzielle Förderung des Instituts für Bautechnik unter der Themenbezeichnung "Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei kreiszylindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanzordnung" wieder aufgenommen werden.

Alle experimentellen Untersuchungen wurden in den Windkanälen und in der Wasserfließrinne in Dresden-Klotzsche von Herrn Dipl.-Ing. Klier und Herrn Dipl.-Ing. Koch durchgeführt.

Im vorliegenden Bericht sind alle Forschungsergebnisse zusammengefaßt. Er besteht aus folgenden Teilen:

- | | |
|---|-----------------|
| - Kurzbericht | |
| - Zusammenfassung | Seite 1 bis 8 |
| - Teil 1: Literaturlauswertung | Seite 1 bis 130 |
| - Teil 2: Zusammenstellung von vorhandenen Schornsteingruppen | Seite 1 bis 24 |
| - Teil 3: Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen | Seite 1 bis 175 |
| - Teil 4: Ergebnisse | Seite 1 bis 95 |

Für die finanzielle Förderung des Themas möchten wir dem Institut für Bautechnik unseren Dank aussprechen. Den Mitgliedern Betreuergruppe danken wir für die gewährte Unterstützung.

Berlin im Dezember 1992

G. Spaethe

A. Trätner

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei
kreiszyllindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

G. Spaethe, A. Trätner

Kurzbericht

Gruppenanordnungen von zylindrischen Bauwerken können infolge Windeinwirkungen bedeutend höhere Schwingungsamplituden und -beanspruchungen als das einzelstehende Bauwerk aufweisen. Die Ursache dafür liegt in der Belastung der stromabwärts liegenden Zylinder durch regelmäßige Wirbelablösung an den stromaufwärts befindlichen Zylindern.

Die Forschungsarbeit beinhaltet Windkanaluntersuchungen für Schornsteine, deren Massendämpfungsparameter der Stahlbetonbauweise entsprechen. Dabei wurden auch unterschiedliche Durchmesser- und Höhenverhältnisse bei Gruppen- und Reihenanordnungen betrachtet. Untersucht wurden Doppelanordnungen, Dreierreihenordnungen, Dreieckanordnungen, Vierer- und Fünferanordnungen.

Bei den Messungen wurden die Strouhalzahl S_r , der Querkraftbeiwert \tilde{C}_q und die bezogene Auslenkung ermittelt. Die Ergebnisse zeigen in der Regel kleinere Strouhalzahlen und größere Querkraftbeiwerte als beim Einzelzylinder, wenn das Verhältnis Abstand zu Durchmesser gering wird, der betrachtete Schornstein im Windschatten eines Schornsteins mit größerem Durchmesser steht und der betrachtete Schornstein im Windschatten eines Schornsteins mit größerer Höhe steht.

Abstandsverhältnis und Durchmessererverhältnis erweisen sich als die entscheidenden Parameter, das Höhenverhältnis hat einen geringeren Einfluß. Bei allen Versuchsauswertungen wurde darauf orientiert, Verhältniswerte für Gruppenanordnung zu Einzelanordnung zu bestimmen. Für diese werden Erhöhungsfaktoren für den Querkraftbeiwert und Abminderungsfaktoren für die Strouhalzahl in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis und vom Durchmessererverhältnis angegeben und für die praktische Anwendung empfohlen.

Die Arbeit enthält ferner eine Zusammenstellung und statistische Auswertung der geometrischen Daten von 132 ausgeführten Schornsteingruppen.

Wind Induced Vibrations of Cylindrical Bodies in Group- or Row-arrangements

G. Spaethe, A. Trätner

Abstract

Cylinders in groups in wind flow will get higher vibration amplitudes and internal forces than isolated ones. This is due to vortex shedding at the upstream cylinder.

The report contains results of wind tunnel experiments with chimneys with Scruton-numbers similar to reinforced concrete. Different diameters and heights of the chimneys in the group configuration were taken into account. Double-, triple-, triangle-, quadrangular-, and quintuple configurations have been investigated.

The Strouhal-number, the lift coefficient and the non-dimensional oscillation amplitudes have been determined. As a rule the results give smaller Strouhal-numbers and larger lift coefficients if the ratio of diameter to distance is getting smaller, if the upstream cylinder has a larger diameter than the downstream one, and if the height of the upstream cylinder is greater.

The ratios of distance and of diameter are decisive, the ratio of height has smaller influence. The test results are given as ratio of group arrangement to the isolated cylinder. For practical use ratios for the Strouhal-number and the lift-coefficient are given as a function of the ratios of distance and of diameter.

The report further gives a compilation of geometrical data of 132 existing chimney-groups and the statistical analysis.

Zusammenfassung

Forschungsvorhaben

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei kreisförmigen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

Auftraggeber: Institut für Bautechnik

IfBt - Az.: IV 1-5-657/91

Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Spaethe

Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Zusammenfassung

1. Winderregte Querschwingungen mit regelmäßiger Wirbelablösung gewinnen mit zunehmender Höhe und Schlankheit der Bauwerke an Bedeutung. Sie werden besonders wichtig, wenn mehrere der Bauwerke in Reihe oder in Gruppen angeordnet sind. Gruppenanordnungen von zylindrischen Bauwerken können infolge Windbeanspruchung bei bestimmten Anströmwindwinkeln sowie Abstands-, Durchmesser- und Höhenverhältnissen bedeutend höhere Schwingungsamplituden und -beanspruchungen als das einzelstehende Bauwerk aufweisen. Die Ursache dafür liegt in der Belastung der stromabwärts angeordneten Zylinder durch regelmäßige Wirbelablösung an den stromaufwärts liegenden Zylindern.

Durch den Einsturz eines 150 m hohen Stahlbetonschornsteines am 24. 11. 1984 im Kraftwerk Boxberg bei kritischen Windgeschwindigkeiten und Anströmwindwinkeln wurde die Aktualität dieser Problematik für die sichere Bemessung von Schornsteingruppen offensichtlich. Der eingestürzte Schornstein stand im Windschatten eines 300 m hohen Schornsteins mit größerem Durchmesser. Dieser Schadensfall war unmittelbarer Anlaß für

die durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen.

2. Die Auswertung der Literatur und der existierenden Vorschriften zeigte, daß Windkanalversuche fast ausschließlich mit Modellen durchgeführt wurden, deren Massendämpfungsparameter Stahlschornsteinen angepaßt sind. Weiterhin beziehen sich die vorhandenen Kenntnisse fast ausschließlich auf Reihenordnungen mit gleichen Zylinderdurchmessern und gleichen Höhen.

In den durchgeführten Windkanaluntersuchungen wurde der Schwerpunkt auf Massendämpfungsparameter gelegt, die Stahlbetonschornsteinen entsprechen, und es wurden unterschiedliche Durchmesser- und Höhenverhältnisse sowie Gruppen- und Reihenordnungen betrachtet.

3. Es wurde ein umfangreiches Meßprogramm mit folgenden Anordnungen bearbeitet:

- Doppelanordnungen, unterkritischer Reynoldszahlbereich

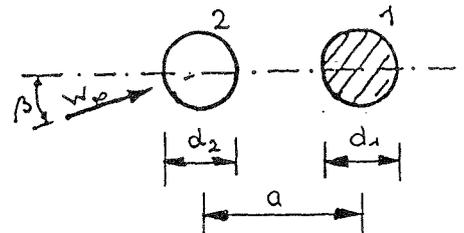
$$l_2/l_1 = 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2$$

$$d_2/d_1 = 0,67; 1; 1,5$$

$$a/d_1 = 3,25; 4; 5,05; 6,8; 10$$

$$\beta = 0; 5; 10; 15; 20; 25 [^\circ]$$

$$\text{Massendämpfungsparameter} = 26; 63$$



- Doppelanordnungen, transkritisch modellierter Reynoldszahlbereich

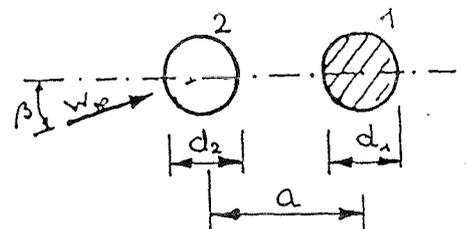
$$l_2/l_1 = 1; 1,37$$

$$d_2/d_1 = 1; 1,5$$

$$a/d_1 = 3; 4; 5; 7; 10; 12; (14)$$

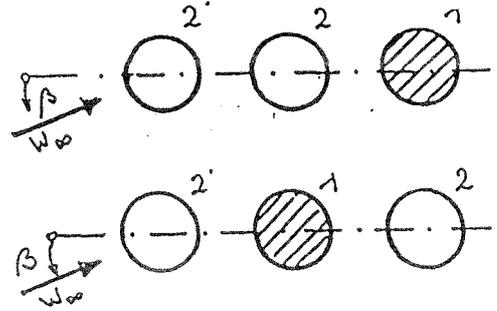
$$\beta = 0; \dots 180 [^\circ]$$

$$\text{Massendämpfungsparameter} \approx 62$$



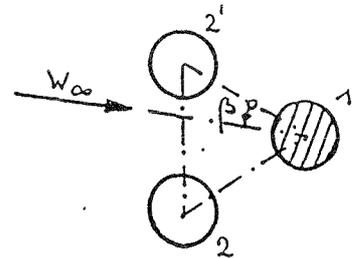
- Dreierreihenordnungen; unterkritischer Reynoldszahlbereich

$l_2/l_1 = 1; 2$
 $l_2^l/l_1 = 1; 2$
 $d_2/d_1 = 1; 1,5$
 $d_2^l/d_1 = 1; 1,5$
 $a/d_1 = 3; 4; 5; 6; 7; 10$
 $\beta = 0; \dots; 180 [^\circ]$
 Massendämpfungsparameter $\approx 8, \dots, 63$



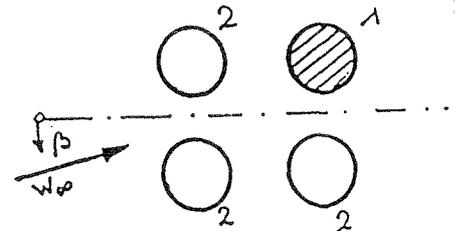
- Dreieckanordnungen; unterkritischer Reynoldszahlbereich

$l_2/l_1 = 1; 2$
 $l_2^l/l_1 = 1; 2$
 $d_2/d_1 = 0,67; 1; 1,5$
 $d_2^l/d_1 = 0,67; 1; 1,5$
 $a/d_1 = 3; 4; 5; 10$
 $\beta = 0; \dots 180 [^\circ]$
 Massendämpfungsparameter $\approx 31, 63$



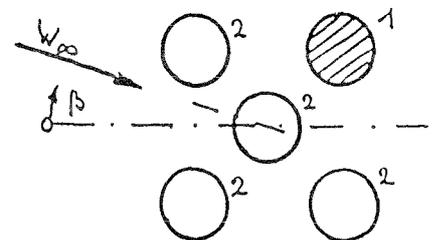
- Viereranordnung; unterkritischer Reynoldszahlbereich

$l_2/l_1 = d_2/d_1 = 1$
 $a/d_1 = 3; \dots; 12,6$
 $\beta = -60; \dots; +45 [^\circ]$
 Massendämpfungsparameter ≈ 59



- Fünferanordnung; unterkritischer Reynoldszahlbereich

$l_2/l_1 = d_2/d_1 = 1$
 $a/d_1 = 3; \dots; 12,5$
 $\beta = 0; \dots; +45 [^\circ]$
 Massendämpfungsparameter 59



In der Übersicht bedeuten:

d_1, l_1 = Durchmesser und Höhe des Meßzylinders 
 d_2, d_2^l, l_2, l_2^l = Durchmesser und Höhe der Blendenzylinder 
 a = Zylinderabstand; β = Anströmwinkel in Grad
 w_∞ = ungestörte Strömungsgeschwindigkeit

4. Die experimentellen Untersuchungen wurden in den Windkanälen der Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH in Dresden-Klotsche durchgeführt. Als Versuchsanlagen wurden verwendet:
- Großer Windkanal NKI, Göttinger Bauart, 10 m² Fläche, $v_{\max} \approx 70$ m/s, Düse quasielliptisch
 - Mittlerer Windkanal NK II Göttinger Bauart, 0,8 m² Fläche, $v_{\max} \approx 70$ m/s, Düse kreisförmig
 - Wasserfließrinne zur Vorklärung ebener Um- und Durchströmprobleme.
5. Querschwingungsuntersuchungen können im benutzten Windkanal nur im unterkritischen und im unteren überkritischen Reynoldszahlbereich durchgeführt werden. In der Praxis treten bei Stahlbetonschornsteinen Querschwingungsbeanspruchungen im transkritischen Reynoldszahlenbereich auf. Es wurden deshalb zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen im unterkritischen Bereich für ausgewählte wichtige Doppelzylinderanordnungen Erprobungen bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung durchgeführt. Die das transkritische Gebiet charakterisierenden turbulenten Grenzschichten wurden mit Stolperkanten erzeugt. Die Modellierbarkeit wurde am Einzelzylinder nachgewiesen. Bei Doppelanordnungen können nur bei größeren Anströmwinkeln Fehler entstehen, wenn der Meßzylinder gerade den Nachlauf des Blendenzylinders berührt.
6. Bei den Messungen wurden ermittelt:
- die Strouhalzahl S_r
 - der Querkraftbeiwert \tilde{c}_0
 - die bezogene Auslenkung η

Die Auslenkung ist dem Verhältnis \tilde{c}_0/S_r^2 proportional, sie kann als ein Maß der Beanspruchung aufgefaßt werden.

Im ausführlichen Abschlußbericht sind diese aus dem Messungen ermittelten Werte in Tabellen und Diagrammen zusammenge-

stellt. Während die Strouhalzahlen ziemlich systematisch variieren, zeigen die Querkraftbeiwerte große Streuungen.

7. Die Ergebnisse der Messungen zeigen in der Regel kleinere Strouhalzahlen und größere Querkraftbeiwerte als beim Einzelzylinder wenn

- die Abstandsverhältnisse a/d_1 gering werden,
- der betrachtete Schornstein im Windschatten eines Schornsteins mit größerem Durchmesser steht und
- der betrachtete Schornstein im Windschatten eines Schornsteins mit größerer Höhe steht.

Abstandsverhältnis und Durchmesser Verhältnis erwiesen sich als die entscheidenden Parameter. Das Höhenverhältnis hat einen geringeren Einfluß. Da die Durchmesser- und Höhenverhältnisse der real ausgeführten Schornsteine sehr stark positiv korreliert sind, genügt es im Vorschlag für die praktische Anwendung sich auf die Betrachtung der Durchmesser Verhältnisse zu beschränken. Bei allen Versuchsauswertungen wurde darauf orientiert Verhältniswerte für Gruppenanordnung zu Einzelanordnung zu bestimmen.

8. Für die praktische Anwendung wird folgende vereinfachte Lastannahme für winderregte Querschwingungen vorgeschlagen:

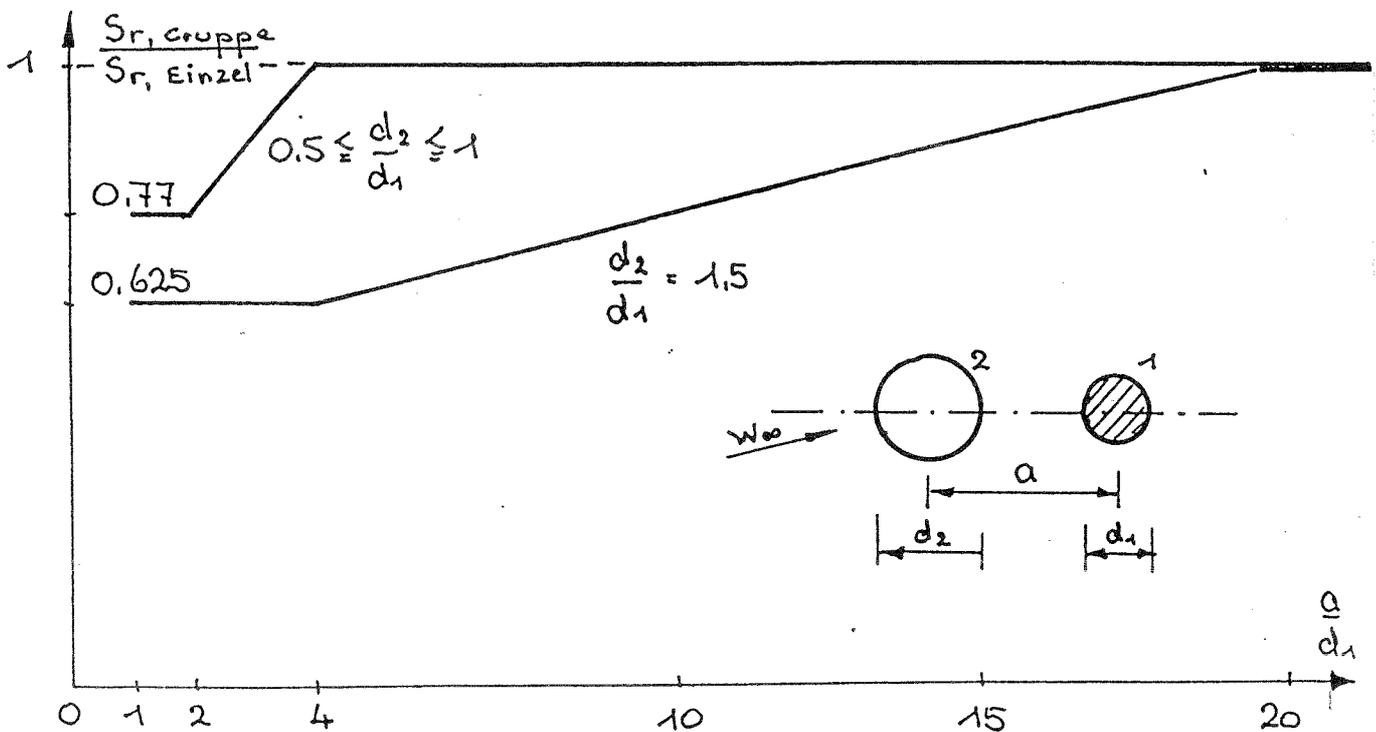
Die für den einzeln stehenden Schornstein in Massivbauweise angegebene Strouhalzahl ist durch folgenden Verhältniswert in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis a/d_1 und vom Durchmesser Verhältnis d_2/d_1 abzumindern:

Für $0,5 \leq d_2/d_1 \leq 1$:

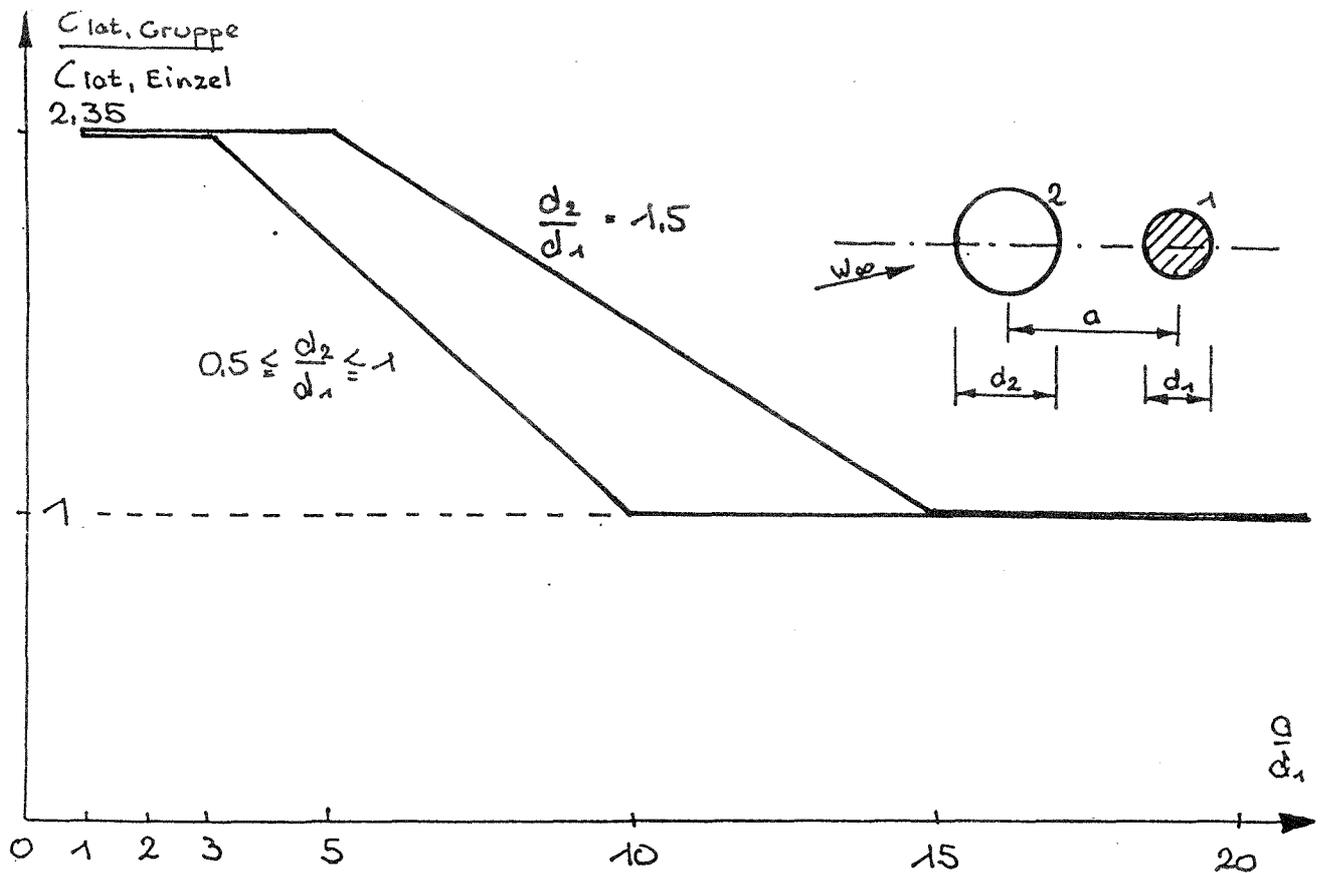
$$\begin{array}{l}
 \underline{S_{r, \text{Gruppe}}} = \\
 \underline{S_{r, \text{Einzel}}}
 \end{array}
 = \left\{ \begin{array}{ll}
 0,770 & \text{für } a/d_1 \leq 2 \\
 0,115 \cdot a/d_1 + 0,540 & \text{für } 2 < a/d_1 \leq 4 \\
 1 & \text{für } 4 < a/d_1
 \end{array} \right.$$

Für $d_2/d_1 = 1,5$:

$$\frac{S_{r, \text{gruppe}}}{S_{r, \text{Einzel}}} = \begin{cases} 0,625 & \text{für } a/d_1 \leq 4 \\ 0,0234 \cdot a/d_1 + 0,531 & \text{für } 4 < a/d_1 \leq 20 \\ 1 & \text{für } 20 < a/d_1 \end{cases}$$



Der für einzeln stehende Schornsteine ermittelte Erregerkraftbeiwert c_{1a} ist durch folgende Verhältniswerte zu vergrößern:



Für $0,5 \leq d_2/d_1 \leq 1,0$:

$$\frac{C_{lat, Gruppe}}{C_{lat, Einzel}} = \begin{cases} 2,35 & \text{für } a/d_1 \leq 3 \\ 2,929 - 0,193 \cdot a/d_1 & \text{für } 3 < a/d_1 \leq 10 \\ 1,0 & \text{für } 10 \leq a/d_1 \end{cases}$$

Für $d_2/d_1 = 1,5$:

$$\frac{C_{lat, Gruppe}}{C_{lat, Einzel}} = \begin{cases} 2,35 & \text{für } a/d_1 \leq 5 \\ 3,025 - 0,135 \cdot a/d_1 & \text{für } 5 < a/d_1 \leq 15 \\ 1,0 & \text{für } 15 \leq a/d_1 \end{cases}$$

Für $1 < d_2/d_1 < 1,5$: Lineare Interpolation.

Ist die Schornsteinhöhe $h_2 < 0,5 \cdot h_1$ oder erfolgt eine Abminderung des Erregerkraftbeiwertes c_{lat} auf Grund zu hoher kritischer Windgeschwindigkeiten, so daß $(c_{lat}/S_r^2)_{Einzel} \geq (c_{lat}/S_r^2)_{Gruppe}$ wird, sind die Strouhalzahlen und Erreger-

kraftbeiwerte des Einzelschornsteins maßgebend.

Gruppen- und Reihenanordnungen aller Art können hierbei näherungsweise durch Zweieranordnungen ersetzt werden.

9. Eine Zusammenstellung und statistische Auswertung von insgesamt 132 Schornsteingruppen in den ostdeutschen Bundesländern ergab für die Gruppe der Massivschorensteine ein mittleres Abstandsverhältnis von $E[a/d_1] = 6,12$ und eine Standardabweichung von 2,80. So haben zum Beispiel 10% aller Schornsteingruppen Abstandsverhältnisse von $a/d_1 \leq 3$ und 38% Abstandsverhältnisse von $a/d_1 \leq 5$, bei denen große Beanspruchungserhöhungen auftreten. Nicht nur der erwähnte Schadensfall Boxberg sondern auch diese statistischen Erhebungen zeigen, daß die Untersuchungsergebnisse durchaus praktische Relevanz besitzen.

Teil 1: Literaturlauswertung

Forschungsvorhaben

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei
kreiszyllindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

Teil 1 Literaturlauswertung

IfBt - Az.: IV 1-5-657/91

von Prof. Dr. Gerhard Spaethe
Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Mitglieder der Betreuergruppe:

Prof. Dr. Ruscheweyh
Prof. Dr. Petersen
Dr. Nieser
Dipl.-Ing. Hirtz

Zeuthen im November 1991

Frau Schardin - Liedtke Tel 264 (Nachfolger von Herrn Berlin)

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen zur Literaturlauswertung

Ausgewertete Literaturstellen

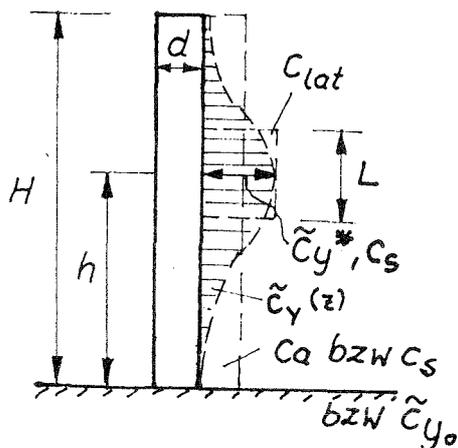
- Fluctuating response of circular cylinders in fluid flow
- Flow-induced vibration of cylindrical structures
- Winderregte Schwingungen von Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung
- Dynamische Windwirkung an Bauwerken unter Interferenzeinfluß
- Cross-wind vibrations of grouped and in-line stacks
- Windbelastung schlanker Bauwerke in Gruppenanordnung
- Querschwingungsverhalten von Stahlkaminen in Reihenanordnung
- Dämpfung winderregter Schwingungen von Stahlschornsteinen
- Aerodynamik der Bauwerke
- Dynamische Windwirkung an Bauwerken
- Schadensfall an einem 150m hohem Stahlbetonschornstein
- Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnungen

Literaturverzeichnis

Vorbemerkungen zur Literaturlauswertung

Im vorliegenden Abschnitt sind Auswertungen von zugänglichen Veröffentlichungen enthalten.

In Modellversuchen in herkömmlichen Windkanälen können die für Stahlbetonschornsteine zutreffenden transkritischen Reynoldszahlen nicht erreicht werden. Für Modellversuche wurde deshalb meistens der unterkritische Bereich gewählt. Die dabei ermittelten Quertriebsbeiwerte sind höher als im transkritischen Bereich. Diese Beiwerte sind von zahlreichen Einflußfaktoren abhängig und deshalb in Modellversuchen schwierig zu erfassen. Ein großer Unterschied besteht in der Meßmethode. Wird der Quertriebsbeiwert aus Druckverteilungsmessungen ermittelt, dann erhält man den örtlichen Beiwert $c_a^* = \tilde{c}_y^* \approx c_{lat}$. Erfolgt die Bestimmung als integraler Wert an einem Zylinder durch Kraftmessung, dann ermittelt man $c_a = c_s = \tilde{c}_{y_0}$.



$$\int_0^H \tilde{c}_y(z) dz = c_{lat} \cdot L$$

$L =$ Korrelationslänge
(abhängig von
 $\lambda = \frac{H}{d}$; $\eta = \frac{y_0}{d}$)

$$c_{lat} \cdot L \cdot h = \frac{c_a \cdot H^2}{2}$$

In den Datenquellen für den Quertriebsbeiwert ist häufig die Bestimmungsmethode nicht angegeben. Man kann davon ausgehen, daß ältere Literaturangaben Werte aus Kraftmessungen enthalten.

Messungen an Originalbauwerken beruhen meist auf Druckverteilungsmessungen. Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsaufgaben durchgeführten Windkanaluntersuchungen ermitteln Quertriebsbeiwerte aus Kraftmessungen.

Die Meßwerte aus Druckverteilungsmessungen liegen höher als die aus Kraftmessungen ermittelten und sind durch den unbedeutenden Einfluß von der Korrelationslänge L auch nahezu unabhängig von der relativen Schwingungsamplitude

$$\eta = y_0/d \quad \text{und von der Schlankheit} \quad \lambda = H/d.$$

Der Einfluß der Turbulenz hat eine ähnliche Wirkung wie Rauigkeitsänderungen.

Für eine praktische Vorausberechnung der Schwingungen von in einer Reihe stehenden Zylindern sind die Angaben von Strouhalzahlen, Erregerkraftbeiwerten und kombiniertem Instabilitätsmaß erforderlich. Bei der Reihenanordnung von zwei Zylindern zeigt der hintere Zylinder die größten Maximalschwingungen. In der Literatúrauswertung wurden deshalb i.a. nur die Werte des hinteren Zylinders (downstream) aufgezeigt.

- Eine gute Zusammenstellung von Erkenntnissen über Zylinder in Reihen- und Gruppenanordnung sowie Literaturangaben über veröffentlichte Untersuchungsergebnisse sind im "Engineering sciences data in number 79025 vom Nov. 1979" enthalten.
- Ausführlich behandelt Chen in seinem Buch "Flow induced vibrations of circular cylindrical structures" die strömungstechnische Seite von winderregenden Zylindern in Einzel- und Zweieranordnung. Besonders interessant sind zusammengestellte Kennwerte aus aerodynamischen experimentellen Untersuchungen.
- Ruscheweyh behandelt in seinen Veröffentlichungen aus den Jahren 1981, 1984 und 1985 winderregte Schwingungen von Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung. Die Interferenzeinflüsse auf die Wirbelresonanzschwingung werden in dem aerodynamischen Erregerkraftbeiwert c_y und der kritischen reduzierten Geschwindigkeit $u_{r \text{ krit}}$ erfaßt und müssen experimentell ermittelt werden. Die meisten dieser Versuche sind im Windkanal an Modellen mit entsprechend kleinen Reynoldszahlen durchgeführt worden. Beobachtungen an ausgeführten Anlagen zeigen jedoch, daß die bisher im Modellversuch gefundenen Werte einigermaßen bestätigt wurden. Stehen zwei Schornsteine eng beieinander ($a/d < 3$) kann unter bestimmten Randbedingungen

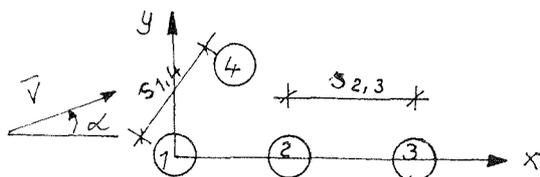
Interferenzgalloping auftreten.

- Gerhardt und Kramer untersuchten Reihenanordnungen von elastischen Kreiszylindern im unterkritischen Reynoldsbereich. Die dynamischen Ähnlichkeitsbedingungen wurden Stahlschornsteinen angepaßt. Die Windkanaluntersuchungen erfolgten mit gekoppelten und ungekoppelten Reihenanordnungen.
- Hanekamp und Hammer untersuchten im Windkanal das Querschwingungsverhalten von Stahlkaminen in Reihenanordnung. Bei den Versuchen wurde die Anzahl der Modelle (maximal 4), der Abstand der Modelle untereinander, der Anströmwinkel sowie die Masse-Dämpfungsparameter der Modelle variiert. Außerdem wurde der Einfluß der Abspannung eines Zylinders in der Reihe auf die Reduzierung der Querschwingungsamplitude betrachtet.
- Adler und Hirsch beschrieben aufgetretene Schwingungen bei einem Stahlschornstein, der versetzt in Hauptwindrichtung zu zwei parallel angeordneten Schornsteinen steht. Durch den Einbau eines Schwingungsdämpfers erfolgte eine Sanierung.
- In Büchern von Sockel (Aerodynamik der Bauwerke) und Ruscheweyh (Dynamische Windwirkungen an Bauwerken, Band 2) werden Aussagen über Interferenzwirkungen von Bauwerken gemacht.
- Meiche berichtet über den Einsturz eines 150m hohen Stahlbetonschornsteines, der im Windschatten eines 300m hohen Stahlbetonschornsteines lag. Der Einsturz erfolgte vorrangig infolge winderregter Schwingungen quer zur Anströmrichtung.
- Trätner beschrieb die Untersuchung der winderregten Querschwingungen von Kreiszylindern in Doppelanordnung im Windkanal. Es erfolgte eine Variation des Durchmesser-, Höhen- und Abstandsverhältnisses sowie des Anströmwinkels zur Reihung. Das logarithmische Dekrement und die Scrutonzahl der Modelle wurden Stahlbetonschornsteinen angepaßt. Die Messungen erfolgten im unterkritischen und teilweise im modellierten transkritischen Bereich. Die Ergebnisse wurden mit den Angaben in Richtlinien und Vorschriften verglichen.

Fluctuating response of circular cylinders in small groups
in fluid flow - discussion and guide to data available.
Engineering Sciences Data item Number 79025
vom Nov. 1979 mit Ergänzungen vom Febr. 1981
ENGINEERING SCIENCES DATA UNIT 251-259 REGENT STREET,
LONDON W1R 7AD

Bezeichnungen:

- n_s = Wirbelablösefrequenz
- n_j = j-te Eigenfrequenz
- St = Strouhalzahl
- $V_R = \frac{\bar{V}}{n_j \cdot D}$ = reduzierte Anströmgeschwindigkeit
- \bar{V} = mittlere Anströmgeschwindigkeit
- D = Durchmesser des Bauwerkes
- $\eta = \frac{\partial x}{D}$ = dimensionslose Schwingungsamplitude
- $\partial x, \partial y, \partial z, \partial r$ = Bauwerksreaktion (Schwingweg in x-, y- oder z-Richtung)
- $\zeta_s \approx \frac{\delta_s}{2\pi}$ = Lehrsches Dämpfungsmaß
- δ_s = logarithmisches Dekrement der Dämpfung
- ρ_s = Dichte des Bauwerkes $[\frac{kg}{m^3}]$
- ρ = Dichte des Fluid
- s_L = Abstand zwischen den Zylindern in Strömungsrichtung
- s_t = Abstand zwischen den Zylindern quer zur Strömungsrichtung
- α = Anströmwinkel



Die Abschnittsangaben beziehen sich auf die Originalveröffentlichung

Re = Reynoldszahl

$$m_e = \frac{\int_0^H m(z) \cdot \left(\frac{\hat{y}(z)}{\hat{y}_0}\right)^2 \cdot dz}{\int_0^H \left(\frac{\hat{y}(z)}{\hat{y}_0}\right)^2 \cdot dz} = \text{generalisierte Masse pro Längeneinheit (bei gleichmäßig verteilter Masse } m=m_e)$$

m = Masse pro Längeneinheit

H = Höhe des Kreiszylinders

y_0 = größter Schwingungsausschlag einer Schwingungsform

$\hat{y}(x)$ = Schwingungsausschlag einer Schwingungsform in der Höhe z

$\mu_j(r)$... " " " r

$\bar{\alpha}$ = Exponent im Geschwindigkeitsprofilgesetz

I_u = Turbulenzintensität

r_{Lu} = Längenmaßstab der v-Komponente der Turbulenz in Richtung r = y oder z

ϵ = Rauigkeitsparameter

base = Wert am unteren Ende des auskragenden Zylinders

tip = Wert am oberen Ende des auskragenden Zylinders

Re_e = effektive Reynoldszahl = $\lambda_R \cdot \lambda_T \cdot Re$

λ_R, λ_T = Parameter zur Bestimmung der Auswirkungen der Oberflächenrauigkeit bzw. der Turbulenz

$\frac{2 \cdot m_e \cdot \delta}{\rho \cdot D^2}$ = Massendämpfungsparameter

Einführung:

Wenn zwei oder mehr Körper unmittelbar nebeneinander stehen, sind die Strömungsverhältnisse anders als beim Einzelkörper. Das führt zu unterschiedlichen, auf die Körper einwirkenden Kräften sowohl im zeitlichen Mittelwert als auch bei den Schwankungswerten. Die vorliegende Datenveröffentlichung befaßt sich mit den Auswirkungen der Gruppenanordnung auf die einwirkenden Schwankungsgrößen (pulsierender Anteil).

Gruppenweise Anordnung kreisrunder Zylinder treten auf bei Schornsteingruppen, bei Rohrbündeln in einer Chemieanlage, bei Kabelbündel sowie bei Rohrbündeln in Wärmeaustauschern. Die vorliegende Veröffentlichung beschäftigt sich hauptsächlich mit Gruppen bis zu 5 oder 6 Zylindern und befaßt sich nicht speziell mit Rohrbündeln in Wärmeaustauschern bzw. Kabelbündeln. Dieses ist eine spezielle Problematik mit einer unmittelbar aneinander angeordneten großen Zahl von Rohren bzw. flexiblen Kabeln. Einige Informationen werden jedoch über Einzel- und Doppelreihen von Rohren in Kanälen gegeben.

Zur Zeit ist es noch nicht möglich, Korrelationsdaten zur Verfügung zu stellen, aus denen die Auswirkungen auf in Gruppen angeordneten Zylindern berechnet werden können. Der Konstrukteur muß auf Literaturergebnisse und ggf. auf Modellversuche zurückgreifen. Die vorliegende Veröffentlichung bietet im Abschnitt 5 eine Zusammenstellung von "Datenquellen", wie sie gegenwärtig zur Verfügung steht. Für jede Literaturquelle wird eine kurze tabellenförmige Zusammenfassung der Gruppenanordnung, der Strömungs- und Konstruktionsdaten sowie der zugehörigen Frequenzwerte angegeben. Was wichtig ist oder ausgelassen wurde; darauf ist hingewiesen.

Im Abschnitt 3.2 wird behandelt, wie verschiedene Parameter die Schwingungsantwort beeinflussen. Das ist auch wichtig für die Durchführung von Modellversuchen.

Im Abschnitt 4. werden Methoden zur Reduzierung strömungsinduzierter Schwingungen behandelt.

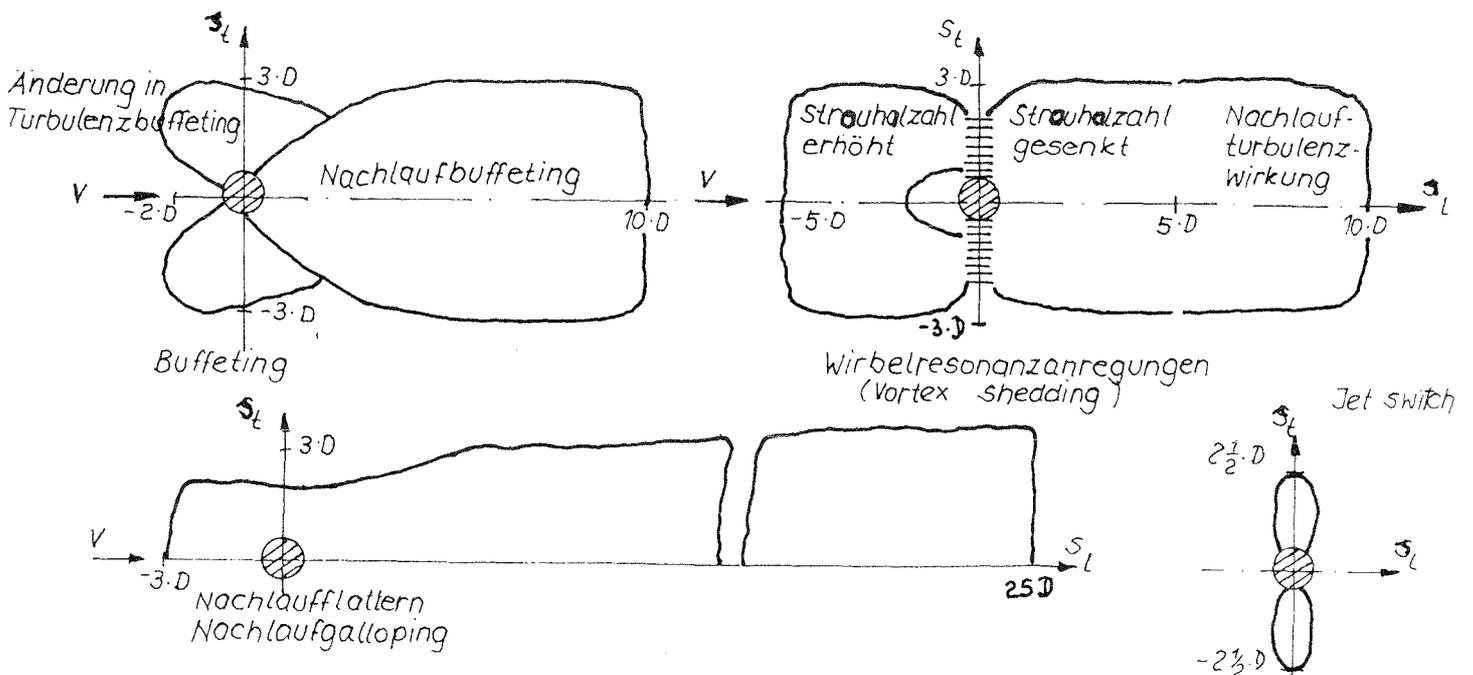
Allgemeine Diskussion über die Antworten bei Gruppenanordnungen von Zylindern:

Ein Zylinder in einer Gruppenanordnung ist ähnlichen Einflußmechanismen unterworfen wie ein alleinstehender Zylinder. Durch Interferenzeinfluß treten jedoch Veränderungen auf. Es können auch Erregungen auftreten, die nur durch Interferenzwirkungen erzeugt werden.

Interferenzwirkungen können aus folgenden Ursachen entstehen:

- 1. Buffeting (Erregung eines Zylinders durch den Nachlauf eines anderen)
- 2. Vortex shedding (Veränderung der Lastwirkung und Frequenz der Wirbelanfachung)
- 3. Interferenz-Galloping (Variation des quasistatischen Einflusses auf einen Zylinder während seiner Schwingung in bezug auf einen anderen. Nachlauf-Flattern oder Nachlaufgalloping)
- 4. Instabilität der Strömung um einen Zylinder infolge des Vorhandenseins weiterer Zylinder (Jet switch)

Interferenzeinwirkungen sind nicht auf einen Zylinder beschränkt, der in Strömungsrichtung hinter dem anderen liegt. Die Strömung um jeden beliebigen Zylinder kann von anderen, die in der Nähe liegen, beeinflußt werden. Die Interferenz kann die Reaktionsfrequenz im Vergleich zu einem alleinstehenden Zylinder erhöhen oder reduzieren. Die schraffierten Flächen auf der Abbildung zeigen annähernd die Bereiche, in denen Interferenzwirkungen die Schwingungen eines zweiten Zylinders beeinflussen können, der in der Nachbarschaft des markierten ersten Zylinders angeordnet ist.



Die folgende Tabelle zeigt einige der wichtigsten Charakteristika der Reaktionen auf die Lastschwankungen bei Buffeting, Wirbelresonanzanregung (vortex shedding), Nachlaufzittern und Nachlaufgalloping.

	Turbulenz- und Nachlauf-Buffeting	Wirbelresonanzanregung (vortex shedding)	Nachlaufzittern und Nachlaufgalloping (Interferenz-G.)
Typische Verlaufskurven	<p>Einschließlich der Auswirkung der Vortex shedding</p> <p>Ohne Auswirkung der Vortex shedding</p>	<p>Konstante Amplitude (Schmalband)</p> <p>Zufallsamplitude oder Breitband</p>	<p>Grenze des günstigen Nachlaufbereiches</p>
kritische Bedingungen	<p>Wenn eine Konstruktion wirbelbeeinflusst wird, kann die K_{η}-Kurve einen Höcker durch eine dominierende Schwingungsfrequenz erhalten.</p>	<p>Spitzenwerte ergeben sich bei $n_s \approx n_j$. Schmalband-Antworten können erhalten werden bis + 20 % des exakten Wertes. Bei konischen Bauwerken ist $\frac{n_s \cdot D_r}{V} = \text{konstant}$ entlang der Konstruktion.</p> <p>Spitzenwerte ergeben sich in kritischen Höhen bei $n_s \approx n_j$.</p>	<p>Beginn des Flatterns bzw. Galloping wenn \bar{V} hoch genug ist, um Energie zu liefern; die den Dämpfungsverlust übersteigt. Tritt nur in einem bestimmten Teil des Nachlaufs auf. Benötigt in einigen Bereichen eine Startstörung, während in anderen Bereichen der Start automatisch erfolgt.</p>

(Fortsetzung Tabelle Vorseite)

	Turbulenz- und Nachlauf- Buffeting	Wirbelresonanzanregung (vortex shedding)	Nachlaufflattern und Nachlauf- galloping (Interferenz-Galloping)
Bewegungs- richtung	In und quer zur Strömungs- richtung oft in ähnlichen Größen	Quer zur Strömungsrichtung, abgesehen von dem Fall, wenn ρ_s/ρ oder ξ_s gering ist, wo in Strömungsrichtung bei ei- ner Strömungsgeschwindigkeit, die der Anfachung einzelner Wirbel entspricht, Schwin- gungen auftreten können (d.h. $n_j = 2n_s$)	Sowohl in Strömungsrichtung als auch quer dazu, wobei die erste Möglichkeit gewöhnlich vor- herrscht.
Grenzen der Amplitude	Nicht begrenzt, steigert sich mit steigender \bar{V}	Begrenzt durch strömungs- elastische Rückwirkung auf $\eta \leq 1$	Begrenzt durch Nachlaufbereiche, in denen Kräfte entsprechenden Vorzeichens gebildet werden. Größere Amplituden sind in nach- geordneter Strömung möglich, wo der Nachlauf breiter ist.

3.1.1. Turbulenz- und Nachlaufbuffeting:

Buffeting wird erzeugt durch Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit, die Kräfte auf einen Zylinder ausüben, der sich in jener Strömung befindet. Nachlaufbuffeting ist im wesentlichen ein Interferenzeffekt und tritt auf, wenn ein Zylinder im Nachlaufbereich eines anderen Zylinders steht.

3.1.2. Wirbelresonanzanregung (Vortex Shedding):

Wenn einmal Schwingungen mit einer Amplitude $> 0,02 \cdot D$ ausgelöst werden, tendiert die Wirbelfrequenz dazu, sich an die Eigenfrequenz des Zylinders auch dann anzuschließen, wenn die Strömungsgeschwindigkeit um $\pm 20\%$ schwankt. Dadurch können Schwingungen bei sich verändernder Strömungsgeschwindigkeit über relativ lange Zeit anhalten.

Die Interferenz beeinflusst sowohl die Frequenz als auch die Stärke der Wirbelresonanzschwingungen. Für Abstände bis zu $4 \cdot D$ oder $5 \cdot D$ wird die Strouhalzahl gesteigert für den Zylinder in vorgeordneter Strömungsrichtung und gesenkt für den Zylinder in nachgeordneter Strömungsrichtung. Bei größeren Abständen kehrt die Strouhalsche Zahl auf den Wert für einen alleinstehenden Zylinder unter vergleichbaren Strömungsbedingungen zurück.

Die Wirkungen der Interferenz auf die Stärke der Wirbelschwingungen sind im einzelnen nicht bekannt. Sowohl erhöhte als auch niedrigere Werte bei Gruppenanordnungen, im Vergleich mit einem ähnlichen, einzeln stehenden Zylinder, sind beobachtet worden. Eine mögliche Erklärung besteht darin, daß bei Zylindern mit engen Abständen (bei denen reduzierte Amplituden beobachtet wurden) das zeitweilige Aussetzen des Nachlaufs von einem Zylinder in vorgeordneter Strömungsrichtung die Korrelation der Wirbelanfachung auf den Zylinder in nachgeordneter Strömungsrichtung reduziert. Der Korrelationsgrad gibt das Maß an, in dem eine Wirbelfrequenz gleichzeitig am ganzen Zylinder auftritt.

3.1.3. Nachlaufflattern und Nachlaufgalloping (Wake flutter and wake galloping):

Wenn sich ein Zylinder im Nachlaufbereich eines anderen bewegt, verändern sich die auf ihn einwirkenden Kräfte im Ergebnis der Veränderung der örtlichen Geschwindigkeit. Diese Veränderungen der Kräfte können zu Nachlaufflattern oder Nachlaufgalloping führen, die ausschließlich das Ergebnis von Interferenzwirkungen

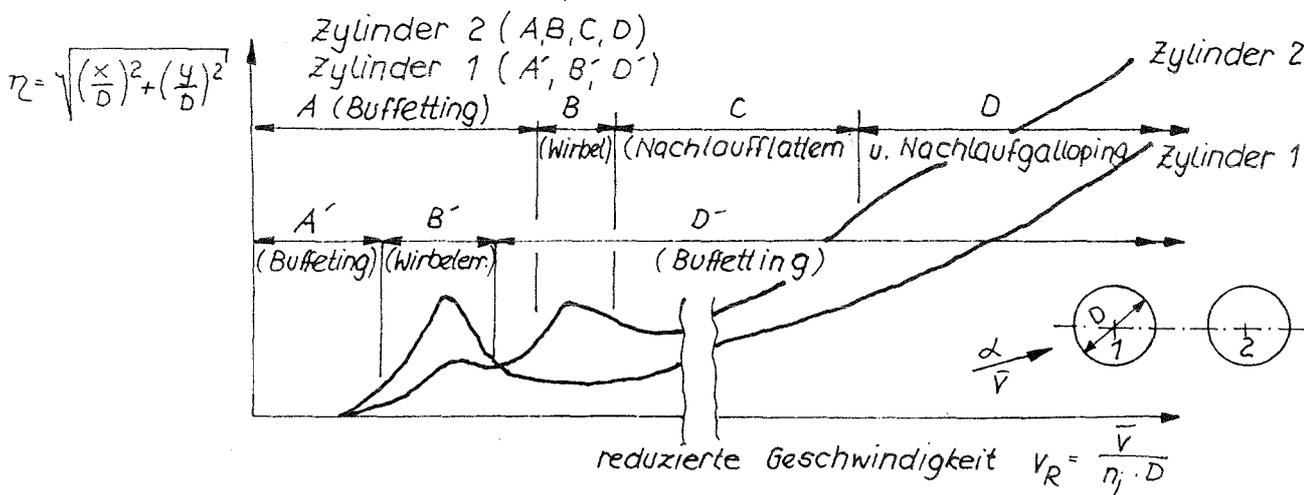
sind. Nachlauflattern und Nachlaufgalloping unterscheiden sich dadurch, daß im ersten Fall eine Kopplung zwischen zwei Schwingungsweisen (z.B. in Strömungsrichtung und quer zur Strömungsrichtung) erforderlich ist, um die Bewegung zu erhalten, wobei jede für sich selbst stabil ist. Diese Schwingungserscheinungen können selbstanlaufend sein oder einer Versetzung für den Start bedürfen.

3.1.4. Jet switching, andere Instabilität der Strömung (Jet switching):

Schwingung, die durch Instabilität der Strömung verursacht ist, wird im allgemeinen durch andere Störung ausgelöst, wie z.B. Buffeting oder mechanische Schwingungen. Gelingt es der Strömungsinstabilität, sich an diese Störung anzuschließen und entsprechende Schwankungskräfte des richtigen Vorzeichens zu schaffen, so wird die Schwingung aufrechterhalten. Der bekannteste Mechanismus dieses Typs ist das Jet-switching-Phänomen in einem Rohrbündel quer zur Strömungsrichtung. Diese Wirkung ist am ausgeprägtesten bei Bündeln, die sich aus dem Mehrfachen von jeweils vier Rohren zusammensetzen. Zwei Bereiche instabiler Strömung gibt es für Zylinderpaare: einen für nebeneinander angeordnete ($\alpha = 90^\circ$), Paare bei $1,25 < \frac{V}{D} < 2$ und einen für hintereinander angeordnete Paare ($\alpha = 0^\circ$).

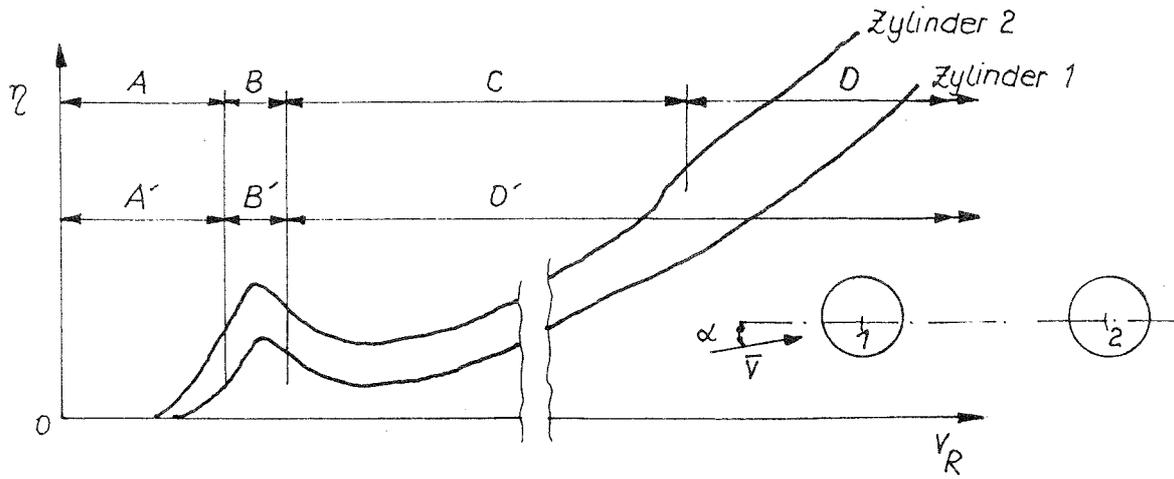
3.1.5. Die kombinierte Antwort:

- Engstehende Zylinder:



Schwingungsantwort bei engstehenden Zylindern

- Weit voneinander entfernt angeordnete Zylinder:



Schwingungsantwort bei weit auseinander stehenden Zylindern

3.2. Einflußparameter auf die Schwingungsantwort eines Zylinders in einer Gruppe

In der Tabelle sind in Frage kommende Parameter zusammengestellt.

Allgemeine Klasse der Parameter	Physikalische Menge oder Parameter	Dimensionslose Ähnlichkeitsparameter	Vgl. auch Abschn.
Strömungseigenschaften (Abschn. 3.2.1.)	Strömungsdichte ρ Strömungsviskosität ν Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} Geschwindigkeitsprofil $d\bar{v}/dz$ Strömungsturbulenz - Intensität, J_u - Maß r_{Lu}	$Re, \rho_s/\rho, (\text{oder } \frac{m_e}{\rho \cdot D^2}), \frac{m_e \cdot \rho_s}{\rho \cdot D^2}$	4.1. 3.2.2.
		Re, VR $\bar{\alpha}$ I_u r_{Lu}/D	
Zylindereigenschaften (Abschn. 3.2.2.)	Material Zylinderdichte ρ_s Zylindergeometriedurchmesser D - Länge o. Höhe H - Kegel ($D_{base} - D_{tip}$) - Oberflächenrauigkeit ϵ Zylindermassenverteilung $m(r)$ Zyl.steifeverteilung $k(r)$ Schwingungsformen - " - frequenzen n_j Generalisierte Masse pro Längeneinheit m_e Dämpfungsparameter c_{s_j} Antwortamplitude ∂_x, ∂_y	ρ_s/ρ $H/D, \epsilon/D, Re, VR, m_e \cdot \rho_s/(\rho \cdot D^2)$ H/D $(D_{base} - D_{tip})/H$ ϵ/D $\mu_j(r)$ VR $\frac{m_e}{\rho \cdot D^2}$ $\frac{m_e \cdot \rho_s}{\rho \cdot D^2}$ $\rho_s, \frac{m_e \cdot \rho_s}{\rho \cdot D^2}$ η_t	4.2.1. 4.2.1. 4.2.1. 4.2.1. 4.2.2. 4.2.2. 4.2.2. 3.2.4./ 4.2.2. 4.2.2. 4.2.3. 3.2.5.
		Gestaltungs-Zylinderabstand s - Strömungseinfall α Verhältnis-Zylinder \varnothing - Zylinderlänge - Zylindereigenfrequenzen Mechan. Kupplung Randblockade	s/D D_N/D_L H_N/H_L η_{jN}/η_{jL}

3.2.1. Strömungseigenschaften:

Obwohl bei Anordnung zutreffender Werte für die Reynoldsche Zahl sowie für die Stabilitätsparameter geringe Differenzen im Strömungsmaterial berechnet werden können, ist es gewöhnlich erstrebenswert, von Daten auszugehen, bei denen das Strömungsmaterial identisch ist.

Bei Anwendung zutreffender Daten für die Werte Re und V_R können die Auswirkungen von Unterschieden in der Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden; (V_R darf nicht bei $\nabla/(n_g \cdot D)$) liegen.

Die Auswirkung des Geschwindigkeitsprofils kann allgemein nicht berechnet werden. Die meisten Daten beziehen sich auf homogene Strömungen.

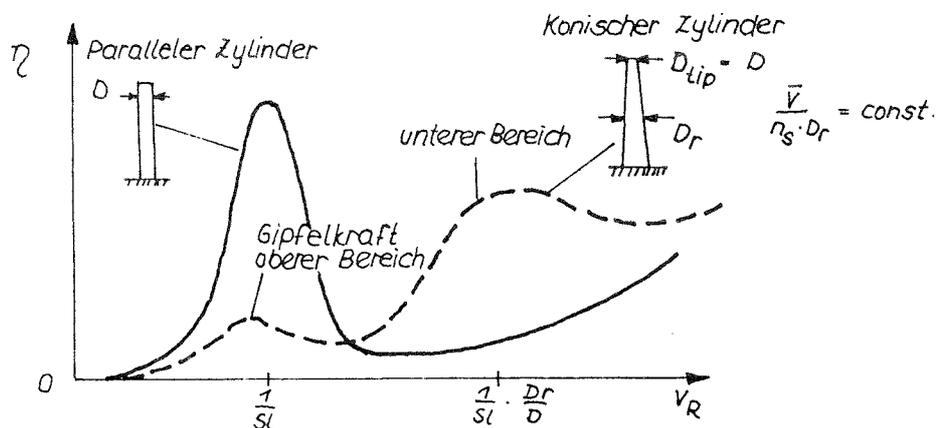
Die meisten zur Verfügung stehenden Daten beziehen sich auf Strömungen mit niedriger Turbulenz-Intensität. Höhere Turbulenz-Intensität erhöht jedoch die Schwingungsantwort. Die Turbulenz-Längenmaße sollten in demselben Verhältnis wie die konstruktiven Dimensionen gegeben werden.

3.2.2. Zylindereigenschaften:

Direkte Übereinstimmung hinsichtlich der benutzten Materialien und der Konstruktionsweise ist nicht wichtig - vorausgesetzt, die konstruktiven und Schwingungseigenschaften sind ordnungsgemäß bemessen bzw. berechnet (Oberfläche, Massenverteilung, Dämpfung). Die Zylinderdichte S_g ist ein Durchschnittswert über den gesamten Querschnitt.

Die Grundformen des Zylinders sollten identisch sein. Daten für zweidimensionale Strömungssituationen (Zylinder zwischen Endplatten mit $\frac{H}{D} > 4$ oder 5, auskragende Zylinder $\frac{H}{D} > 40$) geben für die entsprechenden dreidimensionalen Strömungssituationen nur eine qualitative Anleitung. Auskragende Zylinder, konische Zylinder sowie Zylinder in Scherströmungen befinden sich immer in dreidimensionalen Strömungssituationen. Bei $\frac{H}{D} < 8$ kann die Wirbelerregung unbedeutend werden. Der Rauchaustritt aus Schornsteingruppen erhöht das Seitenverhältnis einer Gruppe. Modellversuche ohne Berücksichtigung des Rauchaustrittes können die Wirbelerregung unterschätzen. Im allgemeinen ist die Wirbelerregung eines konischen Zylinders kleiner als die eines parallelen Zylinders mit dem Verhältnis H/D_{tip} . Bei einem Zylinder

mit sich stufenweise änderndem Durchmesser zeigt die Wirbel-
 erregung einen Gipfel, bei der kritischen Geschwindigkeit jedes
 Durchmessers. Da die Korrelation der Wirbelerregung auf die
 Länge eines jeden einzelnen Abschnittes mit gleichbleibendem
 Durchmesser beschränkt ist, wird die max. Wirbelerregung ver-
 mutlich niedriger liegen als bei einem Zylinder mit gleich-
 bleibendem Durchmesser. Die Oberflächenrauigkeit des Zylinders
 beeinflußt das Strömungsbild um den Zylinder herum. Ihre Wirkung
 kann über den Parameter λ_R (Abschnitt 3.2.3) quantifiziert
 werden.



Vergleich der Schwingungsantwort von parallelen u. konischen Einzelzylindern

Die Massen- und Steifigkeitsverteilungen sollten im Idealfall
 dieselben sein wie in der Datenquelle, da sie die Schwingungs-
 formen, die Eigenfrequenzen und die generalisierten Massen beein-
 flussen. Unter der Voraussetzung, daß das ordnungsgemäße Spektrum
 der reduzierten Geschwindigkeit v_R beachtet wird, sind Unter-
 schiede zwischen der Datenquelle und dem Anwendungsfall unbe-
 deutend.

Das Dämpfungsverhältnis ξ_s muß übereinstimmen. Dies ist besonders
 wichtig für aeroelastische Wirkungen wie Wirbelresonanzanregung
 oder Galloping, wo die Strömungskräfte von der Amplitude abhängen.
 Es ist weniger wichtig für Buffeting. Für periodische Kräfte ist
 die Antwort ungefähr proportional $1/\xi_s$. Für stochastische Last-
 wirkung ist die Antwort abhängig von ungefähr $\sqrt{1/\xi_s}$.

Bei Galloping, Flattern und Wirbelresonanzanregung (unterkritischer Bereich) sind die Strömungskräfte von der Größe der Amplitude abhängig. Die Dämpfung kann sich auch mit der Amplitude ändern.

3.2.3. Die dimensionslosen Gruppen (Ähnlichkeitszahlen):

Indirekt oder direkt drücken diese Gruppen die Wechselwirkung der Zylindereigenschaften mit der Strömung aus. Um Gleichwertigkeit zu erzielen, müssen diese Gruppen mit denen in der Datenquelle identisch sein.

Die effektive Reynoldszahl Re_e berücksichtigt auch Oberflächenrauigkeit und Strömungsturbulenz. Die meisten zur Verfügung stehenden Daten beziehen sich auf unterkritische Strömungen ($10^3 < Re_e < 3 \cdot 10^5$), die bei einzeln stehenden Zylindern größere Kräfte erzeugen als bei höheren Re_e -Werten, falls diese nicht besonders rau sind.

Bei Zylindern, die der freien Strömung ausgesetzt sind, kann die Strouhalzahl um 50 % höher sein als die in der unterkritischen Strömung gemessene Zahl. Dies kann zu einer Überschätzung der kritischen Windgeschwindigkeit führen.

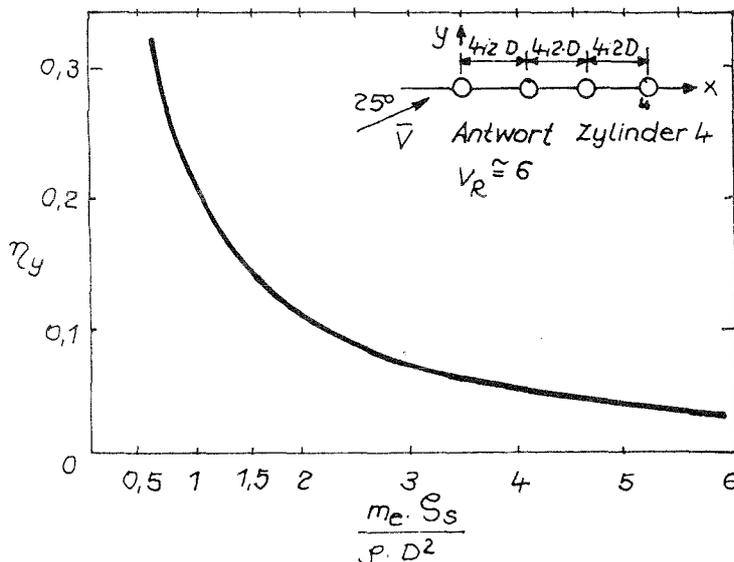
Das Dichteverhältnis ρ_s/ρ sollte identisch sein (bei kleinen Schwankungen unkritisch), um die richtige Beziehung zwischen Strömungskräften und Trägheitskräften zu sichern. Die folgende Tabelle enthält Vergleichswerte:

	in ruhiger Luft		in ruhigem Wasser		in fließendem Wasser $\bar{v} \approx 1 \text{ m/s}$	
	ρ_s/ρ	$\eta_j [\text{Hz}]$	ρ_s/ρ	$\eta_j [\text{Hz}]$	ρ_s/ρ	$\eta_j [\text{Hz}]$
Rohr aus Messing	$3,8 \cdot 10^3$	21,5	4,6	19,5	4,6	18,5
Rohr aus rostfreiem Stahl	$2,5 \cdot 10^3$	32,5	3,0	27,5	3,0	26,0

Eine 2. Form des Dichteverhältnisses ist $m_e/(\rho \cdot D^2)$.

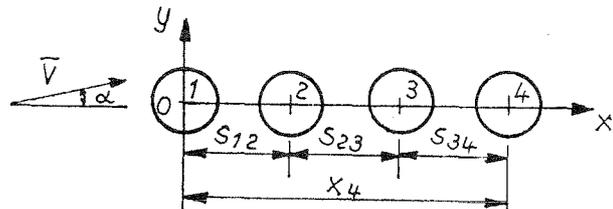
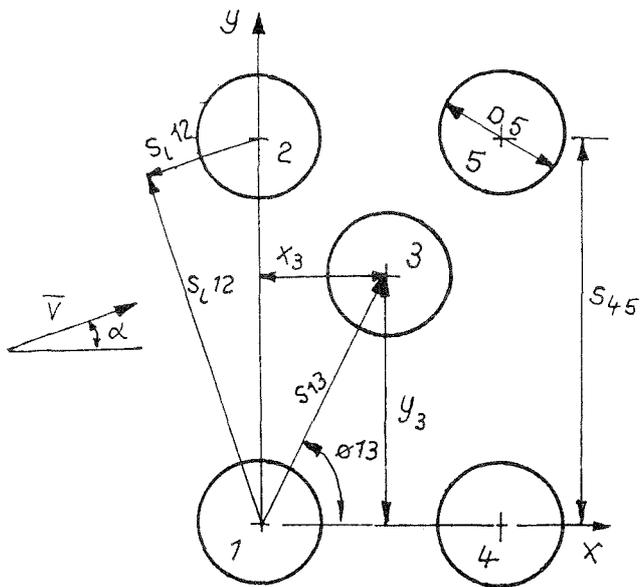
Die reduzierte Geschwindigkeit V_R ist bedeutungsvoll bei Wirbelresonanzanregungen, die nur über enge Bereiche $\frac{\bar{V}}{n_j \cdot D}$ mit dem Mittelwert $\frac{\bar{V}}{n_s \cdot D}$ wirkt. Die Benutzung von V_R gestattet die Festlegung der Geschwindigkeit \bar{V} und der Eigenfrequenz n_j . Für reduzierte Geschwindigkeiten in den Bereichen 1-10 bei parallelen Zylindern und 2-15 bei konischen Zylindern (Steigung bis zu 5 D) bewirkt der Gipfel der Wirbelerregung generell das Maximum der Schwingungsamplitude. Bei höheren reduzierten Geschwindigkeiten wird Nachlauf-Buffering der nachgeordneten Zylinder gewöhnlich stärker. Bei größeren Abständen wird Nachlaufklappen bzw. Nachlaufgalloping bedeutsam.

Der Stabilitäts- oder Massendämpfungsparameter zeigt die dynamische Ähnlichkeit der Schwingungssysteme in der Strömung an, wenn der Einfluß der Strömungskraft in Phase mit der Bewegung so klein ist, daß Veränderungen der Schwingungsfrequenz durch Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit unwesentlich sind. Dies ist in vielen praktischen Fällen besonders bei großen $\rho s/\rho$ der Fall. Im Bild ist der Einfluß des Stabilitätsparameters dargestellt. Hier wurde die Auswirkung von ξ_s bei gleichbleibendem m_e bzw. m_e bei gleichbleibendem ξ_s getestet.

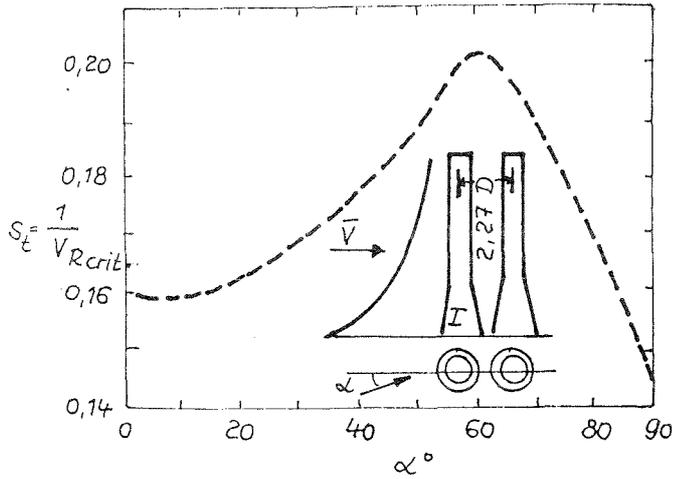


3.2.4c. Zylindergruppeneigenschaften:

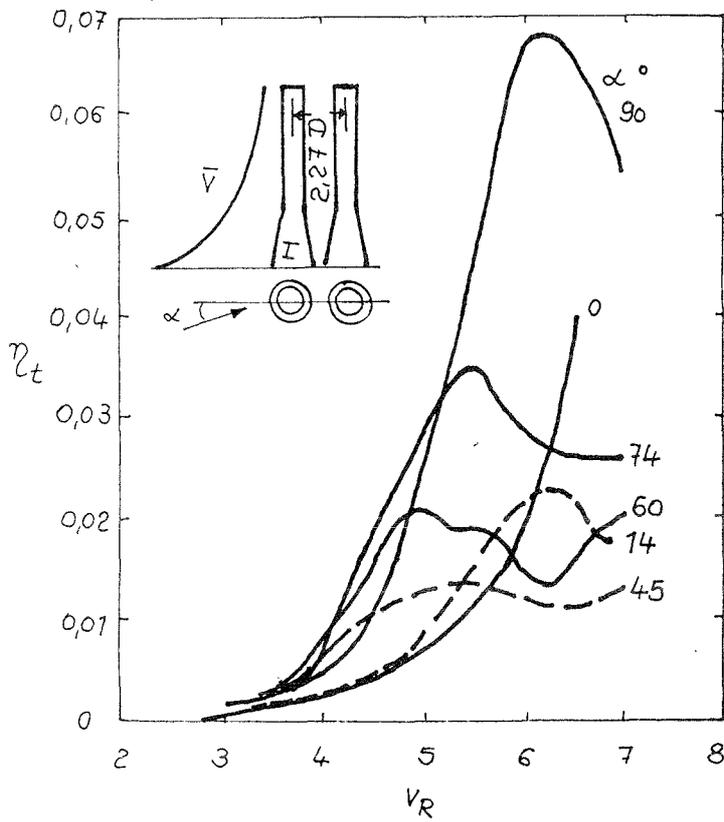
Auf dem Bild sind die vorgegebenen Bezeichnungen enthalten. Bei einzelnen Reihen von Zylindern wird das Abstandsverhältnis s/D sowie α als Kennwert benutzt.



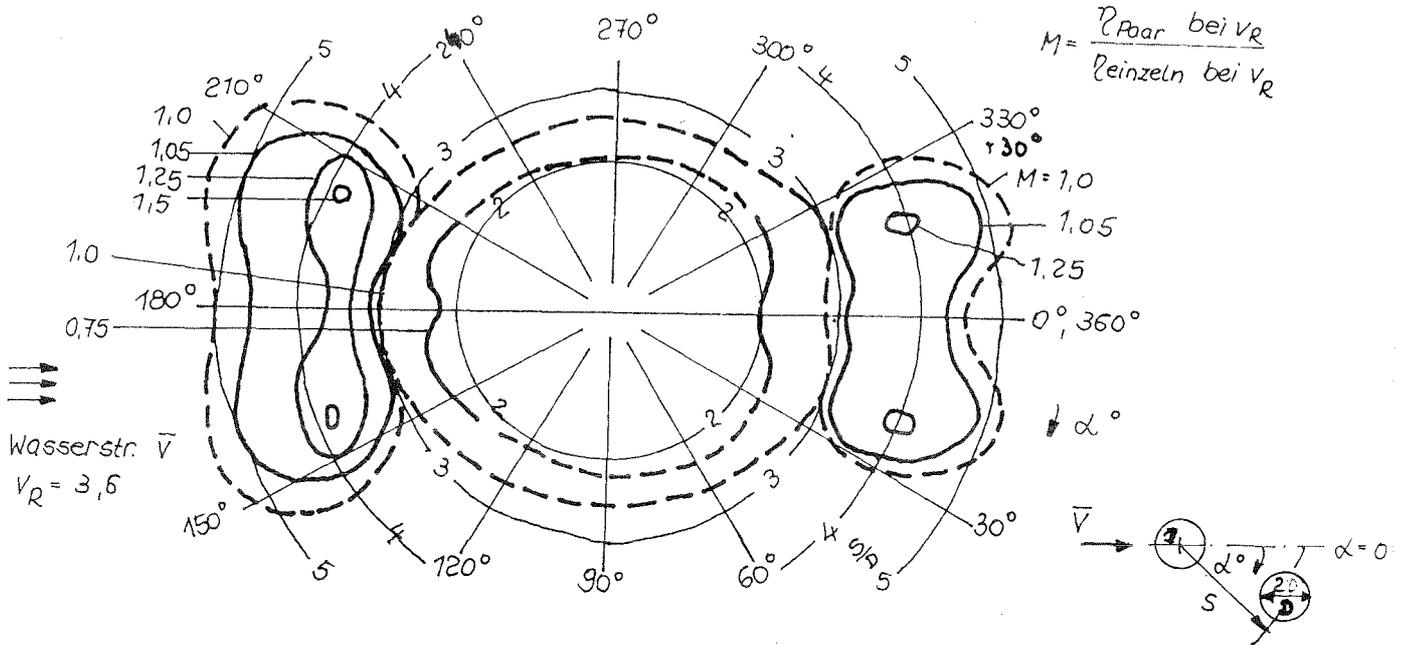
Eine Zylindergruppe tendiert dazu, sich wie ein geschlossenes Objekt zu verhalten bei Abständen $\leq 1,25 \cdot D$. Dann gibt es nur einen Nachlauf und eine Wirbelresonanzanordnung mit einer Strouhalzahl, die eher auf die Querströmung der Gruppe als auf den Durchmesser eines einzelnen Zylinders bezogen ist.



Strouhalzahl
für Zylinder I
eines Paares



Wirbelresonanz-
anregung
für
Zylinder I



**Vergrößerung (Magnification) der Antwort für Zylinder I
(in vorgeordneter u. nachgeordneter Richtung)**

Die Daten für Zylinderpaare zeigen, daß das absolute Maximum der Wirbelresonanzanregung beim nachgeordneten Zylinder bei Abständen $\frac{s}{D} = 3, \dots, 6$ (geht von D bei konischen Zylindern in einer Höhe $r = \frac{2}{3} H$ aus) und Anströmwinkel $\alpha = 12, \dots, 25^\circ$ liegen.

Die Daten lassen vermuten, daß durch Hinzufügung eines 3. Zylinders die Wirbelresonanzanregung der beiden vorgeordneten Zylinder nicht drastisch erhöht wird. Der 3. Zylinder erfährt jedoch ein weit höheres Maximum. Ein 4. Zylinder erhöht die Schwingungsantwort des 3. Zylinders. Seine eigene Erregung war in der gleichen Größenordnung. Im Gegensatz zu den Daten für Zylinderpaare lassen die Daten für längere Reihen vermuten, daß der Gipfel der Beanspruchung bei $\alpha = 0^\circ$ liegt.

Eine "mechanische Kopplung" zwischen in einer Gruppe angeordneten Zylindern kann absichtlich vorgenommen werden (siehe Abschnitt 4.3.). Sie kann jedoch auch durch die Halterung der Modellzylinder erfolgen.

Für Gruppen von Zylindern, bei denen die Gruppe einen erheblichen Teil des Kanalquerschnitts einnimmt, kann ein "Blockade-Effekt" wichtig sein.

In den meisten Fällen, in denen für freistehende Zylinder (wie Schornsteingruppen) Modellversuche im Windkanal durchgeführt worden sind, wurde die Blockade so niedrig gehalten, daß sie als unwichtig betrachtet werden konnte.

Chen, S. S.: Flow -Induced vibration of circular cylindrical structures, Springer-Verlag, Berlin 1987

Dieses Buch enthält wichtige Aussagen über die Ergebnisse der langjährigen Forschung über den Strömungsnachlauf und die Wirkungen am Kreiszyylinder. Es enthält die Forschungsergebnisse der Argonne National Laboratory für das Flow-Induced vibration Progam (besteht seit 1967). Die Strömungcharakteristik hängt ab von der Reynoldszahl. Fig. 7.1, 7.2 und Table 7.1 zeigen die einzelnen identifizierbaren Bereiche.

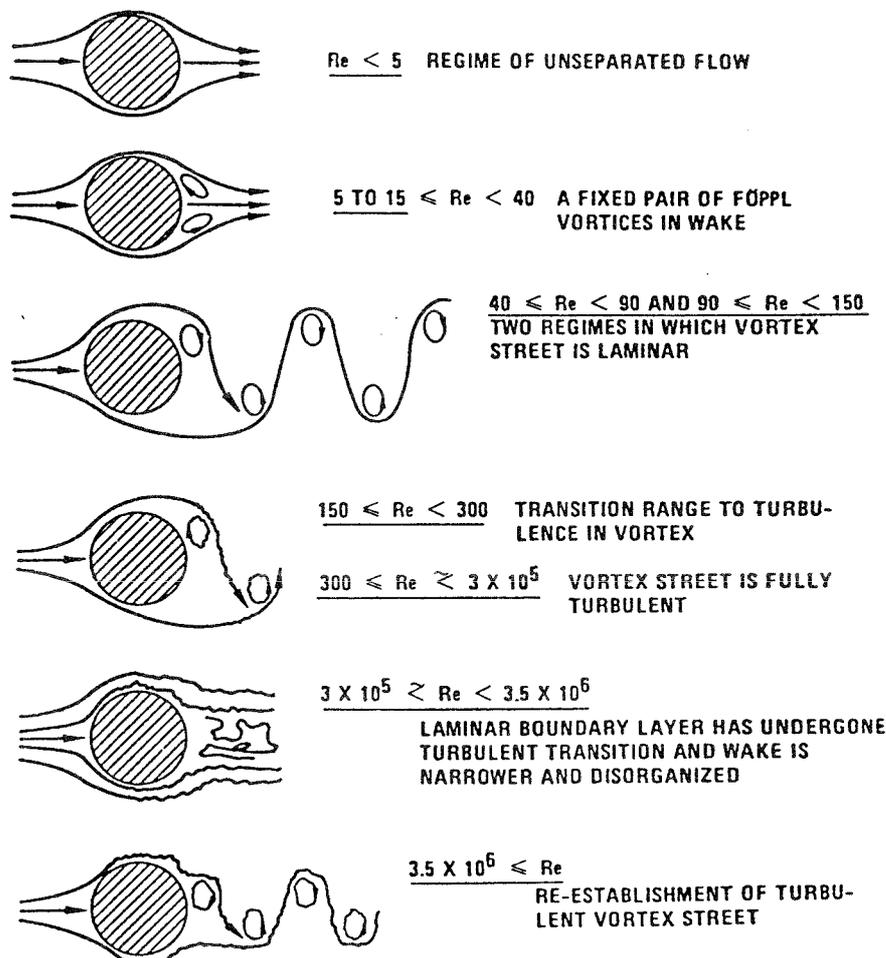


FIGURE 7.1. Regimes of flow across a circular cylinder (from Shin and Wambsganss 1977; original source from Lienhard 1966)

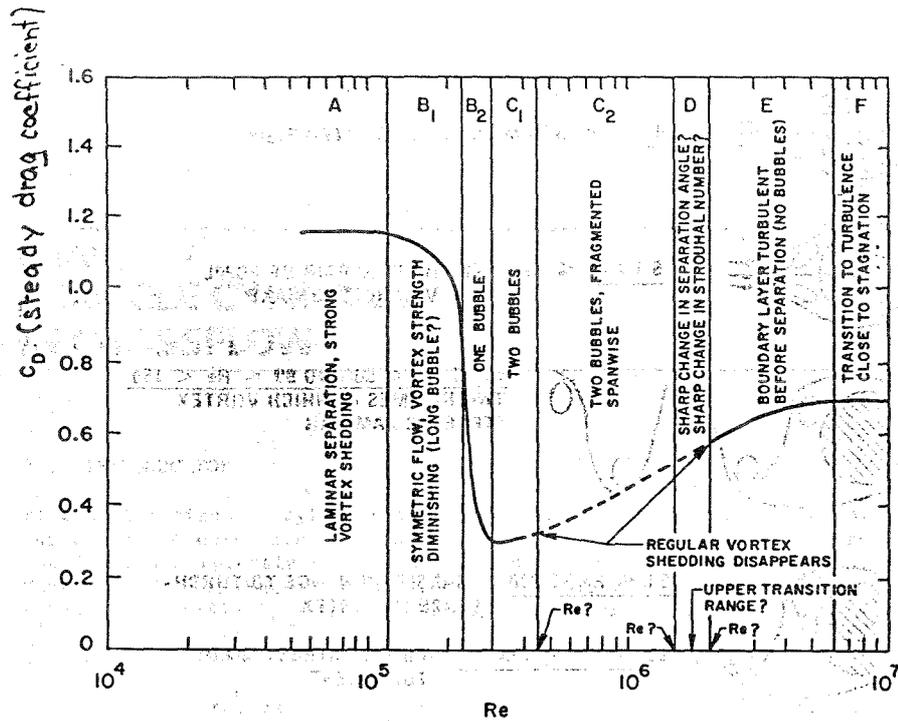


FIGURE 7.2. Flow regimes (from Farrell 1981, with permission--see Credits)

TABLE 7.1. Terminology According to Various Authors for Ranges Defined in Fig. 7.2*

AUTHOR	RANGE							
	A	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D	E	F
ROSHKO (1961)	← SUBCRITICAL →	← TRANSITION RANGE (LOWER TRANSITION) →			← SUPERCRITICAL →		← TRANSCRITICAL →	
ACHENBACH (1968)				← CRITICAL →	← SUPERCRITICAL →			
ACHENBACH (1975)	← SUBCRITICAL →	← CRITICAL →			← SUPERCRITICAL →		← TRANSCRITICAL →	
GUVEN ex al (1980)	← SUBCRITICAL →			← CRITICAL →		← SUPERCRITICAL →		← TRANSCRIT →
BEARMAN (1969)	← SUBCRITICAL →	← CRITICAL →			← SUPERCRITICAL →		← TRANSCRITICAL →	
SZECHENYI (1975)	← SUBCRITICAL →				← TRANSCRITICAL →		← SUPERCRITICAL →	
SACHS (1978)	← SUBCRITICAL →			← SUPERCRITICAL →			← ULTRACRITICAL →	
FARELL (1981)	← SUBCRITICAL →	← TRANSITION RANGE (LOWER TRANSITION) →			← SUPERCRITICAL →		← POSTCRITICAL (ULTRACRITICAL) →	
						← UPPER TRANSITION RANGE →		← ULTIMATE →

* From Farrell (1981), with permission--see Credits.

1. Einzellylinder

Das Querschwingungsverhalten des Einzellinders ist eines der am meisten untersuchten Probleme der Strömungsmechanik. Es sind aber trotzdem noch Interaktionsbeziehungen zwischen Zylinderbewegungen und Strömungsverhältnissen ungelöst.

Bei gleichmäßigem Luftstrom ist die Wirbelablösefrequenz eines einzelnen Zylinders abhängig von der Strouhalzahl. Die Strouhalzahl ist ungefähr konstant bei 0,2 im unterkritischen Reynoldszahlbereich ($300 < Re < 2 \cdot 10^5$). Bei $Re > 3,5 \cdot 10^5$ vergrößert sich die Strouhalzahl in Abhängigkeit von der Turbulenzintensität.

Aussagen zur Wirbelablösefrequenz in diesem Bereich sind schwierig. Bei $Re > 3,5 \cdot 10^6$ bleibt die Strouhalzahl wieder einigermaßen konstant. Bild 7.5 zeigt den Verlauf der Strouhalzahl in Abhängigkeit von der Reynoldszahl.

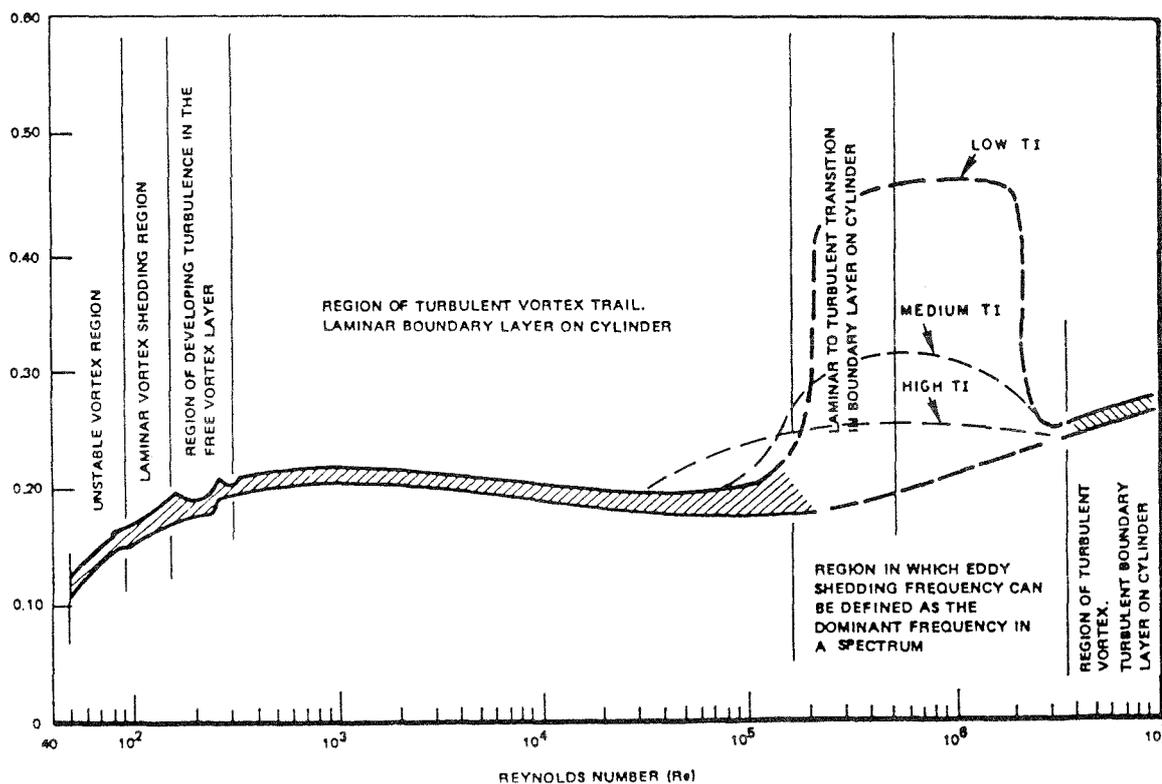


FIGURE 7.5. Envelope of Strouhal/Reynolds number relationship for Circular Cylinders (Shin and Wambsganss 1977 and Jendrzejczyk and Chen 1985)

Interessante Aussagen zum aerodynamischen Erregerkraftbeiwert (lift coefficient) sind in Bild 7.8 dargestellt. Bei Amplituden über dem 0,5-fachen Durchmesser tritt eine Senkung des Beiwertes ein, der bei Amplituden von 1,5 bis 2-fach des Durchmessers den Wert Null erreicht.

Die Wirbel werden erzeugt in Zellen von stationären Zylindern. Die Länge von einer Zelle wird Korrelationslänge genannt. Die Korrelationslänge hängt ab von der Reynoldszahl, der Turbulenz, dem Längen-Durchmesser-Verhältnis, der Oberflächenrauigkeit und der Auslenkung. Typische Resultate sind in Tab.7.4. zusammengestellt.

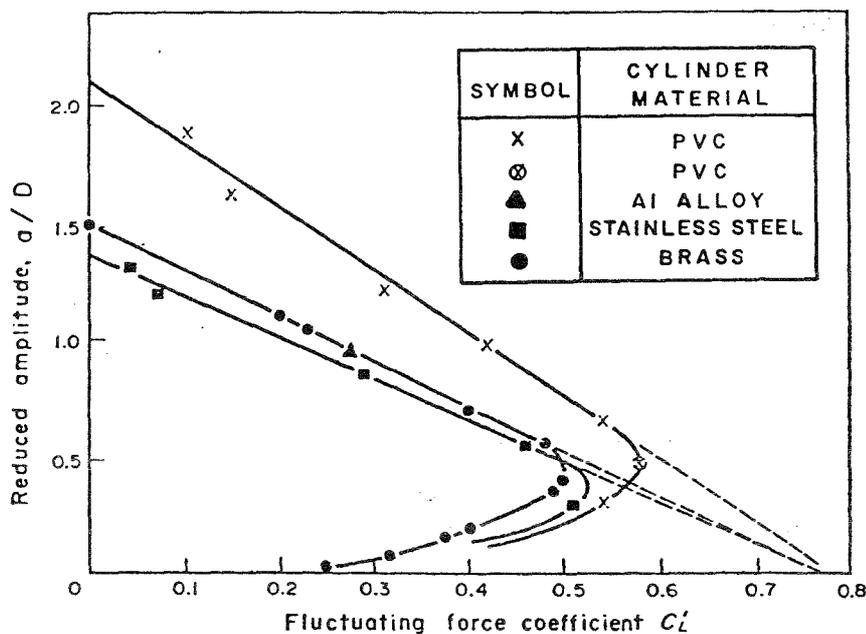


FIGURE 7.8. Fluctuating lift coefficients versus amplitudes of oscillation (from King 1977a, with permission--see Credits)

TABLE 7.4. Correlation Lengths and Reynolds Numbers of Smooth Cylinders*

Reynolds number	Correlation length	Source
$40 < Re < 150$	15D-20D	Gerlach and Dodge (1970)
$150 < Re < 10^5$	2D-3D	Gerlach and Dodge (1970)
$1.1 \times 10^4 < Re < 4.5 \times 10^4$	3D-6D	El-Baroudi (1960)
$\geq 10^5$	0.5D	Gerlach and Dodge (1970)
2×10^5	1.56D	Humphreys (1960)

*From King (1977a), with permission--see Credits.

Der transkritische Reynoldszahlbereich ist in Modellversuchen nur in geringem Umfang untersucht worden. Sehr gute experimentelle Untersuchungen wurden von Schewe durchgeführt. Bild 7.11 stellt den Druckbeiwert in Anströmrichtung c_D , den Querschwingungsbeiwert c_i und die Strouhalzahl St dar. Bild 7.12 enthält die Frequenzspektren des Querschwingungsbeiwertes bei verschiedenen Reynoldszahlen. Die Sprünge von c_D und St im Bild 7.11 bei $Re \approx 3,5 \cdot 10^5$ zeigen den Übergang vom unterkritischen Bereich zum überkritischen Bereich. Der Sprung bei der Strouhalzahl zeigt den Übergang vom überkritischen zum transkritischen Bereich.

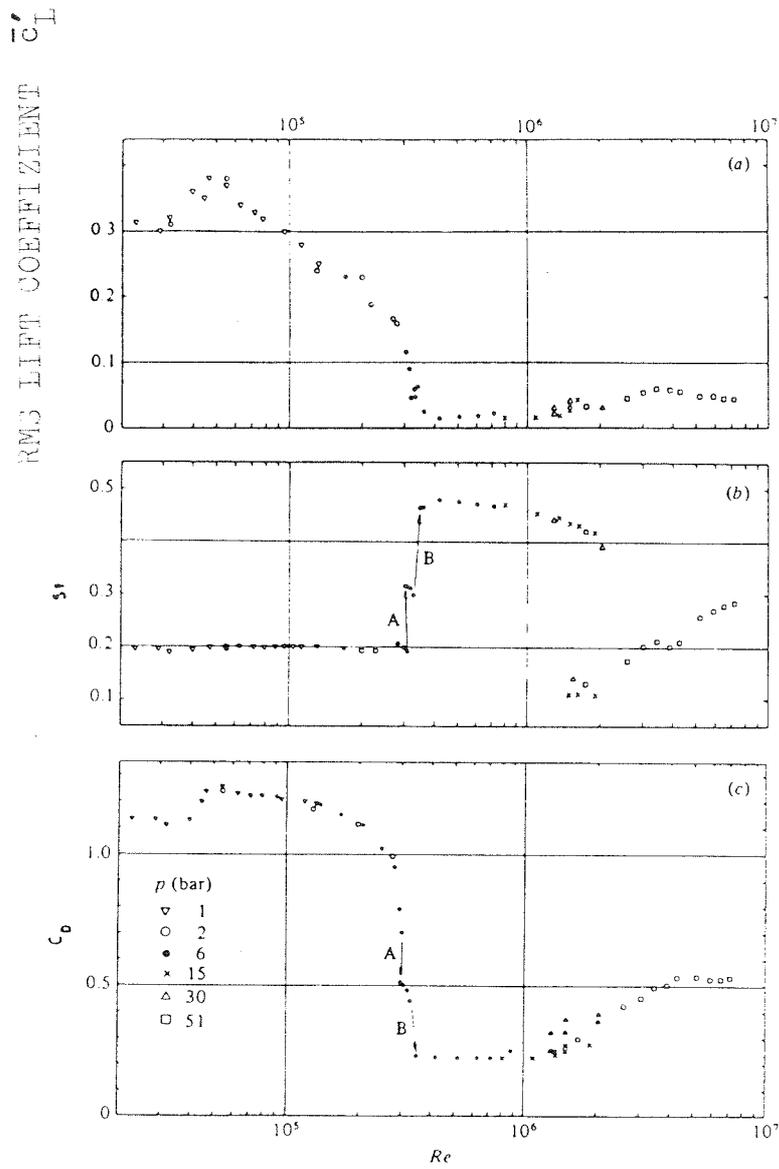


FIGURE 7.11. RMS lift coefficient, Strouhal number and steady drag coefficient at high Reynolds numbers (from Schewe 1983, with permission--see Credits)

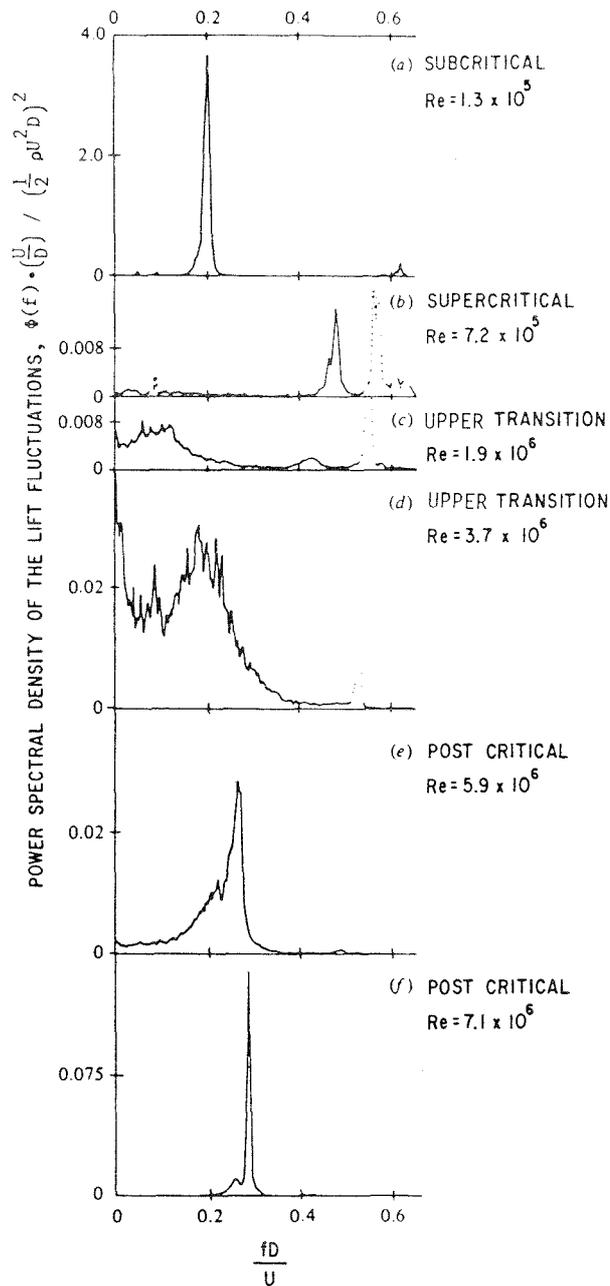


FIGURE 7.12. Power spectra of the lift fluctuations at various Reynolds numbers (from Schewe 1983, with permission--see Credits)

Tabelle 7.3 enthält eine Zusammenstellung von experimentellen Meßwerten der Beiwerte in und quer zur Anströmrichtung, sowie der zugrunde liegenden Reynoldszahlen.

TABLE 7.3. Collected Experimental Data from Various Sources--Fluctuating Force Coefficients as a function of Reynolds Numbers*

Source	RMS Fluctuating Lift Coefficient (\bar{C}'_L)	Ratio (\bar{C}'_L/\bar{C}'_D)	Reynolds Number Range
Jones (1968)	0.08		0.4×10^6 - 1.9×10^7
McGregor (1957)	0.60	10	4.3×10^4 - 1.3×10^5
Surry (1969)	0.60	2.5-10	4.4×10^4
Bishop and Hassan (1964)	0.60	10	3.6×10^3 - 1.1×10^4
Ruedy (1935)	0.93		Approx. 10^5
Woodruff and Kozak (1958)	0.65		0.2×10^6
Vickery and Watkins (1962)	0.78		10^4
King (1974)	0.78	5.7-10	4×10^4
Fung (1958)	0.20-0.30	10	0.2×10^6
Glenny (1966)		3	0.2×10^6
Keefe (1961)	0.43	10	4×10^4 - 10^5
Humphreys (1960)	0.30-1.35		3×10^5 - 5×10^5
Phillips (1956)	0.75		200
Schwabe (1935)	0.45		Approx. 700
Protos et al. (1968)	0.30		4.5×10^4

*From King (1977a), with permission--see Credits.

2. Querschwingungsverhalten von zwei Zylindern in Reihenanordnung

Das Gebiet von zwei steifen, schwingungsempfindlichen Zylindern ist gut untersucht worden. Ist jedoch einer der Zylinder elastisch und schwingt, dann treten Schwierigkeiten auf.

Die Strouhalzahlen hängen von der Reynoldszahl ab. Bild 9.12 zeigt die Strouhalzahlen für zwei Zylinder in Tandemanordnung. Im Allgemeinen sind die Wirbelfrequenzen hinter beiden Zylindern unterschiedlich.

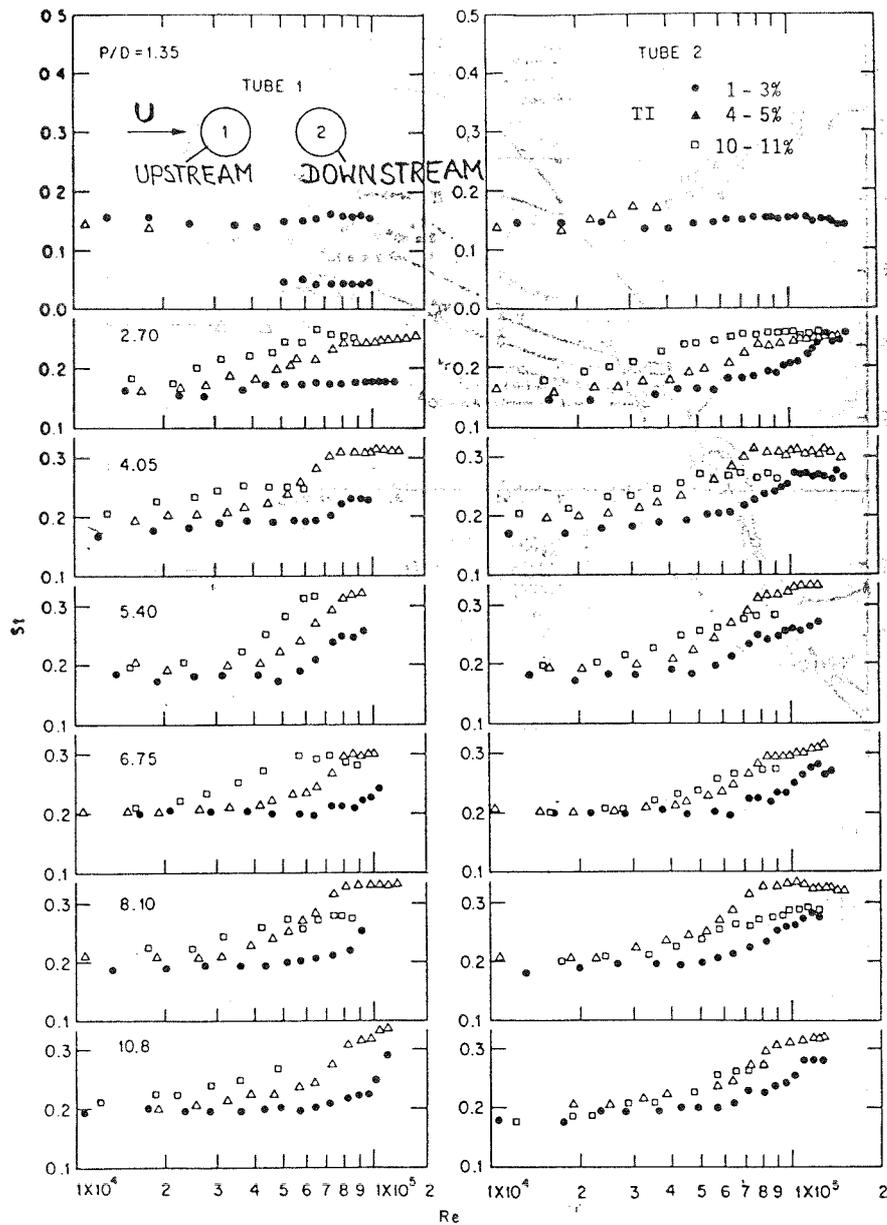


FIGURE 9.12. Strouhal number for two cylinders in tandem (Jendrzejczyk and Chen 1986). Einzelzylinder $St \sim 0.2$

Auf den Bildern 9.16 und 9.17 ist der Querschwingungsbeiwert für verschiedene Turbulenzintensitäten und Abstandsverhältnisse in Abhängigkeit von der Reynoldszahl dargestellt.

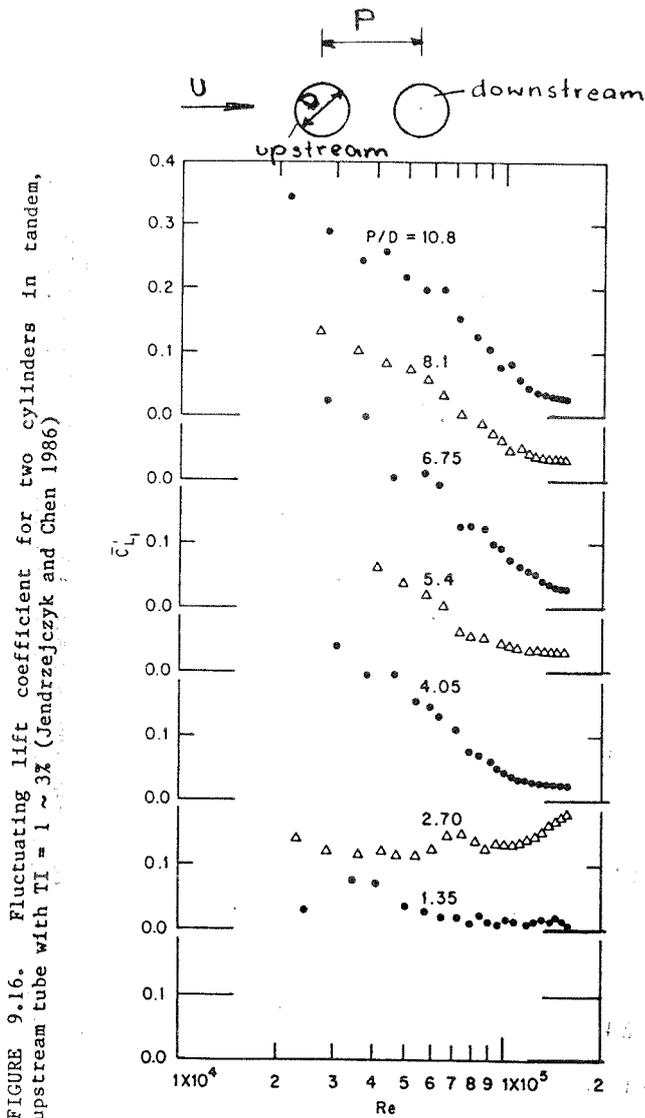
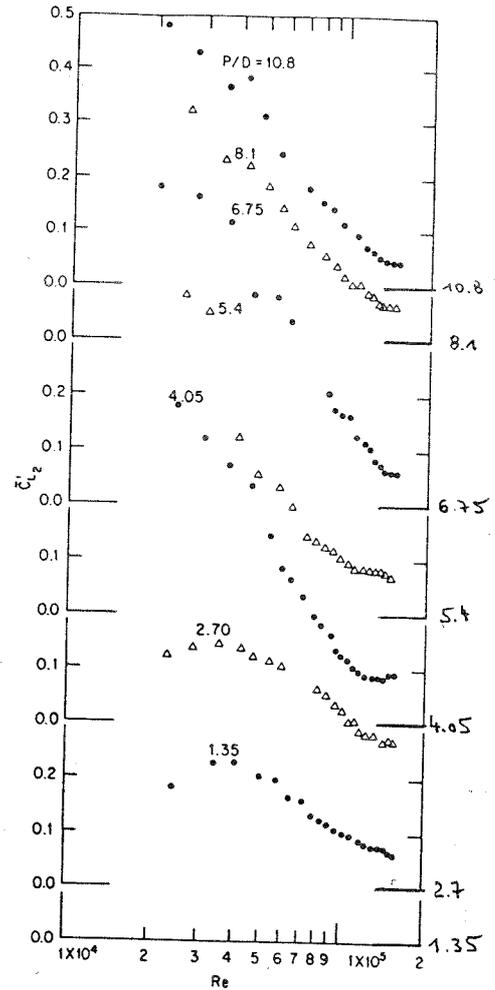


FIGURE 9.16. Fluctuating lift coefficient for two cylinders in tandem, upstream tube with $TI = 1 \sim 3\%$ (Jendrzejczyk and Chen 1986)

FIGURE 9.17. Fluctuating lift coefficient for two cylinders in tandem, downstream tube with $TI = 1 \sim 3\%$ (Jendrzejczyk and Chen 1986)



Das Gebiet des Schwingungsverhaltens zweier Zylinder ist sehr komplex. Es hängt ab von der Reynoldszahl, der Zylinderanordnung und den upstream Strömungsverhältnissen. Die Interaktionsbeziehungen zwischen Strömungsverhältnissen und Zylinderschwingungen ist schwer zu erfassen. Die Erregermechanismen können klassifiziert werden als Wirbelablösung, Buffeting und strömungselastische Instabilitäten.

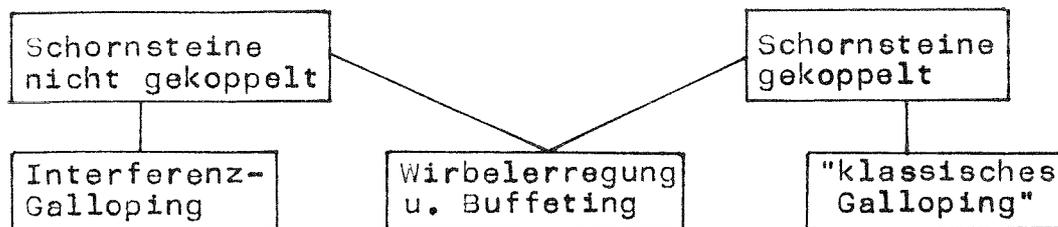
Es gibt keine allgemeinen Verfahren zur Berechnung des Querschwingungsverhaltens von zwei Zylindern. Die meisten experimentellen Ergebnisse liegen für spezielle Anwendungsfälle vor. Die Mehrzahl der Untersuchungen wurden im unterkritischen Reynoldszahlbereich durchgeführt. In der Praxis liegen sehr oft Reynoldszahlen im transkritischen Bereich vor.

Ruscheweyh, H.:

Winderregte Schwingungen von Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung

VDI-Bericht 419; Wind- und erdbebenerregte Schwingungen von Bauwerken (Tagung Hannover 1981)

Nach der Art der Erregermechanismen kann bei winderregten Schwingungen an Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung folgende Einteilung getroffen werden:



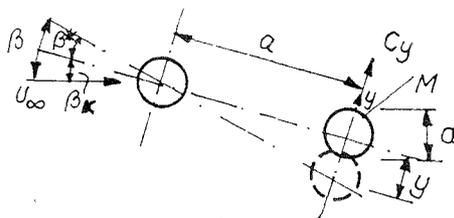
Das Interferenzgalloping tritt bei nicht gekoppelten, engstehenden Kaminen auf und ist gekennzeichnet durch gegenphasige Schwingungen zweier Schornsteine untereinander, die einen periodischen Wechsel des Strömungszustandes im Takte der Schwingfrequenz bewirken. Wirbelresonanzregung tritt sowohl für die nicht gekoppelten als auch für die gekoppelten Systeme auf. Die Erregerkräfte und die kritische Windgeschwindigkeit werden insbesondere durch das Abstandsverhältnis der Schornsteine modifiziert. Bei großen Abständen tritt darüber hinaus ein erhöhtes Buffeting auf, was sowohl die stochastischen Reaktionen verstärken als auch resonanzartige Schwingungen hervorrufen kann. Durch mechanische Kopplung der Schornsteine ist das Interferenzgalloping zu vermeiden; dafür kann aber "klassisches Galloping" auftreten. Es wird dadurch hervorgerufen, daß der gekoppelte Querschnitt aerodynamisch nicht mehr rotationssymmetrisch ist und negative Seitenkraftgradienten entstehen können. Die Vorausberechnung der dynamischen Antwort von Schornsteinen in Reihen- oder Gruppenanordnung ist ohne Kenntnis aerodynamische Daten nicht möglich. Diese Daten können nur aus Experimenten gewonnen werden. Die meisten dieser Versuche sind im Windkanal an Modellen mit entsprechend kleiner Reynoldszahl durchgeführt worden. Die Übertragbarkeit auf Originalschornsteine ist daher nicht ganz unproblematisch. Beobachtungen an ausgeführten Anlagen zeigen jedoch, daß die bisher im Modellversuch gefundenen Werte

einigermaßen bestätigt werden.

Interferenzgalloping

Stehen zwei Kamine sehr eng beieinander, beobachtet man unter bestimmten Randbedingungen das Einsetzen heftiger Schwingungen quer zum Wind. Diese Schwingungen beginnen bei einer bestimmten Einsetzgeschwindigkeit und nehmen mit zunehmender Windgeschwindigkeit monoton zu. Bei abnehmender Windgeschwindigkeit tritt häufig eine Hysterese dergestalt auf, daß die Schwingung erst bei kleinerer Geschwindigkeit wieder zu Null wird. Das gesamte Schwingungsverhalten ähnelt dem Galloping, hat aber grundlegend andere Ursachen.

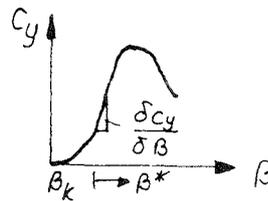
Für das Interferenzgalloping-Phänomen läßt sich wie für das klassische Galloping eine kritische Einsetzgeschwindigkeit ableiten:



$$\beta = \beta_k + \beta^*$$

$$\operatorname{tg} \beta^* = -\frac{y}{a}$$

$$\beta_0 = \operatorname{tg} \beta_0 = -\frac{y_0}{a}$$



$$C_{y_0} = \left. \frac{\delta C_y}{\delta \beta} \right|_{\beta_0} \cdot \beta_0^*$$

$$= -\frac{\delta C_y}{\delta \beta} \cdot \frac{y_0}{d}$$

$$F_y = C_y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot d$$

Das Interferenzgalloping kann nur bei positivem $\partial C_y / \partial \beta$ stattfinden. Dadurch unterscheidet sich das Interferenzgalloping vom "klassischen Galloping", wo das Instabilitätskriterium negativ ist.

$$u_0 = 3,54 \cdot f_e \cdot d \cdot \sqrt{\frac{M_s}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{a/d}{-\left. \frac{\partial C_y}{\partial \beta} \right|_{\beta_0} \cdot \sin \Theta}}$$

Massendämpfungsparameter $M_{\delta} = \frac{2 \cdot M \cdot \delta}{\rho \cdot d^2}$

$\frac{\partial c_y}{\partial \beta}$ verringert sich mit zunehmendem Abstandsverhältnis $\frac{a}{d}$.
 Dadurch treten schnell Werte für die Einsetzgeschwindigkeit auf, die oberhalb der Auftretenswahrscheinlichkeit der Windgeschwindigkeit liegen. Nach bisherigen Erfahrungen ist bei Abstandsverhältnissen $\frac{a}{d} > 3$ in der Praxis nicht mehr mit Interferenzgalloping zu rechnen.

Interferenzgalloping kann auch bei einer ungekoppelten Dreier- oder Vierer-Kamingruppe auftreten, wenn mindestens zwei Kamine unter dem kritischen Winkel angeströmt werden.

Wirbelerregte Schwingungen

Der Wirbelmechanismus und der aerodynamische Rückkopplungseffekt sind bei Reihenanordnungen erheblich verwickelter als beim Einzelkamin. Ein theoretisches Modell, ähnlich wie die Oszillatormodelle für den schwingenden Zylinder, ist ohne nähere Einsichten in den physikalischen Vorgang nicht zu erstellen.

Hier wird auf einen einfachen Ansatz zurückgegriffen:

$$\frac{y_0}{d} = I \cdot \frac{\tilde{c}_y}{M_{\delta}} \cdot u_{r \text{ krit}}^2$$

Darin bedeuten:

y_0 = Schwingamplitude an der Spitze

$$\tilde{c}_y = \frac{\int_0^l \tilde{c}_y(z) \cdot \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz}{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz} = \text{generalisierter Erregerkraftbeiwert}$$

$$u_{r \text{ krit}} = \left(\frac{u_{\infty}}{f \cdot d}\right)_{\text{krit}} = \text{reduzierte Geschwindigkeit bei max. Schwingungsamplitude}$$

M_δ = Massendämpfungsparameter

$$M = \frac{\int_0^l m(z) \cdot \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz}{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz} = \text{generalisierte Masse pro Länge}$$

δ = log. Dekrement der Dämpfung

ρ = Luftdichte

d = Schornsteindurchmesser

$y(z)$ = Schwingungsform

$$I = \frac{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz}{4 \cdot \pi \cdot \int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz} = \text{Konstante, die von der Schwingungsform abhängt (für Grundschwingungsformen } \approx 0,13)$$

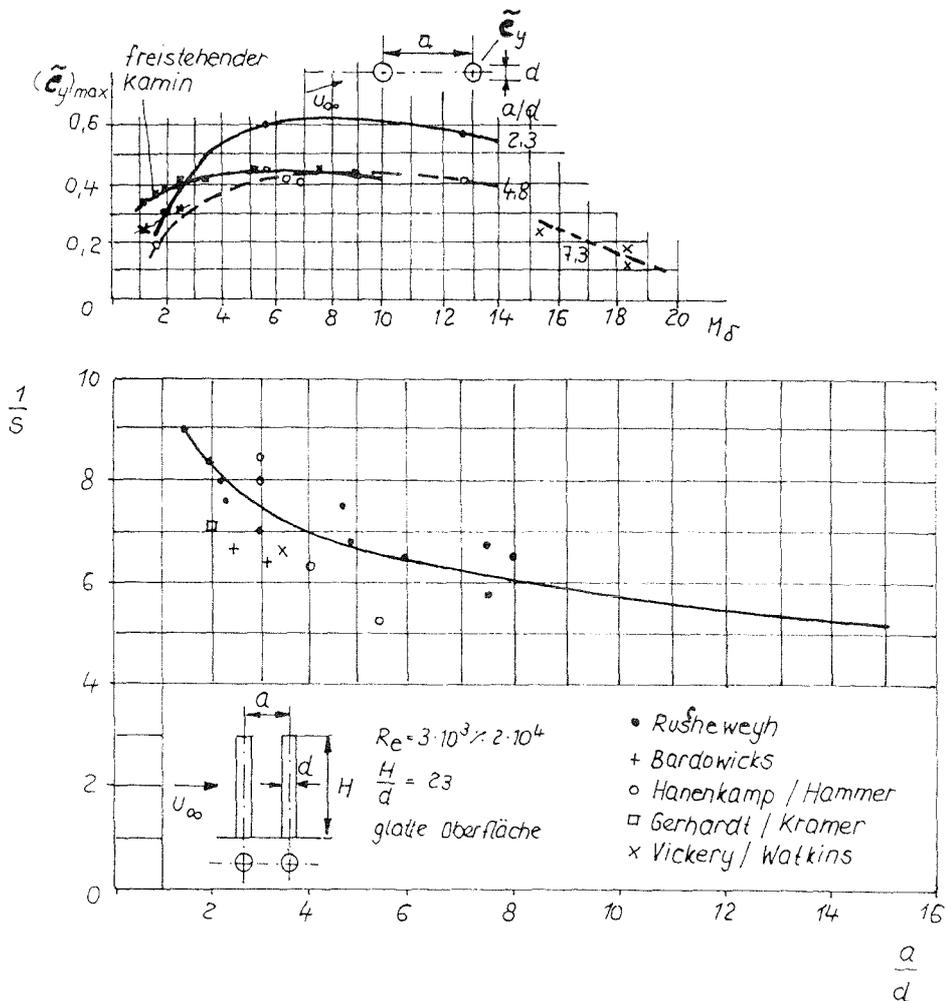
Die Interferenzeinflüsse auf die Wirbelresonanzschwingung werden in dem aerodynamischen Erregerkraftbeiwert \tilde{c}_y und der kritischen reduzierten Geschwindigkeit $U_r \text{ krit}$ erfaßt und müssen experimentell ermittelt werden.

Ergebnisse an Modellversuchen

Vom Autor wurden Zweier-Anordnungen intensiv behandelt, wobei das Interferenzgalloping entdeckt wurde. Es wurden auch fünf Schornsteine mit großem Abstandsverhältnis untersucht und es konnten die Grenzen der Wirksamkeit von aerodynamischen Maßnahmen aufgezeigt werden. Vickery/Watkins zeigten, daß bei einer Reihenanordnung von vier Kaminen mit dem Abstandsverhältnis $a/d = 4,2$ der hinterste Kamin die größten Schwingungen zeigt und die kritische Anströmrichtung zur Längsachse der Reihe ca. 28° beträgt. Den Modellversuchen gemeinsam ist jedoch, daß alle Versuche an elastischen Schornsteinmodellen bei unterkritischer Reynoldszahl durchgeführt wurden. Für die Übertragbarkeit auf Originalschornsteine bedeutet das, daß die Erregerkraftbeiwerte der Wirbelerregung gegenüber dem transkritischen Reynoldszahlenbereich zu hoch liegen. Der überkritische Bereich

mit seinen naturgemäß kleinen Beiwerten wird nicht abgedeckt. Er spielt aber in der Praxis eine weniger große Rolle, zumal die Abgrenzung zum unterkritischen u. transkritischen Bereich wegen der Rauigkeits- u. Turbulenzeinflüsse ohnehin schwierig ist.

Für praktische Vorausberechnungen der Schwingungen von in Reihe stehenden Kaminen sind die Angaben von Strouhalzahlen, Erregerkraftbeiwerten u. kombiniertem Instabilitätsmaß erforderlich. Mit enger werdendem Abstand steigt der Kehrwert der Strouhalzahl und damit die kritische Windgeschwindigkeit an. Die Erregerkraftbeiwerte werden teilweise kleiner, teilweise größer als die des freistehenden Kamin und hängen sowohl vom Massendämpfungsparameter als auch vom Abstandsverhältnis ab.



Ruscheweyh, H.:

Dynamische Windwirkung an Bauwerken unter Interferenzeinfluß.
Habilitationsschrift Fakultät Bauwesen, RWTH Aachen, Mai 1985

Das Verhalten der instationären Kräfte an zwei engstehenden Zylindern bewirkt zwei verschiedene Erregermechanismen:

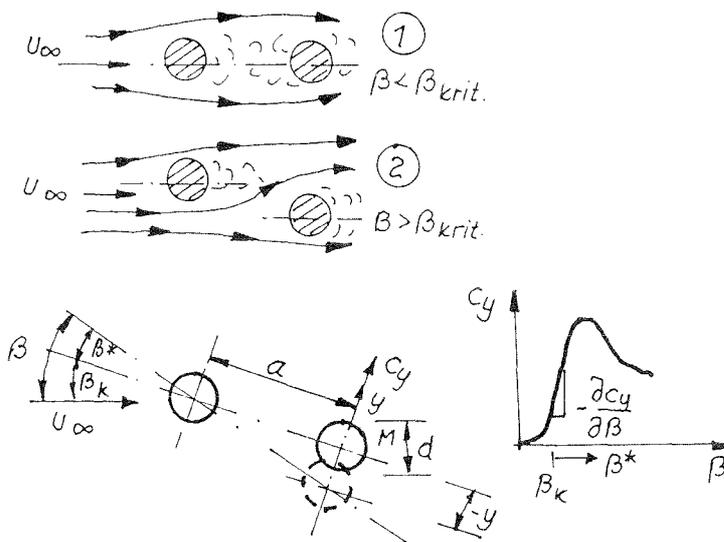
- a) Bewegungsinduzierte Erregerkräfte, die durch die Relativbewegung der beiden Zylinder hervorgerufen werden (Interferenzgalloping)
- b) Wirbelerregung, deren Intensität, Frequenz und Resonanzbreite von der Schwingbewegung gesteuert werden.

Die bewegungsinduzierte Instabilität ist dadurch gekennzeichnet, daß sie durch eine Bewegung des Objektes quer zur Windrichtung ausgelöst wird und bei einer bestimmten Einsetzgeschwindigkeit, die ihrerseits von der Strömungszahl abhängt, beginnt. Die Amplitude nimmt kontinuierlich mit steigender Windgeschwindigkeit zu.

Bei der Wirbelerregung handelt es sich um ein Resonanzproblem, bei dem die ablösenden Wirbel in Resonanz mit dem schwingfähigen System sind. Im Bereich der kritischen Windgeschwindigkeit treten maximale Amplituden auf, die den Ablösevorgang steuern (Synchronisationseffekt).

Ist die Galloping-Einsetzgeschwindigkeit wesentlich größer als die kritische Wirbelresonanzgeschwindigkeit, so lassen sich beide Phänomene getrennt behandeln. Bei schlanken modernen, d.h. leichten Bauwerken ist jedoch die Galloping-Einsetzgeschwindigkeit nicht viel größer als die kritische Wirbelresonanzgeschwindigkeit. In diesem Fall vermischen sich beide Erregermechanismen und die Vorgänge werden erheblich verwickelter.

Zur Theorie des Interferenzgalloping



Befindet sich der rückwärtige Zylinder im Strömungsnachlauf des luvseitigen Zylinders ①, wird auf ihn kaum eine Seitenkraft ausgeübt. Beim Erreichen eines kritischen Anströmwinkels β_k schlägt die Strömung um und fließt mit hoher Geschwindigkeit durch die Lücke ②. Der rückwärtige Zylinder erfährt an der der Lücke zugekehrten Seite eine hohe

Seitenkraft. Ist der Zylinder elastisch genug, wird er sich in die positive y -Richtung bewegen, der kritische Anströmwinkel wird unterschritten und der Strömungszustand ① tritt wieder ein. Dadurch wird der Zylinder entlastet; er schwingt zurück über β_k hinaus, so daß sich der Zustand ② wiederum einstellt. Dieser Wechsel geschieht im Takt der Eigenfrequenz des Zylinders. Die Strömung folgt der Schwingbewegung mit einer Zeitverschiebung (Phasenverschiebung).

Die kritische Einsetzgeschwindigkeit beträgt:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot M \cdot \delta}{f \cdot d}} \cdot 2 \cdot f_e \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\tau \cdot \frac{a}{d}}{\frac{d c_y}{d \beta} \Big|_{\beta} \cdot \sin \Theta}}$$

Zur Berechnung wirbelerregter Schwingungen

Für die Beschreibung wirbelerregter Schwingungen wird von folgender Beziehung ausgegangen:

$$\frac{y_0}{d} = I \cdot \frac{\tilde{c}_y}{S_c} \cdot u_{r \text{ krit}}^2$$

Darin bedeuten:

y_0 = Schwingamplitude an der Spitze

$$\tilde{c}_y = \frac{\int_0^l c_y(z) \cdot \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz}{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz} = \text{generalisierter Erregerkraftbeiwert}$$

S_c = Scrutonzahl

$$u_{r \text{ krit}} = \left(\frac{u_{\infty}}{f_e \cdot d}\right)_{\text{krit}} = \text{reduzierte Geschwindigkeit bei max. Schwingamplitude}$$

$$M = \frac{\int_0^l m(z) \cdot \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz}{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz} = \text{generalisierte Masse pro Länge}$$

δ = logarithmisches Dekrement der Dämpfung

ρ = Luftdichte

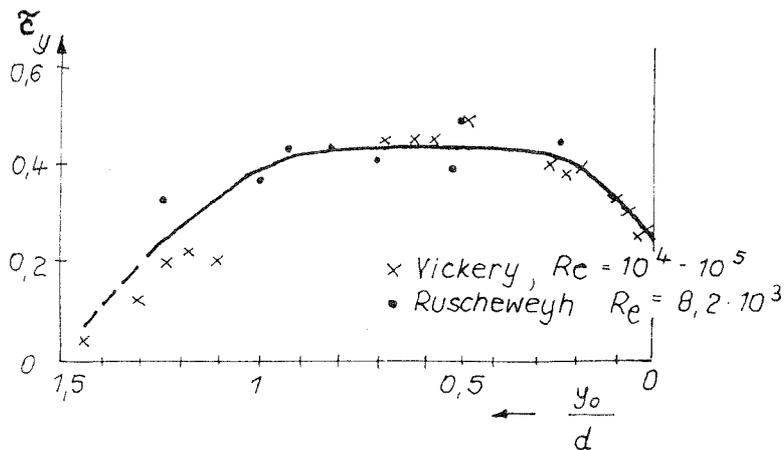
$y(z)$ = Schwingungsform

$$I = \frac{\int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right)^2 \cdot dz}{4 \cdot \pi \cdot \int_0^l \left(\frac{y(z)}{y_0}\right) \cdot dz} = \text{Konstante, die von der Schwingungsform abhängt (bei quadratischer Parabel der Schwingungsform } I \approx 0,13)$$

Versuche:

Um das Phänomen des Interferenzgalloppings und seine Kombination mit Wirbelerregung aufzuzeigen, wurden Windkanalversuche an verschiedenen Zylinderanordnungen durchgeführt. Als Modell wurden zwei einseitig eingespannte Aluminiumrohre mit dünner Wandstärke (0,3 mm) verwendet, um kleine Scrutonzahlen zu erzielen (\varnothing 27,4 mm; L = 605 mm; $\lambda = 22,1$). Der Mittenabstand a konnte in weiten Grenzen verändert werden.

Beim Einzelkamin nimmt der generalisierte Erregerkraftbeiwert mit abnehmendem S_c zuerst zu, um dann bei sehr großen Werten von S_c wieder kleiner zu werden. Der Grund dafür ist in dem bekannten "Synchronisationseffekt" zu sehen, der mit größer werdender Schwingamplitude die Korrelationslänge der Erregerkräfte längs der Zylinderachse vergrößert. Dieser Vorgang wird durch aerodynamische Nichtlinearitätseffekte bei sehr großen Amplituden $\frac{y_0}{d} > 0,8$ gestört, so daß dort die c_y -Werte wieder leicht abnehmen.

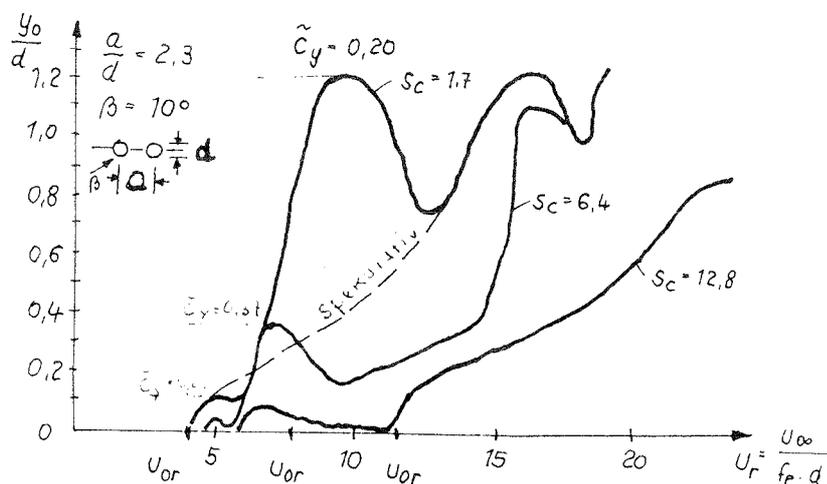


Bei benachbarten Kaminen kommt die Windrichtung als weiterer Einflußparameter hinzu. Sowohl der an den Kaminen einsetzende Wirbelmechanismus als auch die Interferenzgalloppinginstabilität wird entscheidend von der Anströmrichtung geprägt. In allen untersuchten Fällen zeigte der hintere Kamin die größten Maximalschwingungen.

Es gibt zwar Windrichtungen, bei denen der vordere Kamin stärker schwingt als der hintere, aber bei den ungünstigsten Anströmrichtungen ist die Schwingung des hinteren Kamins stets größer als die größte Schwingung des vorderen Kamins.

Da in der praktischen Anwendung je nach Windrichtung jeder der 2 Kamine einmal der "hintere" ist, müssen beide Kamine nach den Maximallasten bemessen werden.

In dieser Arbeit wurden nur die Werte des hinteren Kamins aufgezeigt. Mit größer werdendem S_C trennt sich der Interferenzgallopingbereich vom Wirbelresonanzbereich. Auf dem Bild läßt sich für $S_C = 12,8$ die Einsetzgeschwindigkeit mit $U_r = 11$ eindeutig ablesen zu $U_{or} = 11$.



Daraus kann das kombinierte Instabilitätsmaß

$$- \zeta^* \cdot \sin(\ominus) = \frac{4 \cdot M_0 \cdot \pi \cdot \frac{a}{d}}{U_{or}^2} = 3,06 \quad \text{errechnet werden.}$$

Unterstellt man, daß dieser Wert auch für kleinere S_C gilt, dann müßten sich Einsetzgeschwindigkeiten ergeben:

$$\begin{aligned} S_C = 6,4 & \longrightarrow U_{or} = 7,8 \\ S_C = 1,9 & \longrightarrow U_{or} = 4,2 \end{aligned}$$

Wird der kritische Anströmwinkel von $\beta = 10^\circ$ fühlbar überschritten, tritt scheinbar kein Interferenzgalloping sondern nur noch wirbelinduzierte Schwingungen auf.

Ist das Abstandsverhältnis $a/d \geq 3,5$, wird das Interferenzgalloping-Phänomen im Versuch nicht mehr beobachtet. Es treten aber fast bei allen Windrichtungen wirbelerregte Schwingungen auf, die einen stark verbreiterten Resonanzdurchlauf aufweisen.

Abstands- verhältnis ($\frac{a}{d}$)	Struton- zahl $S_c(M_\infty)$	Anblas- winkel β	max. \tilde{c}_y	Bemerkungen
Einzelzyl.	1,42 1,75 4,53 20,6		0,355 0,38 0,4 0,1	
2,3	1,7	0°	0,07	kritischer Anblaswinkel $\beta_k=10^\circ$ - $\beta = 0^\circ$ nur schwache Wirbelresonanz - $\beta = 5^\circ$ schwache Wirbel- resonanz u. Interferenz- galloping
		5°	0,041	
		10°	0,20	
		15° 30°	0,18 0,31	
	6,4	0°	0,1	
		5°	0,12	
10°		0,37		
15° 30°		0,055 0,32		
12,8	0°	0,08		
	5°	-		
	10°	0,23		
	15° 30°	0,2 0,45		
4,8	1,6	0°	0,17	-bei $a/d \geq 3,5$ Interferenz- galloping im Versuch nicht beobachtet -bei allen Windrichtungen verbreiteter Resonanz- durchlauf u. wirbelerregte Schwingungen
		5°	0,19	
		10°	0,33	
		20°	-	
	6,9	0°	0,32	
		5° 10° 20°	0,24 - 0,36	
12,9	0°	0,07		
	5°	0,18		
	10°	0,14		
	20°	0,42		
7,3	1,5	0°	0,18	-Interferenzeinfluß auf wirbelerregte Schwingungen ist spürbar
		10°	0,24	
		20°	0,18	
	15,3	0° 10° 20°	0,29 0,16 0,25	-Bei Schräganströmung nähert sich die Reaktionskurve mehr dem Einzelzylinder.

Ruscheweyh, H.:

CROSS-WIND VIBRATIONS OF GROUPED AND IN-LINE STACKS.

5. Int. Chimney Congress, Proceedings, Essen;

3. - 5th October 1984

In Windkanaluntersuchungen an elastischen Schornsteinmodellen wurde das Querschwingungsverhalten untersucht. Außer wirbel-erregten Schwingungen existierten verschiedene selbsterregte Schwingungen. Getrennte Schornsteine sind gefährdet durch Interferenzgalloping. Gekoppelte Schornsteine wurden erregt durch klassisches Galloping. In modernen Entwürfen haben die Schornsteine oft einen geringen Abstand zueinander und sind miteinander verbunden. Zwei Beispiele von dynamischen Antworten bei Tandemanordnung und einer Gruppe von 3 Schornsteinen werden beschrieben. Es wird gezeigt, daß die Wirbelantwort gut als Gallopingsschwingung erwartet werden kann bei Originalbauwerken.

Einführung:

In modernen Entwürfen wurden oft zwei oder mehr Schornsteine angeordnet, in Reihen- oder Gruppenanordnung. Interferenzeffekte erhöhen das Querschwingungsverhalten. In Abhängigkeit von der Schornsteinanordnung und vom Abstandsverhältnis zwischen den Schornsteinen existieren unterschiedliche Erregungen:

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| (1) vortex excitation | (Wirbelresonanzanregungen) |
| (2) interference galloping | (Interferenz-Galloping) |
| (3) wake galloping | (Nachlaufgalloping/Buffeting) |
| (4) classical galloping | (klassisches Galloping) |

Diese Instabilitäten treten bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten auf. Die Anfachungsgeschwindigkeit der Galloping-Arten und die Schwingungsamplituden werden hauptsächlich beeinflusst durch die Scruton-number (= mass damping parameter).

Wirbelresonanz-erregung:

Die Strouhalzahl wird mit verringertem Abstandsverhältnis a/d gesenkt, so daß die kritische Windgeschwindigkeit

$$V_{\text{krit}} = \frac{1}{S} \cdot d \cdot n_e$$

beträchtlich gesteigert wird,

Bei zwei nicht miteinander gekoppelten Schornsteinen beträgt bei einem Abstandsverhältnis $a/d = 1,3$ die kritische Windgeschwindigkeit das Doppelte.

Die dynamische Windlast wird dadurch gesteigert um das 4-fache. Die Veränderungen der Erreger-Quertriebsbeiwerte sind verhältnismäßig gering ($\pm 50\%$) und abhängig vom Abstandsverhältnis und Massendämpfungsparameter.

Bei gekoppelten Schornsteinen ist die Situation verändert. Die Strouhalzahl bleibt nahezu konstant, aber der Erreger-Quertriebsbeiwert wird gesteigert auf das 3-fache.

Interferenz-Galloping:

Interferenz-Galloping ist eine selbsterregte Schwingung, die durch die relative Bewegung von zwei benachbarten Zylindern angeregt wird. Es ist als erstes beschrieben bei Connor. Es trat auf bei Wärmeaustauschern mit einem Abstandsverhältnis $a/d < 3$.

Wenn die Windgeschwindigkeit die Anfachungsgeschwindigkeit übertrifft, können sehr große Amplituden auftreten, die mit wachsender Windgeschwindigkeit sich steigern. Die Anfachungsgeschwindigkeit V_0 kann abgeschätzt werden nach der Formel

$$V_0 = 3,54 \cdot n_e \cdot d \cdot \sqrt{s_c} \cdot \sqrt{\frac{a/d}{G^*}}$$

Das Interferenz-Galloping-Kriterium G^* liegt in der Größenordnung von 3. Die Ermittlung ist kompliziert.

Nachlaufturbulenz:

Bei der Nachlaufturbulenz wird die Bewegung des hinteren Zylinders durch den Nachlauf des vorderen Zylinders erzeugt. Es ist beschrieben bei Cooper und Wordlow für elektrische Kraftleistungen mit großem Abstandsverhältnis $a/d = 10$. Interferenzgalloping sowie Nachlaufturbulenz können verhindert werden bei Kopplung der Zylinder miteinander.

Galloping-Instabilität:

Wenn 2 oder mehrere Zylinder miteinander zu einem neuen System gekoppelt werden, dann ist dieses neue System nicht mehr rotationssymmetrisch. Bei speziellen Windrichtungen existieren negative slopes und Quertriebskräfte, die zum klassischen Galloping führen.

Modelluntersuchungen zeigen, daß große Amplituden vorkommen, wenn die Anfangsgeschwindigkeiten

$$V_0 = 2 \cdot n_e \cdot d \cdot \frac{S_c}{\zeta}$$

übertroffen werden.

$$S_c = \text{Scrutonnummer} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \sum M_i}{\rho \cdot d^2}$$

$$\zeta = -\frac{\partial c_y}{\partial \beta} = \text{Instabilitätskriterium der Galloping-schwingung (galloping criterion)}$$

Gekoppelte Zylinder:

Beschrieben wurden Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen mit zwei bzw. drei gekoppelten Schornsteinanordnungen.

H. J. Gerhardt und C. Kramer

Windbelastung schlanker Bauwerke in Gruppenanordnung

KONSTRUKTIVER INGENIEURBAU-BERICHTE Heft 35/36, S. 56-59

März 1981, Vulkan-Verlag Dr. W. Glassen Nachf. GmbH & Co KG Essen

1. Ähnlichkeitsbetrachtungen

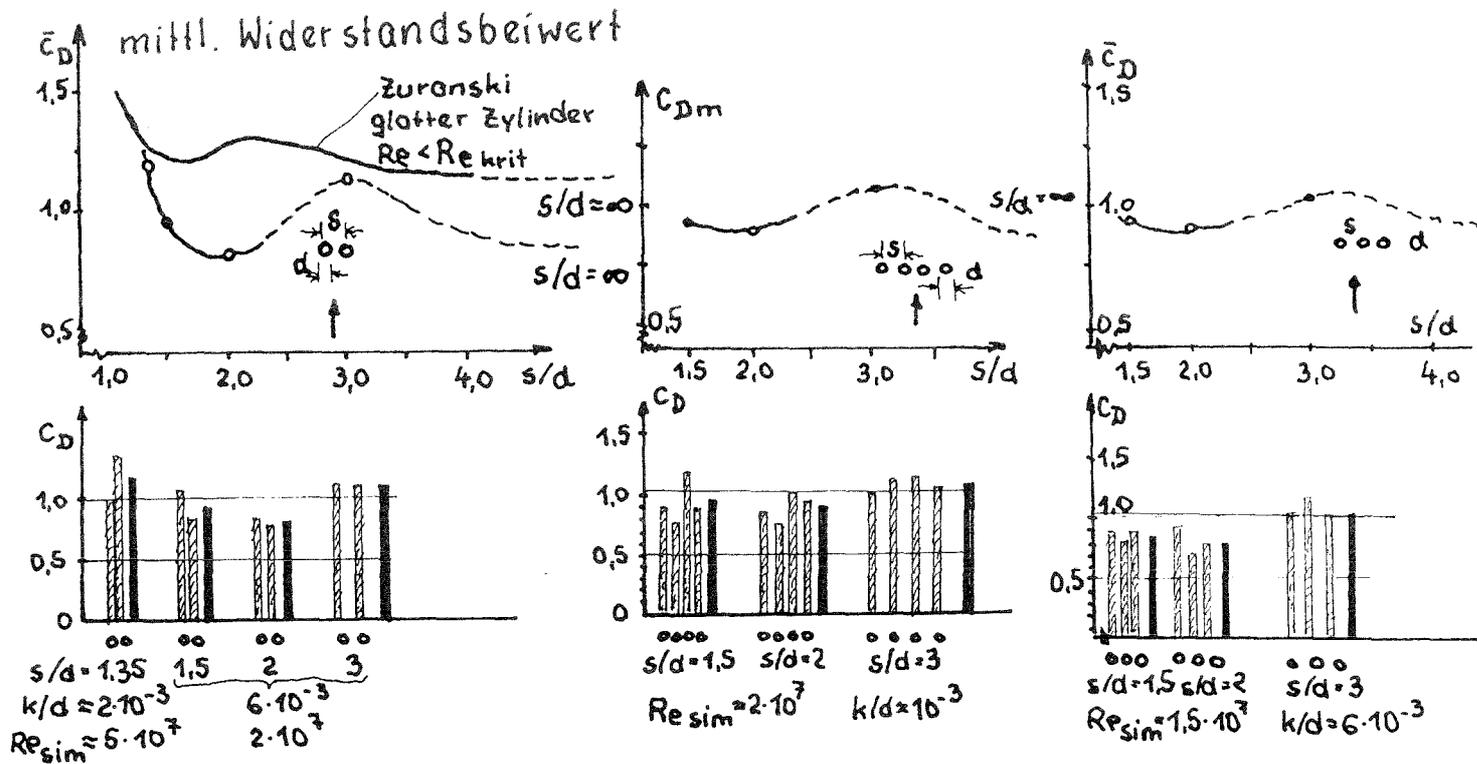
Der für die Bemessung der maximalen Windlasten von zylindrischen Bauwerken wichtige Bereich der hohen Reynoldszahlen $Re \geq 10^6$ kann in normalen Windkanälen nicht erreicht werden. Durch Anbringung entsprechender Rauigkeiten auf der Zylinderoberfläche läßt sich jedoch bereits bei erheblich niedrigeren Reynoldszahlen eine Zylinderumströmung erzeugen, die derjenigen bei transkritischen Reynoldszahlen entspricht.

Windkanalversuche an elastischen Modellen von Schornsteinen werden üblicherweise bei derartig niedrigen Reynoldszahlen durchgeführt, daß auch bei Anbringung vergleichsweise großer Rauigkeiten die für transkritische Reynoldszahlen typischen Strömungsverhältnisse nicht simuliert werden können. Da jedoch die wirbelerregten Schwingungen bei unterkritischen Anströmbedingungen erheblich ausgeprägter sind als bei transkritischer Strömung, liegen die Ergebnisse von Modelluntersuchungen bei niedrigen Reynoldszahlen auf der sicheren Seite. Während in strömungsdynamischer Hinsicht die Ähnlichkeit zwischen Modell und Großausführung nicht gegeben ist, können im allgemeinen die schwingungsfähigen Modelle so gebaut werden, daß die dynamischen Ähnlichkeitsbedingungen, ausgedrückt durch den Massendämpfungsparameter, das logarithmische Dämpfungsdekrement, die normalisierte Eigenfrequenz usw. mit hinreichender Genauigkeit erfüllt sind.

2. Quasistatische Windlasten (Versuchsergebnisse)

Bei Gruppenanordnung zylindrischer Bauwerke, der Reihung, bei der die Zylinder mit jeweils gleichem und relativ kleinem Achsabstand in einer Ebene angeordnet sind, treten die höchsten quasistatischen Windlasten bei Windanströmung senkrecht zur Zylinderebene auf.

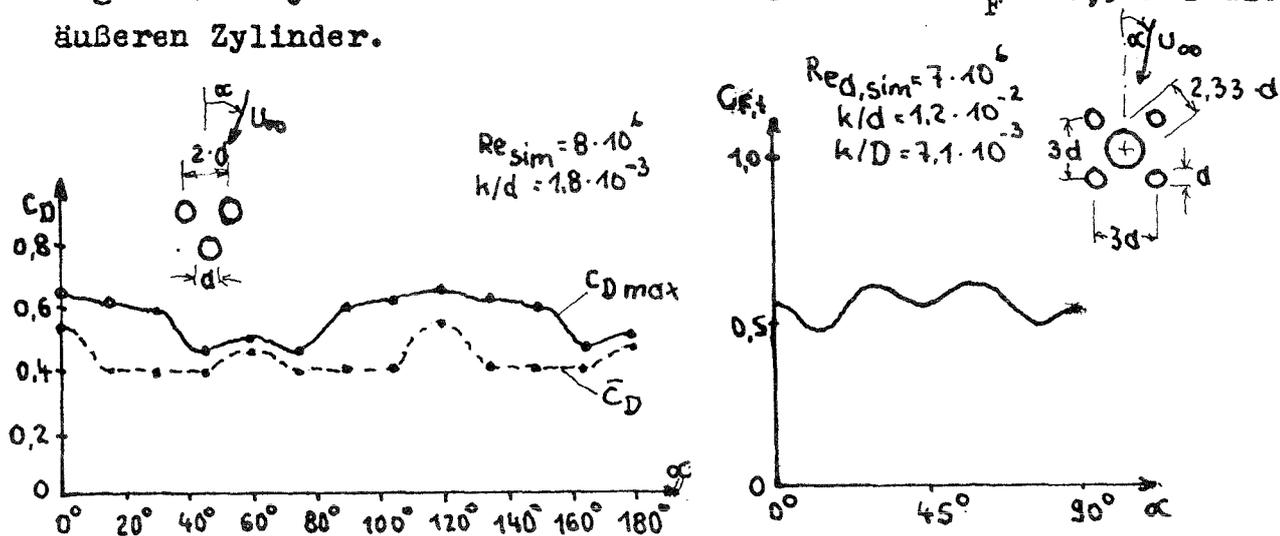
Bei einem relativen Achsabstand $s/d \approx 3$ bildet sich hinter den beiden Zylindern eine vergleichsweise stabile, gespiegelte Karman'sche Wirbelstraße aus (Widerstandsbeiwerte für beide Zylinder ungefähr gleich).



Für eine Dreiecks-Gruppenanordnung von Zylindern mit relativem Achsabstand $s/d = 2$ bei unterschiedlicher Windanströmung ergeben sich folgende mittlere Widerstandsbeiwerte \bar{c}_D und die höchstens an einem Zylinder auftretenden Widerstandsbeiwerte

c_{Dmax}

Der Gesamtwiderstandsbeiwert für eine Fünfer-Anordnung ändert sich ähnlich wie bei der Dreiecks-Anordnung, nicht sehr stark für unterschiedliche Anströmrichtungen. Bei der Fünfer-Anordnung ergibt sich jedoch eine maximaler Lastbeiwert $c_F = 0,9$ für die äußeren Zylinder.



3. Winderregte Schwingungen von in Gruppen angeordneten Kaminen

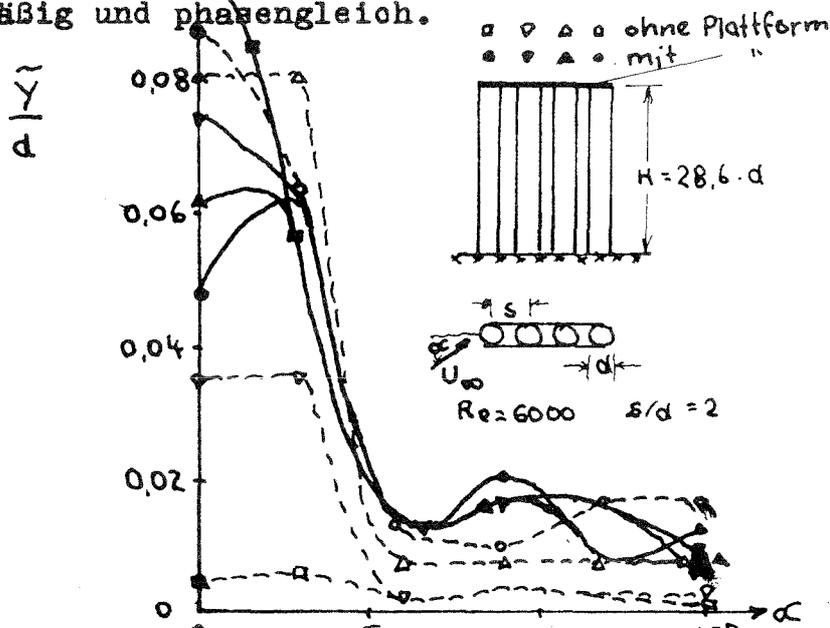
Untersuchungen von Hahnenkamp und Hammer mit derselben Gruppenanordnung in glatter Windkanalströmung und simulierter atmosphärischer Windanströmung für offenes Gelände führten zu vergleichbaren Ergebnissen. Dies bedeutet, daß Messungen in glatter Windkanalströmung ausreichend sind, um das Schwingungsverhalten von Kaminen, die ⁱⁿ nur wenig bebautem, offenem Gelände errichtet werden sollen, vorherzusagen.

Schornsteine in Reihenanordnung sind besonders schwingungsgefährdet. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde der Einfluß des Massendämpfungsparameters und des relativen Kaminabstandes untersucht. Werden die Schornsteine, wie es in der Praxis üblich ist, durch starre Bühnen miteinander verbunden, wird die Energie der windinduzierten Schwingungen zum Teil erheblich vergrößert.

Bei vier hintereinander stehenden Kaminen, die nicht miteinander gekoppelt sind, treten die größten Schwingungsamplituden für die zwei leeseitigen Kamine auf.

Beim mittels einer starren Bühne gekoppelten System schwingt der erste Zylinder besonders stark. Für die kritische Windgeschwindigkeit $\alpha = 0^\circ$ nimmt die Schwingungsamplitude vom ersten bis zum vierten Kaminmodell nur geringfügig ab. Die vier miteinander gekoppelten Zylinder schwingen phasengleich senkrecht zur ungestörten Anströmung.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluß feinzelliger Turbulenz auf das Schwingungsverhalten der gekoppelten Kaminanordnung untersucht. Die vier gekoppelten Zylinder schwingen völlig gleichmäßig und phasengleich.



W. Hanenkamp und W. Hammer

Querschwingungsverhalten von Stahlkaminen in Reihenordnung -
Windkanaluntersuchung

KONSTRUKTIVER INGENIEURBAU - BERICHTE Heft 35/36, S. 65-71

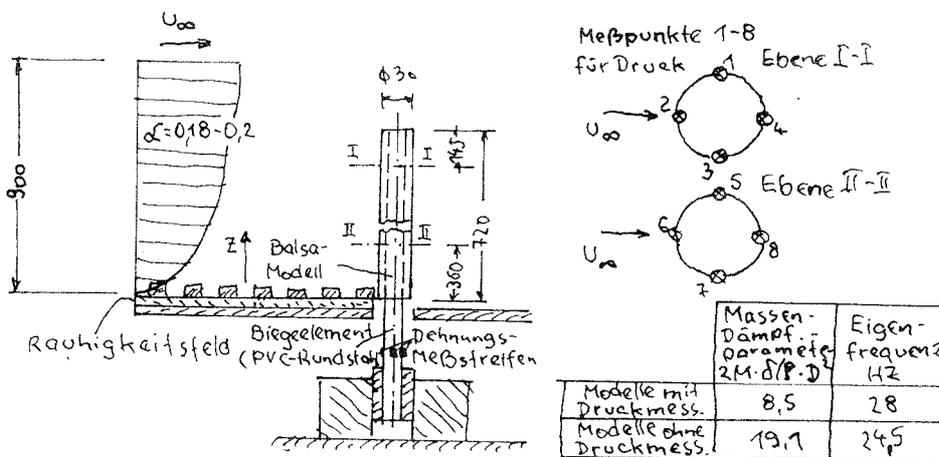
Gruppen von zylindrischen Bauwerken, wie z.B. Stahlkaminen, die in Reihe angeordnet sind, weisen infolge Windbeanspruchung im allgemeinen größere Querschwingungsamplituden als das einzelstehende Bauwerk auf. Die Ursache dafür liegt in der Belastung der stromabwärts angeordneten Zylinder durch regelmäßige und unregelmäßige Wirbelablösungen an den in Strömungsrichtung vorstehenden Bauwerken. Während bei einzelstehenden Stahlbetonkaminen die Querschwingungen weit weniger von Bedeutung sind, kann auch hier die Reihenordnung die Querschwingungsempfindlichkeit in starkem Maße vergrößern. Verschiedene Windkanaluntersuchungen mit laminarer und turbulenter Strömung zur Klärung der gegenseitigen Beeinflussung bei der Anordnung von 2 oder mehr Zylindern in Reihe wurden durchgeführt [10]. Alle diese Versuche erbrachten deutliche Unterschiede des Querschwingungsverhaltens beim Einzelzylinder und bei der Reihenordnung von Zylindern. Auch Maßnahmen zur Reduzierung der Querschwingungen, wie z.B. die Anbringung von Scruton-Wendeln, brachten bei der Reihenordnung von Zylindern nicht den Erfolg wie beim einzelstehenden Zylinder [1].

Zur Klärung der gegenseitigen Beeinflussung von Stahlkaminen in Reihe wurden Windkanalversuche mit aeroelastischen zylindrischen Modellen in turbulenter Anströmung durchgeführt. Bei den Versuchen wurden die Anzahl der Modelle (maximal 4), der Abstand der Modelle untereinander, der Anströmwinkel sowie der Massen-Dämpfungsparameter der Modelle variiert. In weiteren Untersuchungen sollte die Wirksamkeit von Maßnahmen, wie z.B. die Abspannung eines Zylinders in der Reihe zur Reduzierung der Querschwingungsamplituden, geklärt werden.

Für die Versuche wurde der Grenzschichtwindkanal des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Bereich Modellversuche, benutzt (Querschnitt $1,8 \times 1,9 \text{ m}^2$, $v_{\text{max}} \approx 35 \text{ m/s}$). Die Simulation der Grenzschicht erfolgte nach der Methode von Counihon [2] (Geschwindigkeitsprofil, Turbulenzprofil und Turbulenzintensität entsprechend Bild; Exponent $\alpha = 0,18 - 0,20$).

Die Messung der Schwingungsamplituden der Modelle erfolgt über Dehnungsmeßstreifen, die an den elastischen Einspannungen der Modelle angebracht waren. Vier Dehnungsmeßstreifen, jeweils um 90° versetzt angeordnet, ermöglichten die Schwingungsmessung in Längs- und Querrichtung. Eine entsprechende Eichung lieferte den Zusammenhang zwischen Signal des Meßstreifens und Schwingungsamplitude an der Modellspitze. Jedes Modell wurde zunächst als Einzelmodell untersucht. Die Reynoldszahlen für alle durchgeführten Versuche lagen im Bereich von $5 \cdot 10^3$ bis $3 \cdot 10^4$.

Die Abtastrate des A/D Converters war 45 kHz und für eine Gruppe von 16 Kanälen wurden alle 1,25 ms Meßwerte aufgenommen. Für eine Messung (Dauer etwa 40 s) standen 524 288 digitale Daten zur Verfügung.



Versuchsergebnisse

- Messung der Querschwingungsamplitude

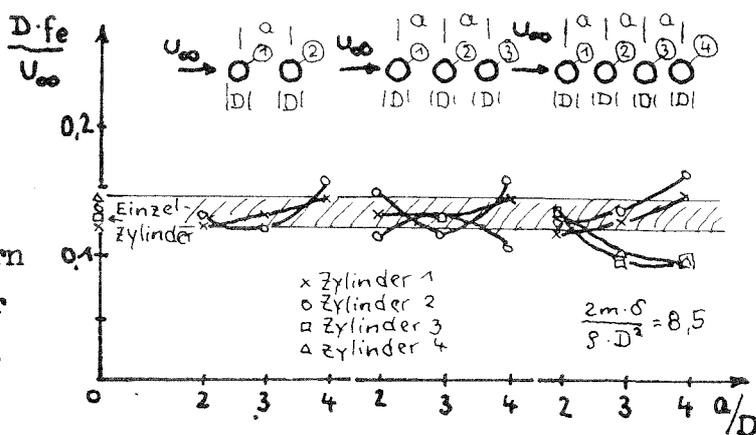
Von den aus den Querschwingungsamplitudenverläufen berechneten RMS-Werten wurde für jeden Versuch der maximal auftretende Wert (Resonanzpunkt) als charakteristischer Wert für die weitere Auswertung benutzt. Diese im jeweiligen Versuch bei einer entsprechenden Windgeschwindigkeit gefundene maximale Querschwingungsamplitude wurde mit dem Modelldurchmesser normiert und ist als bezogene Größe mit η_{\max} bezeichnet.

Die maximal auftretenden Querschwingungsamplituden η_{\max} für den Versuch am Einzelmodell lagen im Bereich von $0,14 - 0,3$ für die Modelle mit dem Massen-Dämpfungsparameter 8,5 und im Bereich von $0,014 - 0,04$ für den höheren Wert des Massen-Dämpfungsparameters ($2 \cdot m \cdot d / \rho \cdot D^2 = 19,1$). Diese Werte sind in Übereinstimmung mit denen

der Funktion $\eta_{\max} = f(2 \cdot m \cdot \delta / \rho \cdot D^2)$, deren Grundlagen in [1] erläutert sind und die in [15] wiedergegeben ist.

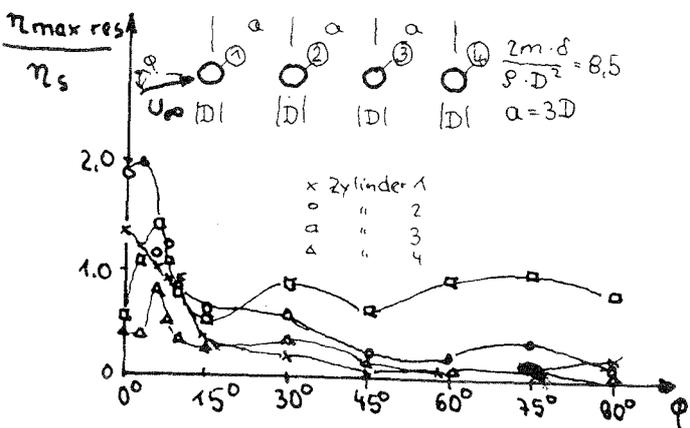
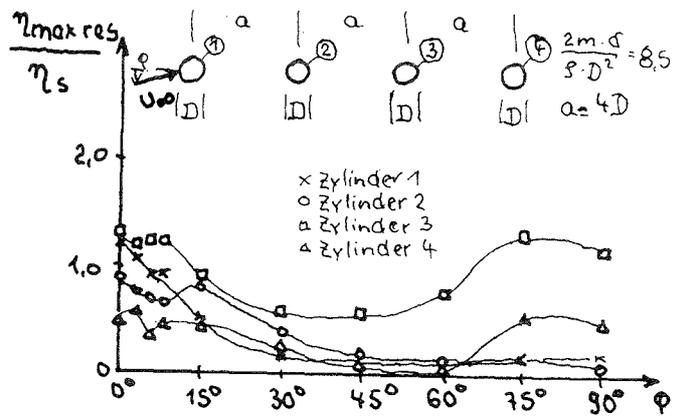
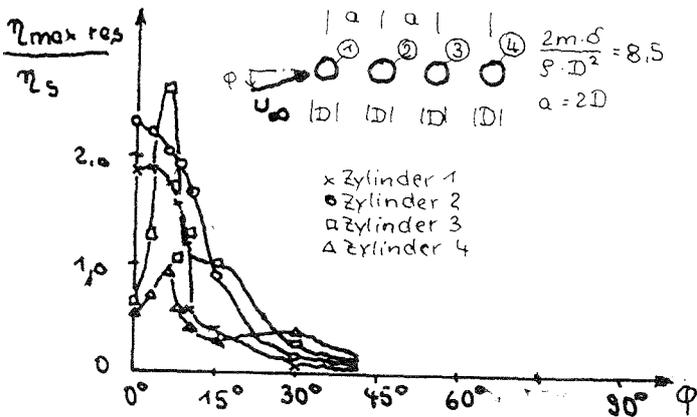
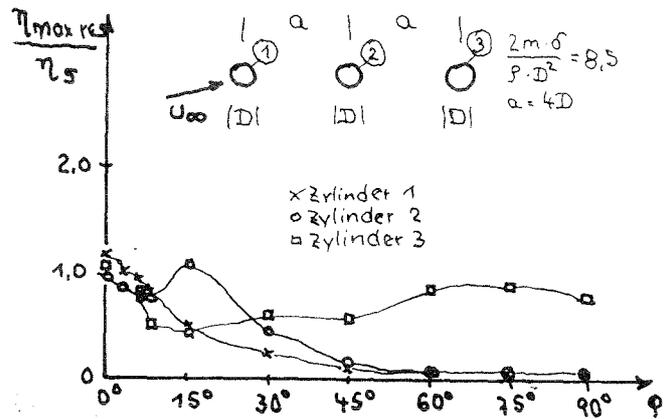
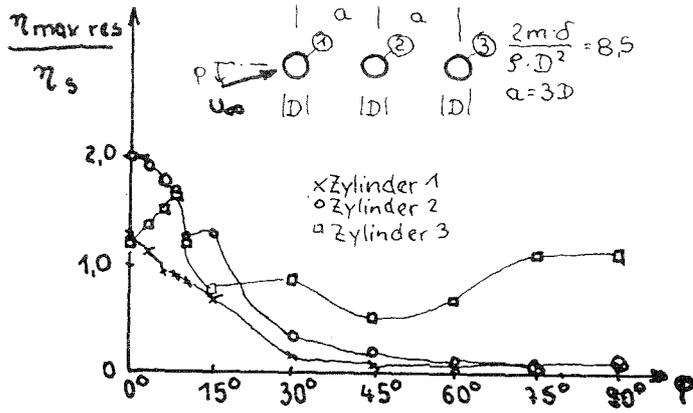
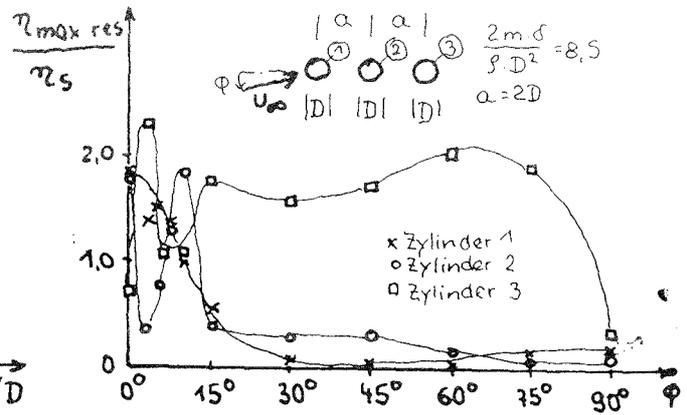
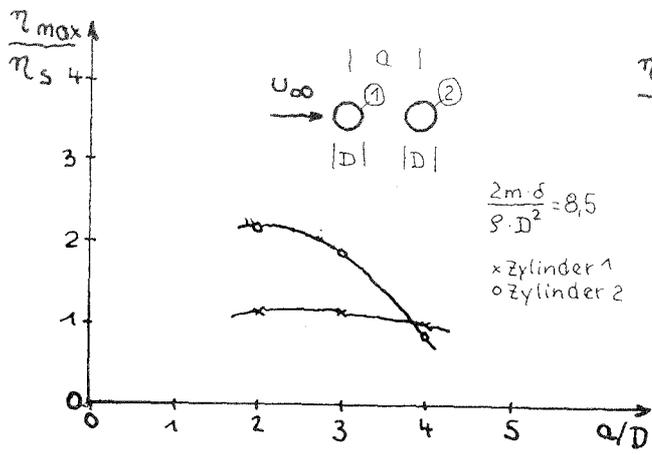
Im Bild ist die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit bei der im jeweiligen Versuch die maximale Querschwingungsamplitude für die Reihenanzordnung von zwei, drei und vier Zylindern sowie Anströmung in Richtung der gemeinsamen Achse wiedergegeben.

Aus dem Bild ist zu ersehen, daß für Zylinderabstände von 2 D bis 3 D die kritischen



Windgeschwindigkeiten bei den einzelnen Modellkonfigurationen der Bandbreite der Einzelmodelle entsprechen. Mit zunehmendem Abstand der Modelle untereinander nehmen die Werte für die beiden ersten Zylinder zu, während die weiteren in der Reihenanzordnung folgenden fallende Werte aufweisen. Die Abhängigkeit der kritischen Windgeschwindigkeit vom Abstand der Modelle zeigt, daß für jeden Zylinder eine zugehörige kritische Windgeschwindigkeit zu definieren ist, welche bei einem Modellabstand von 4 D durchweg außerhalb der Bandbreite der Einzelmodelle liegt.

Die folgenden Bilder zeigen die Ergebnisse aus den Messungen der Querschwingungsamplituden der einzelnen Zylinder in Reihe bei Variation von Zylinderabstand und Anströmwinkel. Die für den jeweiligen Versuch ermittelte maximal bezogene Schwingungsamplitude η_{\max} bzw. $\eta_{\max, \text{res}}$ normiert mit der im Versuch am Einzelzylinder ermittelten bezogenen Querschwingungsamplitude η_s ist als Funktion des Modellabstandes sowie als Funktion des Anströmwinkels ϕ aufgetragen. Dieser Wert wird als Vergrößerungsfaktor für die Querschwingungsamplituden bezeichnet (Einzelmodell hat den Wert 1,0)



Aus den Versuchen mit Variation des Anströmwinkels wurde jeweils der aus Längs- und Querschwingungsamplitude resultierende max. Wert als charakteristischer Wert für die Auswertung benutzt. Diese resultierende Querschwingungsamplitude ist normiert mit dem Modelldurchmesser als $\eta_{\max Res}$ bezeichnet.

Für $\phi = 0^\circ$ ist allgemein eine Abnahme der Vergrößerungsfaktoren mit zunehmendem Abstand zu verzeichnen. Bei einem Abstand von 4 D liegen alle Zylinder in etwa beim Wert 1 oder aber noch darunter. Bei Abständen der Zylinder von 2 D und 3 D treten die höchsten Werte für die Vergrößerungsfaktoren beim Zylinder Nr. 2 zwischen 1.86 und 2.26 auf. Bei den Modellen 3 und 4 dagegen treten auch bei den kleinen Modellabständen kaum Vergrößerungsfaktoren von größer als 1 auf.

In der Tabelle sind die maximalen Vergrößerungsfaktoren der 0° -Anströmrichtung und des Bereiches $\phi = 0^\circ$ bis 10° gegenübergestellt. Anstiege der Vergrößerungsfaktoren nur bei Modell Nr. 3 besonders ausgeprägt.

Anordnung	Abstand	Anströmwinkel $\phi = 0^\circ$ Zylinder Nr.				Anströmwinkel $\phi = 0-10^\circ$ Zylinder Nr.			
		1	2	3	4	1	2	3	4
2 Zylinder	a = 2D	1,16	2,23			1,16	2,23		
	a = 3D	1,15	1,90			1,15	1,90		
	a = 4D	0,96	0,90			0,96	0,90		
3 Zylinder	a = 2D	1,83	1,76	0,67		1,83	1,83	2,33	
	a = 3D	1,25	2,00	1,16		1,25	2,00	1,62	
	a = 4D	1,16	0,93	1,06		1,16	0,93	1,06	
4 Zylinder	a = 2D	1,90	2,26	0,56	0,56	1,90	2,26	2,62	0,90
	a = 3D	1,33	1,86	0,56	0,40	1,33	1,98	1,42	0,80
	a = 4D	1,26	0,96	1,20	0,45	1,26	0,96	1,20	0,56

- Messung der Querdrücke an den Modellen

Neben der Dehnungsmessung am Modellfuß wurden für eine Versuchsserie 4 Modelle mit einem Druckmeßsystem ausgerüstet. Für diese Druckmessungen wurden in die Basalröhre 1 - 8 Röhrchen eingesetzt, die an Druckmeßdosen angeschlossen waren. Durch die Anordnung der Röhrchen und Schläuche im Inneren der Modelle mußte zwangsläufig ein Anstieg des Massen-Dämpfungsparameters und ein Absinken der

Eigenfrequenz in Kauf genommen werden.

Der Vergrößerungsfaktor für den in der Tabelle angegebenen Querdruck (Massendämpfungsparameter 19,1) wurde folgendermaßen ermittelt:

Der RMS-Druckwert an den Meßstellen 1 und 3 normiert mit dem Staudruck Meßstelle 2 (Zylinder Nr. 1). Das Maximum dieser normierten Druckwerte eines jeden Zylinders wurde für die weitere Ergebnisaufbereitung verwendet. Entsprechenden Wert aus dem Versuch am Einzelzylinder

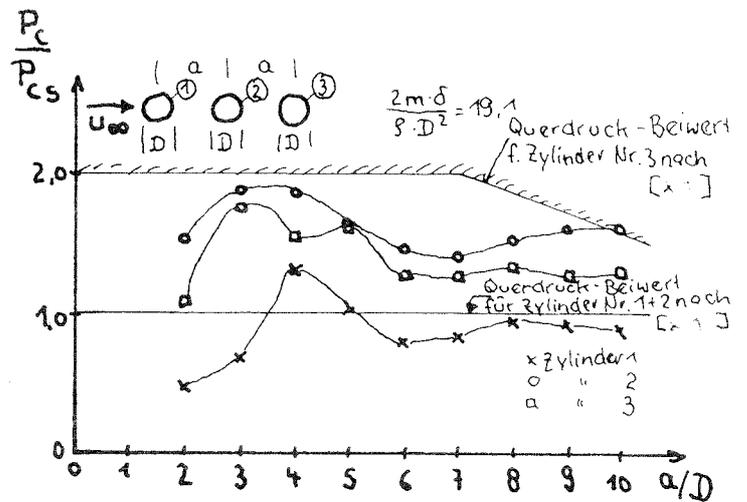
$$\frac{P_c}{P_{cs}} = \frac{(RMS P_1 + RMS P_3) / RMS (2 \cdot P_{2 \text{ Zyl. 1}})}{(RMS P_1 + RMS P_3) / RMS (2 \cdot P_2) \text{ Einzelzyl.}}$$

Auch aus diesen Ergebnissen ergibt sich generell eine Abnahme des Vergrößerungsfaktors mit zunehmendem Abstand der Modelle voneinander. Die ermittelten Vergrößerungsfaktoren für den Querdruck bestätigen die Ergebnisse aus den Querschwingungsmessungen in dem Sinn, daß die Reihenanzahl der Modelle bei den im unmittelbaren Nachstrom befindlichen Zylindern 2 und 3 höhere Druckbeiwerte gegenüber dem Einzelmodell nach sich zieht. Einen besonders ausgeprägten Anstieg dieser Werte zeigt wiederum Zylinder Nr. 2.

Anordnung	Zylinder Nr.	Abstand a								
		2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D	9D	10D
2 Zylinder	1	0,50	0,96	1,34						
	2	1,00	0,94	0,88						
3 Zylinder	1	0,50	0,70	1,35	1,10	0,84	0,86	0,98	0,95	0,90
	2	1,58	1,94	1,92	1,70	1,50	1,44	1,54	1,62	1,64
	3	1,10	1,82	1,60	1,70	1,30	1,25	1,36	1,30	1,28
4 Zylinder	1	0,50	0,72	1,48						
	2	1,60	1,76	1,86						
	3	1,24	1,46	1,42						
	4	0,78	1,24	1,12						

In der ECCS-Empfehlung wird angegeben, daß bei der Reihenanzahl von zylindrischen Konstruktionen bis zu einem Abstand von 7D ab dem 3. Zylinder für die

Querschwingungsbeanspruchung ein Vergrößerungsfaktor von 2 für den Querdruck anzusetzen ist. Bei Abständen größer 7D und kleiner 14D ist eine lineare Interpolation des Vergrößerungsfaktors zwischen 2 und 1 vorzunehmen. Die im Bild dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, daß für den Zylinder Nr. 3 die angegebene Grenze von 2 voll abgedeckt wird. Der empfohlene Wert von 1 für den Zylinder Nr. 2 ist zu gering angesetzt.



- Wirksamkeit von Abspannmaßnahmen

Bei diesen Versuchen wurde bei der Reihenanzordnung von zwei, drei und vier Modellen und Anströmung in Richtung der gemeinsamen Achse der Modelle jeweils das erste Modell so fixiert, daß es keine Querschwingungen ausführen konnte. Gemessen wurden dann die Querschwingungsamplituden der nachfolgenden Zylinder. Diese Maßnahme führte beim 2. Zylinder zu einer Reduzierung, verglichen mit dem Fall des nicht abgespannten ersten Zylinders. Für den 3. Zylinder ist jedoch eine starke Zunahme zu verzeichnen. Beim 4. Zylinder trat kein wesentlicher Unterschied auf.

Peter Adler und Gerhard Hirsch

Dämpfung winderregter Schwingungen von Stahlschornsteinen
in Gruppenanordnung

BAUTECHNIK Heft 7, Juli 1986

Das Problem der winderregten Schwingungen wurde bei einem Stahlschornstein, der versetzt in Hauptwindrichtung zu zwei parallel angeordneten Schornsteinen steht, beobachtet. Bewegungen des Schornsteinkopfes von ± 110 mm wurden in 80 m Höhe gemessen. Es lag eine Gefährdung der Standsicherheit vor, so daß eine Sanierung durch den Einbau eines Schwingungsdämpfers durchgeführt werden mußte. Nach der Sanierung blieb der Schornstein sowohl bei kritischen (Wirbelresonanz) als auch bei maximalen Windverhältnissen in Ruhe.

Die instationären Windkräfte, die für die Schwingungsanregung sowohl für freistehende einzelne als auch für Stahlschornsteine in Gruppenanordnung ursächlich sind, werden durch die Schwingbewegung modifiziert bzw. erst hervorgerufen. Während die dynamische Reaktion des runden Einzelschornsteins unabhängig von der Windrichtung behandelt werden kann, gilt diese Annahme nicht für Reihen- oder Gruppenanordnungen. Im einzelnen ist zwischen den folgenden Schwingungsarten zu unterscheiden:

- a) Wirbelresonanzanregungen, wobei die kritische Windgeschwindigkeit gegenüber dem freistehenden Einzelschornstein ($v_{kr} = 5 \cdot D$) erhöht wird. Bei Abständen von mehr als dem 15fachen des Durchmessers geht der Einfluß verloren, bei sehr engen Abständen A kann die kritische Windgeschwindigkeit um bis zu etwa 40 % ($A/D \leq 3$) ansteigen. Der aerodynamische Erregerkraftbeiwert kann infolge der Gruppenanordnung ansteigen, wobei im Falle kleiner Abstände Erhöhungen von etwa 50 % in Kauf zu nehmen sind.
- b) Interferenz-Galloping, welches bei nicht gekoppelten, engstehenden Schornsteinen auftritt und durch eine gegenphasige Bewegung zweier benachbarter Schornsteine gekennzeichnet ist. Es handelt sich um eine selbsterregte Schwingung, die im Falle schwacher Strukturdämpfung auch bei relativ geringen Windgeschwindigkeiten auftreten kann. Werden bei sehr eng stehenden Schornsteinen feste Verbindungen untereinander gewählt, so kann das klassische Galloping auftreten. Der durch die Verbindung entstehende "Gesamtquerschnitt" ist aerodynamisch nicht

mehr rotationssymmetrisch und kann infolge negativer Seitenkraftgradienten instabil werden (analog dem Abreißflattern der Tragflächen eines Flugzeuges).

- c) Buffeting, welches sowohl die unregelmäßigen (stochastischen) Reaktionen in Windrichtung verstärken als auch resonanzartige Schwingungen hervorrufen kann. In diesem Fall winderregter Schwingungen muß die Wirkung aerodynamischer Maßnahmen zur Abminderung der dynamischen Reaktionen kritisch beleuchtet werden [3]

Beginnt der mit Maßnahmen versehene Schornstein durch turbulente Erregung zu schwingen und erreicht die Schwingamplitude die Größenordnung der seitlichen Erstreckung der aerodynamischen Störelemente, so springt die Wirbelstraße plötzlich an den schwingenden Schornstein heran und die Schwankungen bauen sich zu Werten auf, welche nahezu denen des Schornsteins ohne Maßnahmen entsprechen.

Auf dem Bild ist der Lageplan und der Schornstein dargestellt. Zur Vermeidung von winderregten Schwingungen wurde der Schornstein mit Störstreifen (Spoilern) versehen. Die Störelemente sind in der Form einer eingängigen schraubenförmigen Wendel angeordnet. Es wäre von Interesse, ob die Erregerkräfte dadurch überhaupt abgemindert werden können. In der Praxis hat sich die Scrutonwendel durchgesetzt. Sie wird in den BS (British Standards) als aerodynamische Maßnahme vorgeschlagen. Ihre Abmessungen wurden genormt. Die optimale Wendel nach Scruton ist dreigängig und hat eine Ganghöhe von 4,5 mal dem Durchmesser sowie eine Breite von mindestens 10 % dieses Durchmessers. Im Normalfall erstreckt sich die Scruton-Wendel über ein Drittel der Schornsteinhöhe vom Schornsteinkegel aus gemessen. Nachteilig wirkt sich die Erhöhung des Widerstandes auf etwa den doppelten Wert aus. Bei einer Reihenordnung kann die Wirkung auch einer derartigen optimalen Maßnahme wegfallen.

Unter Zugrundelegung von Messungen an ausgeführten Stahlschornsteinen sowohl in Fällen von Einzelaufstellung als auch bei Reihen- bzw. Gruppenanordnung und der parallel dazu vorgenommenen theoretischen Untersuchungen kann folgende Abschätzung vorgenommen werden:

$\frac{y}{D} = 3,84 \cdot c_{lat} / S_c$ (Maximalwert); c_{lat} = aerodynamischer Seitentriebswert (im vorliegenden Fall 0,2)

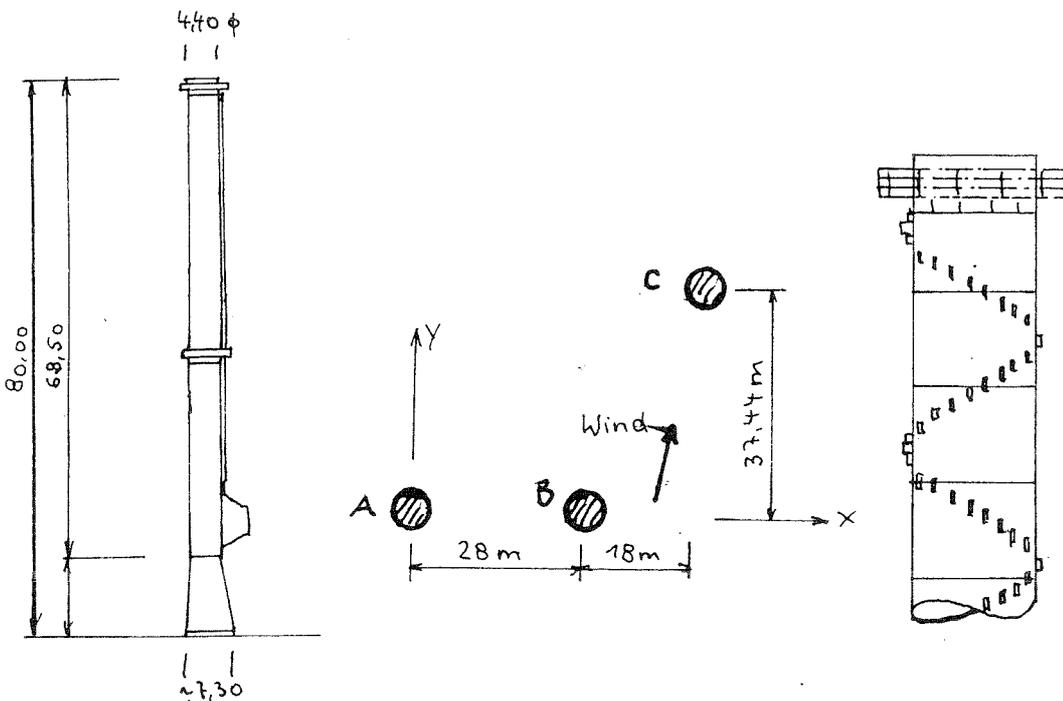
$$S_c = \text{Scruton Zahl} = \frac{2 \cdot m \cdot \delta}{\rho \cdot D^2}$$

m = Masse/Länge im oberen Drittel des Sch.

δ = log. Dekrement der Dämpfung

ρ = Dichte der Luft = 1,25 kg/m³

Beim Beiwert 3,84 der Formel ist ein Interferenzeffekt von 1,5 berücksichtigt worden. Er gilt nur für den Fall relativ kleiner Schwingamplituden. Bei größeren Bewegungen treten Selbststeuerungseffekte auf, die zu einem Anwachsen der Erregung führen. Die Schwingungen erfolgen dann - im Gegensatz zum Fall großer Dämpfung - annähernd sinusförmig.



Schornsteinabmessungen, Lageplan und zur Vermeidung von Schwingungen im oberen Bereich angeordnete Störstreifen (Spoiler)

Als Maßnahmen zur Herabminderung der winderregten Schwingungen wurde ein wartungsfreies Schwingungsdämpfersystem, das KABE-System [4.] gewählt.

In der Dissertation [5] die am Institut für Leichtbau der RWTH Aachen entstanden ist, wird die Theorie des Schwingungsdämpfers umfassend aus heutiger Sicht behandelt.

Über praktische Erfahrung mit der Anwendung von wartungsfreien Schwingungsdämpfern berichtet Hirsch [6, 7].

H. Sockel

Aerodynamik der Bauwerke

Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1984

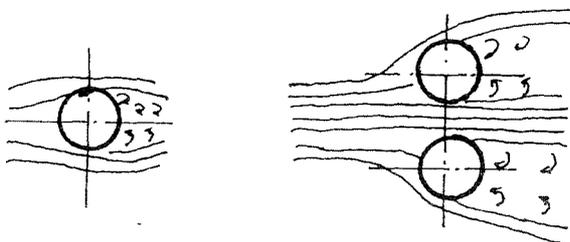
Die wechselseitige strömungstechnische Beeinflussung spezieller Baukörper kann beispielsweise bei Schornsteinen, Türmen oder Stäben in einem Fachwerk erfolgen, die, in Windrichtung gesehen, neben- oder hintereinander liegen. Im ersten Fall spricht man vom Verdrängungseffekt, im zweiten vom Windschatten- oder auch Nachlaufeffekt.

- Verdrängungseffekte: Beim Einzelzylinder liegt ein symmetrisches Stromlinienbild vor, dieser Zylinder erfährt daher nur eine Kraft in Strömungsrichtung. Sind jedoch zwei Zylinder relativ nahe beisammen, so ändert sich das Stromlinienbild, wodurch auf jedem Einzelzylinder nicht nur ein Widerstand sondern zusätzlich auch eine Querkraft wirkt. Die größten Strömungskräfte wirken auf einen Zylinder wenn die Zylinder nebeneinander angeordnet sind [8].

Dabei ist das Strömungsfeld aber nicht stabil, wodurch die Kraftwirkungen auf die Zylinder nicht gleich groß sind und mit der Zeit wechseln können. Die größere Kraft kann dabei bis zu 60 % höher sein als die, die auf den Einzelzylinder wirkt.

Da sich der örtliche Kraftbeiwert infolge der endlichen Länge eines auf dem Boden stehenden zylindrischen Bauwerkes mit der Höhe ändert, können die örtlichen Beiwerte in Bodennähe noch höher sein [9]. Diese höheren Belastungen treten bei Schornsteinen für Verhältnisse von Mittenabstand e zu Durchmesser d von $e/d < 1,5$ und $2,5 < e/d < 3,5$ auf [8].

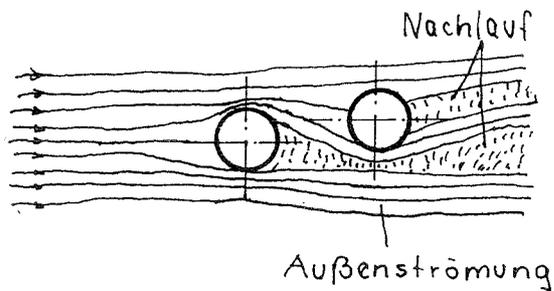
Einen ähnlichen Einfluß hat auch eine Wand oder der Boden auf die Umströmung eines Körpers.



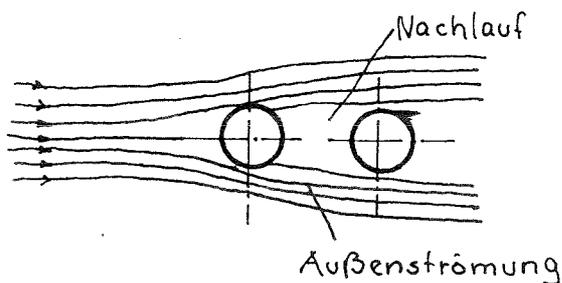
Symmetrische Umströmung eines Zylinders und unsymmetrische Umströmung der Zylinder bei paarweiser Anordnung.

- Windschatteneffekte

Im Nachlauf eines Bauwerkes sind die mittleren Geschwindigkeiten kleiner als die der Anströmung und sehr turbulent. Diese Effekte nehmen mit zunehmendem Abstand hinter dem Körper ab. Wenn nun ein anderer Körper in diese ungleichförmige Strömung kommt, also im Windschattengebiet eines anderen Körpers steht, dann ist die Kraftwirkung dieser Strömung auf den Körper eine ganz andere als die einer Parallelströmung. Bei einer seitlichen Versetzung tritt bei einem Winkel von etwa 10° schlagartig ein anderes Stromlinienbild auf. [10] Der stromab liegende Zylinder erfährt dadurch nicht bloß eine geänderte Widerstandskraft, sondern auch eine Querkraft, die der Anlaß für Querschwingungen sein kann.

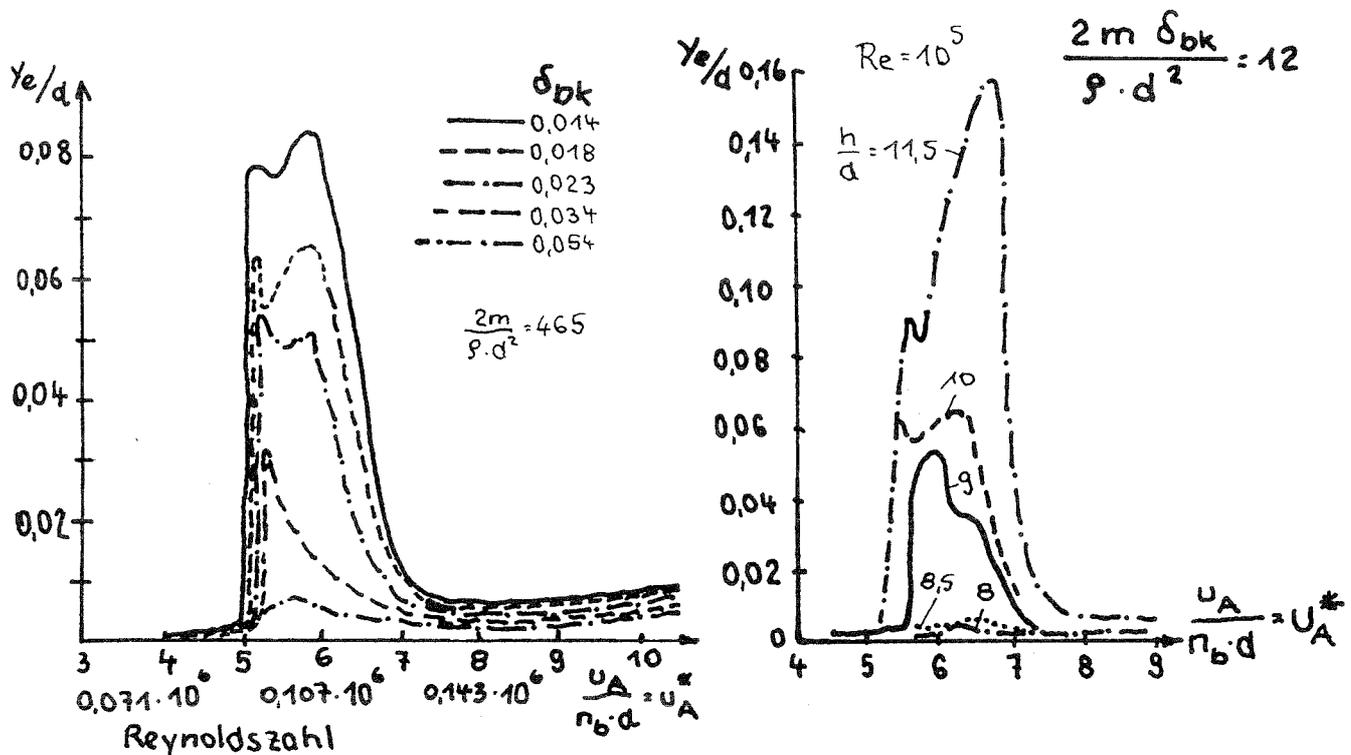


Änderung des Strömungsbildes durch seitliche Versetzung der Zylinder.



Wirbelerregte Schwingungen - Experimentelle Ergebnisse

Im Grenzschichtprofil sind die Amplituden geringer als bei konstanter mittlerer Anströmgeschwindigkeit mit Turbulenz. Durch die ungleiche Geschwindigkeit längs der Zylinderachse ist auch die Wirbelablösefrequenz unterschiedlich, und damit erfolgt die Anregung in einem breiten Frequenzband. Die Ausströmung aus der Schornsteinmündung wirkt ähnlich wie ein etwas höherer Schornstein, strömungstechnisch kann man daher von einer scheinbaren Erhöhung sprechen.



Durch die Erhöhung des logarithmischen Dekrementes δ_{bk} kann eine erhebliche Reduktion der Schwingungsamplituden erzielt werden.

Bei $h/d < 8,5$ treten praktisch keine Schwingungen mehr auf. Untermuert von zahlreichen Experimenten geben Lyons und Wotton [11] an, daß Schornsteine stabil sind, wenn mindestens eine der folgenden Voraussetzungen erfüllt ist.

$$h/d \leq 8 \text{ oder } c_b^* = \frac{2 \cdot m \cdot \delta_{bk}}{\rho \cdot d^2} \geq 25$$

Diese Grenzwerte hängen natürlich streng genommen von der Reynolds-Zahl ab. Für die üblichen Durchmesser von Schornsteinen und ähnlichen zylindrischen Bauwerken kann man jedoch die obigen Werte verwenden, wenn auch manchmal etwas höhere Grenzwerte zu finden sind [12]

Für quadratische Querschnitte gibt Whitbread [12] als Grenzwert für den Dämpfungsparameter $c_b^* > 150$ an.

Bei der mathematischen Beschreibung, die verschiedenen Normen zugrundeliegt, wird die aerodynamische Kraft als äußere Kraft quer zur Anströmung aufgefaßt. Die Amplitude der pro Längeneinheit wirkenden Querkraft ist

$$F_0 = c_Q \cdot \rho \cdot \frac{U_A^2}{2} \cdot b$$

Handelt es sich um ein System mit einem Freiheitsgrad, so ist die Amplitude der Auslenkung für den Resonanzfall

$$y_0 = \frac{\pi}{\delta_{bk}} \cdot \frac{1}{K_b} \cdot c_Q \cdot \rho \cdot \frac{U_A^2}{2} \cdot b$$

Die pro Längeneinheit wirkende statische Ersatzlast, die die gleiche Auslenkung y_0 hervorruft, ist daher

$$F_{st} = \frac{\pi}{\delta_{bk}} \cdot c_Q \cdot \rho \cdot \frac{U_A^2}{2} \cdot b$$

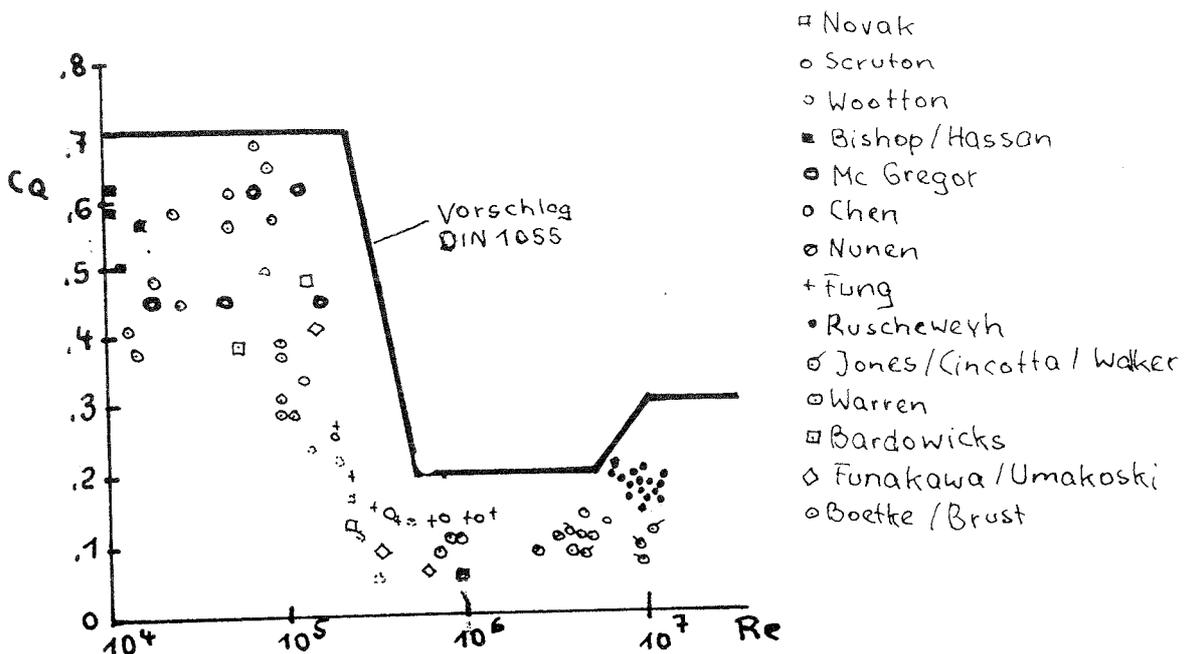
Auch im Falle eines Systems mit mehreren Freiheitsgraden wird diese statische Ersatzlast näherungsweise zur Ermittlung der Beanspruchungen bei Schwingungen in der ersten Eigenform herangezogen [13]

Dieser Rechengang ist nicht nur aus aerodynamischer Sicht nicht einwandfrei, sondern vor allem deswegen, weil eine Dauerwechselbeanspruchung durch eine statische Belastung ersetzt wird.

Das Bild stellt zahlreiche gemessene c_Q -Werte für den glatten Zylinder, die als Funktion der Reynolds-Zahl aufgetragen sind, den Vorschlag der DIN 1055 Teil 4 für c_Q -Werte gegenüber.

Vandeghen [14] empfiehlt $c_Q = 0,1$ für den Einzelschornstein, für Schornsteinreihen mit Mittenabständen $e/d < 7$ wird $c_Q = 0,2$ angegeben. Für den quadratischen Querschnitt kann man $c_Q = 0,5$, für ein Zwölfeck $c_Q = 0,4$ setzen [15]. Bei konischen Bauwerken wird empfohlen, die Anregung nur auf einer Länge anzusetzen, längs der die Querschnittsdurchmesser von ihrem Mittelwert um

± 5% abweichen [13]. Novak [16] verwendet neben einer bestimmten Frequenz ein kontinuierliches Spektrum als Erregerfunktion, wobei das Verhältnis der Anteile der beiden von der Re-Zahl abhängt. Mit diesen beiden Eingangsfunktionen wird das Schwingungsverhalten des Zylinders ermittelt.



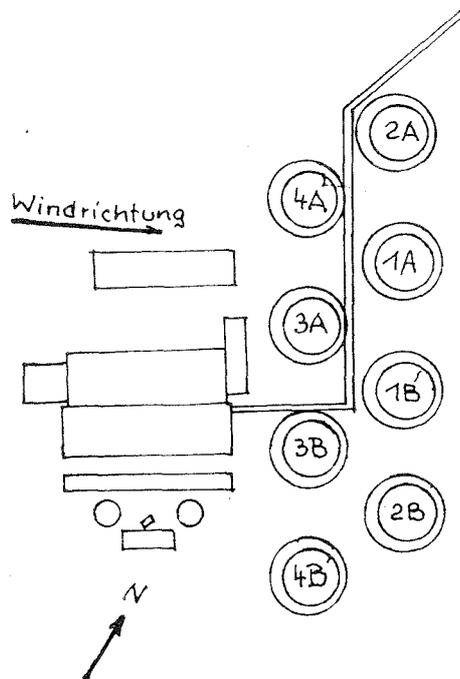
Schwingungen durch Interferenzeinfluß

Durch wechselseitige strömungstechnische Beeinflussung werden nicht nur die Windlasten eines Körpers gegenüber des Einzelkörpers stark verändert, sondern an elastischen Körpern können auch Schwingungen angefacht werden. Solche Erregungen treten vor allem dann auf, wenn ein Körper ganz oder zum Teil im Nachlauf eines anderen Körpers liegt. Dies ist eine Zone mit hoher Turbulenz, in der auch regelmäßige Wirbel auftreten können. In dieser instationären Strömung können verschiedene Anfachungsmechanismen wirksam werden, auch solche, die beim Einzelkörper gleicher Gestalt nicht auftreten.

Das wohl spektakulärste Beispiel ist das des Versagens der Kühltürme von Ferrybridge (England) im Jahre 1965.

Die Türme 1A und 1B stürzten etwa 10 min nach Sturmbeginn ein, Turm 2A versagte 40 min später.

Untersuchungen mit Kunststoffmodellen zeigten, daß in der Schale Querschnittsdeformationsschwingungen (Ovalling) auftraten und daß letzten Endes die Resonanzspannungen zum Bruch führten. In Übereinstimmung mit den Berichten der Untersuchungskommission wurde auch bei Experimenten festgestellt, daß die hohen Zugspannungen in Meridianrichtung im unteren Bereich der Türme zum Versagen führten.



vereinfachter Grundriß des Kraftwerkes Ferrybridge C

Häufig sind auch Schwingungen infolge Interferenz bei zylindrischen Türmen, Schornsteinen [16] und Bündelleitern [17] In [16] handelt es sich um 7 Türme in Reihe, wobei aber die Türme 2 und 3 die größte Schlankheit aufweisen ($d = 3,05$ m; $h = 70$ bzw. 75 m) und daher auch nur bei diesen beiden Schwingungen beobachtet werden.

In [19] wurden bei Messungen des Kraftspektrums eines Zylinders im Nachlauf eines anderen mit unterschiedlichen Durchmessern ebenfalls zwei Maxima festgestellt.

Über 15 m/s zeigte sich eine aerodynamische Instabilität (galloping) in einem Winkelbereich $10^\circ < \beta < 30^\circ$, wobei die Amplitude in Querrichtung sogar größer als der Durchmesser wurde. Es handelt sich dabei um eine Anfachung, die beim einzelnen Kreiszyylinder nicht auftritt. Sowohl bei dieser Instabilität als auch bei der Wirbelerregung im Nachlauf sind die Amplituden wesentlich größer als die des Einzelkörpers, was bei Schwingungen durch Interferenzeinfluß häufig der Fall ist.

In [10] werden Versuche an zwei gleichen Schornsteinen ($h/d = 13$, Mittenabstand $e/d = 1,5 \dots 3,0$) beschrieben. Es zeigen sich Schwingungen beider Zylinder infolge Wirbelerregung quer zur Anströmung im Winkelbereich $\beta < 5^\circ$. Bei $\beta > 5^\circ$ beginnen Schwingungen durch Instabilität (galloping), wobei je nach Abstandsverhältnis e/d und Winkel β der leeseitige Zylinder nahezu kreisförmige Bahnen beschreibt, oder auch nur in Querrichtung schwingt. Jedenfalls sind die Amplituden des luvseitigen Zylinders wesentlich kleiner und können bei speziellen Anordnungen auch ganz verschwinden. Derselbe Effekt tritt bei konischen Schornsteinen auf [19]. Bei 4 Schornsteinen in Reihe liegt die maximale Amplitude je nach Abstand und Anströmwinkel bei einem der drei leeseitigen Schornsteinen, aber auch die Amplitude des luvseitigen Schornsteins kann größer als die des identischen Einzelschornsteins werden [20].

Nach Versuchen und Rechnungen von Vickery [21] nimmt das Verhältnis von Amplitude im Nachlauf zur Amplitude des Einzelzylinders mit steigender Dämpfung zu. Diese Experimente wurden mit einer Reihe von 4 Zylindern ($e/d = 4$, $h/d = 20$) gemacht, bei der jeweils nur ein Modell flexibel war. Dies kann aber wesentlich andere Resultate ergeben, als wenn alle Modelle der Reihe beweglich sind [22].

Ab welchen Abständen e/d keine Erhöhung der Amplituden gegenüber dem Einzelzylinder auftritt, hängt vom Dämpfungsparameter c_b^* und vom Verhältnis h/d ab.

- dimensionslose Größe $c_b^* = \frac{C_b}{\rho \cdot n_b \cdot b^2}$

C_b = Biegedämpfung der Konstruktion
(Schwingungsgleichung $m \cdot \ddot{x} + C_b \cdot \dot{x} + K_b \cdot x = 0$)

= $\delta_{bk} \cdot 2 \cdot m \cdot n_b$

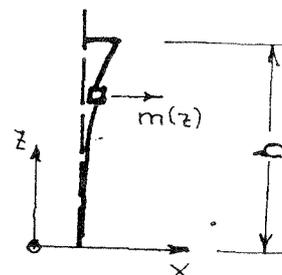
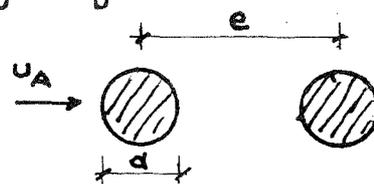
m = Masse pro Längeneinheit

b = charakteristische Abmessung des Körpers

ρ = Dichte der Luft

δ_{bk} = logarithmisches Dekrement der Dämpfung

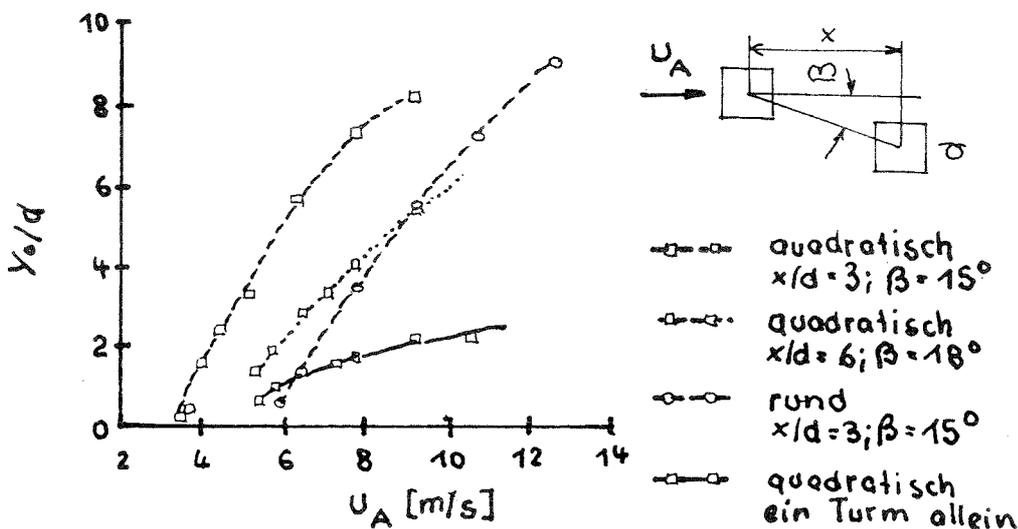
n_b = Eigenfrequenz



Für $h/d = 24$ zeigen Versuche mit $C_b^* = 8,5$ bereits bei $e/d = 4$ keinen Einfluß des Nachlaufes mehr [22], während bei Modellen mit Scruton-Wendeln und $C_b^* = 3,3$ der Einfluß erst bei $e/d = 23$ abklingt [23]. Eine Kopplung von Schornsteinen in Reihe durch eine Plattform bewirkt nur eine unwesentliche Reduktion der Amplitude des vierten Schornsteines, erhöht aber die Amplitude des ersten, luvseitigen Schornsteins wesentlich, so daß die Schwingungsenergie im System sogar erhöht wird [8].

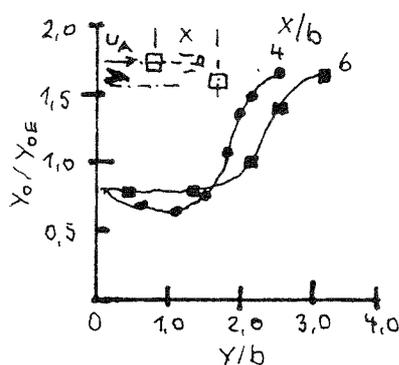
Bei wirbelerregten Schwingungen von Türmen und Schornsteinen im Nachlauf ist eine Scruton-Wendel zur Reduktion der Schwingungsamplituden wenig geeignet. Ein perforierter Mantel kann sogar zu höheren Amplituden führen [24]. Nur mit einer Ummantelung in Form eines Käfigs aus kreiszylindrischen Stäben können auch Schwingungen bei Zylindern in Tandemanordnung unterdrückt werden [25]. Als wirksames Mittel können auch hier dynamische Schwingungstilger eingesetzt werden [16].

Der quadratische Querschnitt weist auch schon als Einzelbaukörper aerodynamische Instabilität auf, die Amplituden beim leeseitigen Baukörper im Falle einer Tandemanordnung sind jedoch wesentlich größer.



Amplituden von Trägern mit quadratischem bzw. runden Querschnitt.
($h/d = 10$)

Bei dem im Bild dargestellten Beispiel [26] ($h/d = 10$, turbulenzarme Anströmung) ist außerdem beim Turm im Nachlauf die Grenzgeschwindigkeit, ab der Schwingungen auftreten, kleiner als beim Einzelturm. Zum Vergleich sind die Ergebnisse für einen kreiszylindrischen Turm mit demselben Verhältnis h/d ebenfalls eingezeichnet. Auch in einer atmosphärischen Grenzschicht zeigen sich bei Türmen mit quadratischen Querschnitten in einem gewissen Bereich wesentlich größere Amplituden y/d in Querrichtung als beim Einzelturm [27].



Verhältnis der Amplitude y_0 im Nachlauf zur Amplitude y_{0E} des Einzelturmes mit quadratischem Querschnitt [27].

Eine Anordnung von zwei quadratischen Prismen mit den Mittenabständen $e/d = 2$ und 4 in turbulenzarmer Strömung zeigt hingegen auch bei verschiedenem Anströmwinkel keine wesentliche Amplitude beim leeseitigen Prisma, sondern eine aerodynamische Instabilität beim luvseitigen Prisma im Anströmwinkelbereich $0^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$. Diese Ergebnisse scheinen im Gegensatz zu den oben erwähnten Resultaten zu stehen. Es ist jedoch zu beachten, daß bei den zuletzt erwähnten Versuchen das Verhältnisses h/d wesentlich kleiner war ($h/d = 0,75 \dots 3,75$) [28].

Messungen des Basismomentes bei einem quadratischen Quadermodell mit $h/d = 4,1$ in einer Grenzschichtströmung ergaben wesentliche Erhöhungen der dynamischen Lasten, die durch Anordnung von zwei gleichartigen Gebäuden stromauf (deren gegenseitiger Abstand normal zum Wind $5d$ betrug) noch gesteigert wurden. In diesem letzten Fall betrug das Verhältnis des Effektivwertes des Momentes in Gruppenanordnung zu den in Einzelanordnung $2,15$ [29].

Diese wenigen Ergebnisse zeigen, daß im Falle von Schwingungen im Nachlaufgebiet eine allgemeine Vorhersage schwierig ist. Sie zeigen auch, daß erhöhte Vorsicht am Platze ist, da die Ampli-

tuden solcher Schwingungen wesentlich größer als beim identischen Einzelkörper sein können. Es können auch wie im Falle des kreiszylindrischen Querschnitts Schwingungen auftreten, die es beim Einzelkörper gar nicht gibt (galloping). Falls bei einer Gruppenanordnung von Baukörpern (Türme, Schornstein) auf Grund der Anordnung bzw. der Elastizität der Bauwerke solche Schwingungen zu erwarten sind, sollten entweder eingehende aeroelastische Experimente gemacht oder mechanische Schwingungstilger vorgesehen werden.

H. Ruscheweyh

Dynamische Windwirkung an Bauwerken

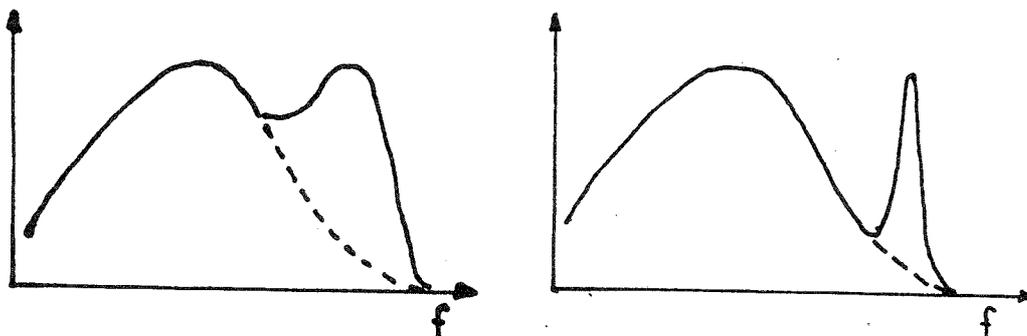
Band 2: Praktische Anwendungen

Bauverlag GMBH - Wiesbaden und Berlin 1982

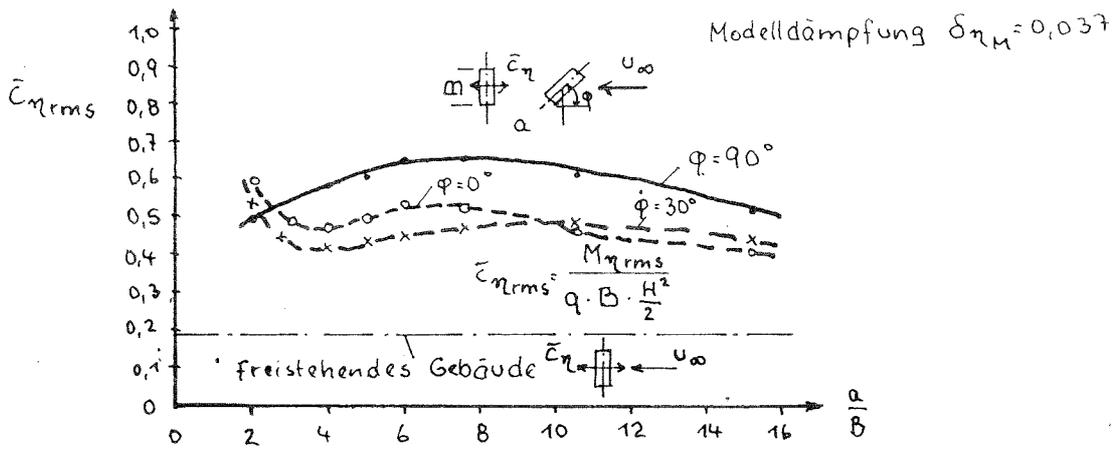
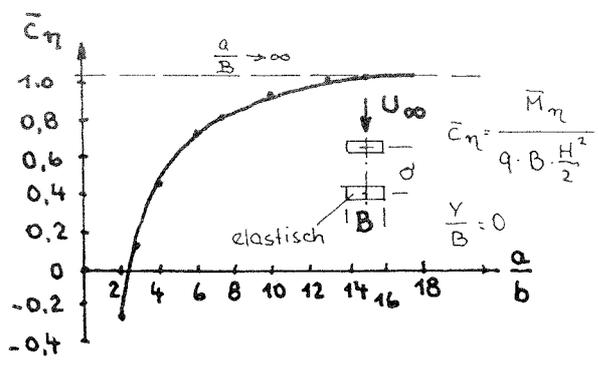
- Abschnitt 4.1.6. Nachlaufturbulenz

Die Umströmung eines Gebäudes führt infolge der Strömungsablösungen zu verstärkten Turbulenzen im Strömungsnachlauf. Diese Turbulenzen können stochastischer Natur sein, sie können aber auch aus regelmäßigen Wirbeln bestehen. Letzteres ist z.B. verstärkt im Zylindernachlauf der Fall.

Das Böenspektrum wird durch diese Nachlaufturbulenz verändert. Es erfährt, wie in den Bildern angegeben, einen Energiezuwachs in bestimmten Frequenzbereichen. Allgemeine Zahlenangaben sind kaum möglich, da der Ablösevorgang von vielen Parametern beeinflusst wird. Für genauere Rechnungen wird man auf Windkanalversuche zurückgreifen müssen.



In neuerer Zeit wurde diesem Problem verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt, und einige systematische Untersuchungen sind durchgeführt worden. Wegen der zahlreichen möglichen Variationen der Gebäude und deren geometrischen Zuordnungen sind solche Untersuchungen hauptsächlich auf einfache Versuchskörper beschränkt geblieben (quadratischer Grundriß [29, 30], rechteckiger Grundriß [31, 32], sternförmiger Grundriß [32] und stufenförmiges Haus [32]).



Der Interferenzeffekt ist in zweifacher Hinsicht wirksam: Einmal tritt ein Abschattungseffekt auf, der die stationäre Windlast erniedrigt und zum anderen wird die dynamische Reaktion infolge erhöhter Turbulenz verstärkt. Der Abschattungseffekt nimmt mit zunehmendem Abstand rasch ab, während die dynamische Reaktion mit zunehmendem Abstand zuerst noch zunimmt, um dann erst ganz allmählich abzufallen. Die Summe aus stationärer Last unter Berücksichtigung des Abschattungseffektes und aus der erhöhten dynamischen Reaktion ergibt die resultierende Bauwerksreaktion mit Interferenzeinfluß, die bei ungünstiger Konstellation größer sein kann als beim freistehenden Einzelgebäude.

Sind aus Versuchen die stationären und instationären Beiwerte \bar{c}_n und $\tilde{c}_{n\text{rms}}$ bekannt, kann unter Anlehnung an das Davenport'sche Windlastkonzept und mit einer realistischen Bauwerksdämpfung ein Interferenzfaktor J_F bestimmt werden, der das Verhältnis der resultierenden Bauwerksreaktion mit Interferenzeinfluß zu der ohne Interferenzeinfluß angibt. Wie in [32] näher dargestellt ist, ergibt sich

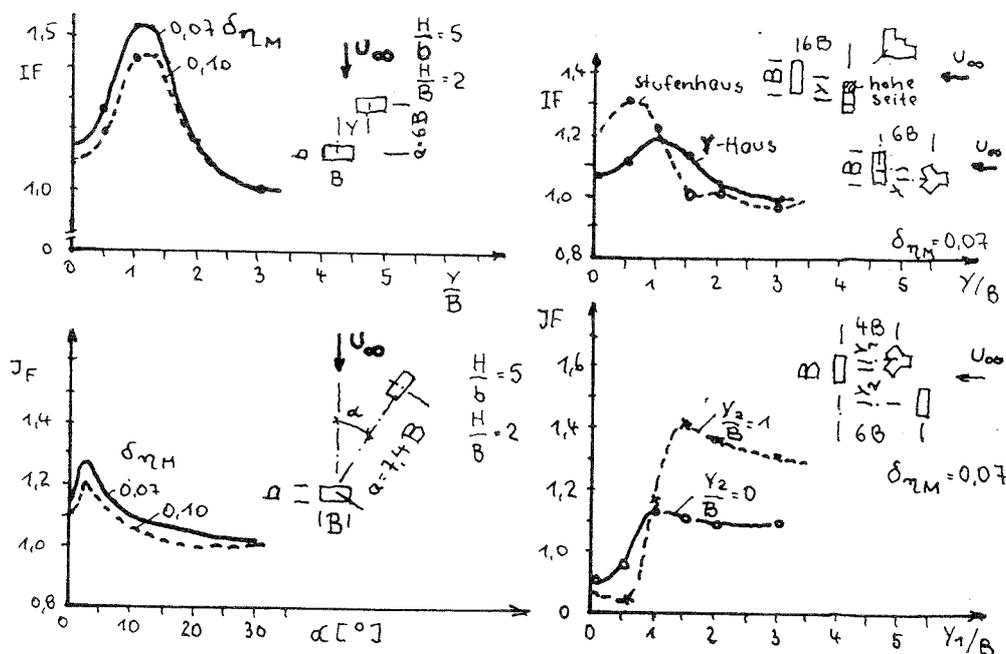
$$J_F = \frac{\bar{c}_n + 3 \tilde{c}_{n\text{rms}} \cdot \psi_n}{\bar{c}_{n\text{isol.}} + 3 \tilde{c}_{n\text{rms isol.}} \cdot \psi_n}$$

worin der Index $\delta_{isol.}$ die Werte für ein freistehendes Einzelgebäude und der Faktor

$$\psi_{\eta} = \sqrt{\frac{\delta_{\text{Modell}}}{\delta_{\text{Original}}}} = \text{Dämpfungskorrekturfaktor}$$

bedeuten. Unter Annahme einer realen Bauwerksdämpfung

$\delta_{\text{Original}} = 0,07$ sind mit den in [32] enthaltenen Meßergebnissen für δ_{η} und $\delta_{\eta_{rms}}$ Interferenzfaktoren für verschiedene Baukörperanordnungen berechnet worden und in den nachfolgenden Bildern dargestellt.



Interferenzfaktoren verschiedener Anordnungen von Hochhäusern ($H/B = 2,0$; $H/b = 5$)

Der Interferenzfaktor gilt jeweils nur für einen schmalen, bestimmten Windrichtungssektor. Der Höchstwert des Interferenzfaktors muß nicht unbedingt mit der Richtung der größten Windstärke zusammenfallen.

- Abschnitt 4.6.1. Wirbelerregung benachbarter Kreiszyylinder
Sind zwei oder mehrere Kreiszyylinder in näherer Nachbarschaft zueinander angeordnet, so wird der Strömungsvorgang um diese Zylinder gegenüber dem Einzelzylinder verändert. Dies wirkt sich auf den Wirbelablösevorgang aus, der entweder verstärkt oder ganz

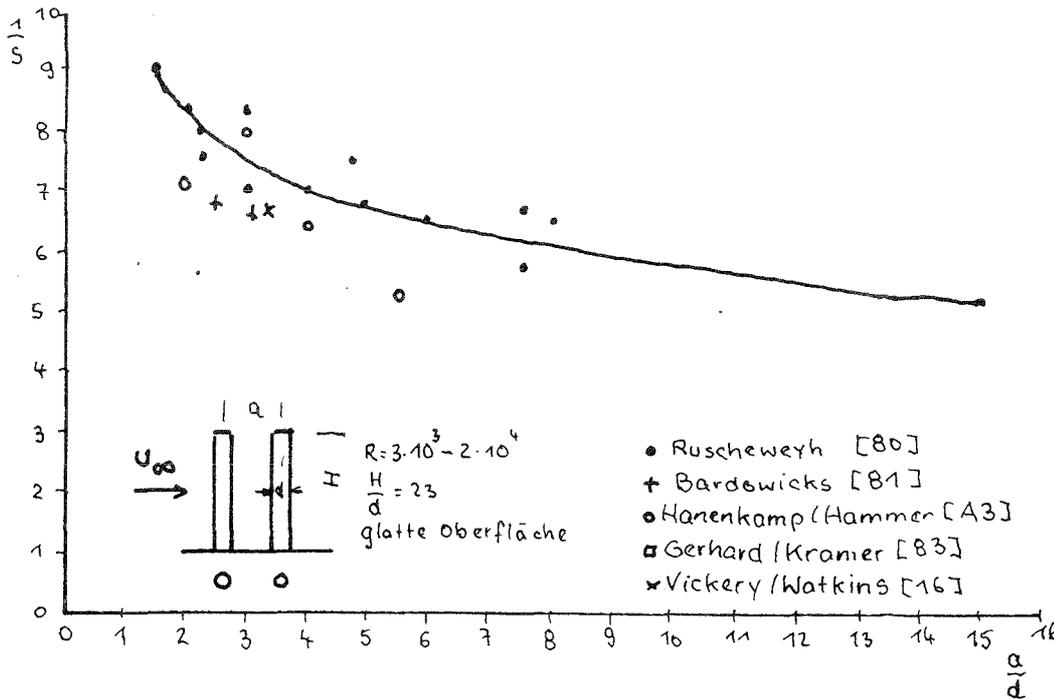
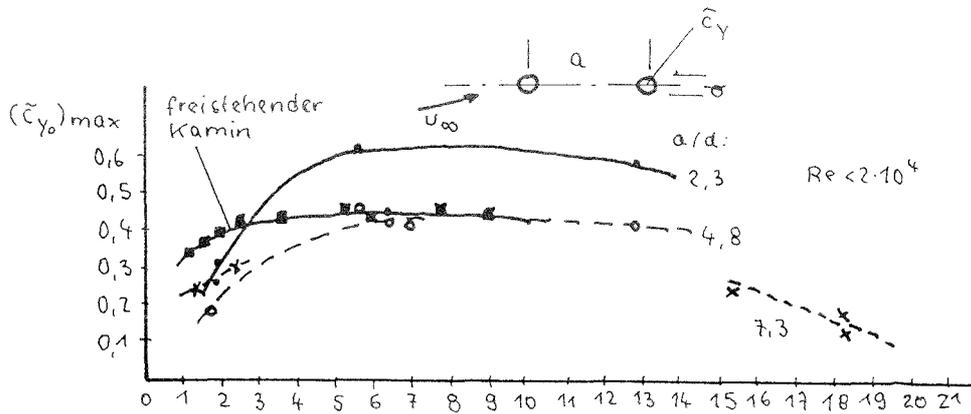
unterdrückt wird. Der Erregerkraftwert und die Strouhalzahl werden Funktionen der geometrischen Anordnung, insbesondere des Zylinderabstandes. Es treten mehrere verschiedene kritische Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Windrichtung auf / 32 /. Im Bild ist ein Beispiel für zwei Kragzylinder (Schornsteine) angegeben. Die Ergebnisse wurden aus Windkanalversuchen gewonnen / 32; 33 /. Der Kehrwert der Strouhalzahl nimmt mit abnehmendem Abstandsverhältnis a/d zu, was zu einer höheren kritischen Windgeschwindigkeit führt. Der Erregerkraftwert $\tilde{\sigma}_{y_0}$ hängt von der Schwingamplitude, und diese wiederum vom Massendämpfungsparameter M_δ ab. Bei Massendämpfungsparametern $M_\delta < 4$ sinken die Beiwerte wegen der dort wirksam werdenden aerodynamischen Nichtlinearitäten infolge der großen Schwingamplituden ab und fallen sogar unter die des freistehenden Kragzylinders. Im übrigen M_δ -Bereich muß für Abstandsverhältnisse $\frac{a}{d} \leq 4$ mit einer Erhöhung der Erregerkraftwerte gerechnet werden.

$$M_\delta = \frac{2 \cdot M \cdot \delta}{\rho \cdot d^2}$$

δ = logarithmisches Dekrement der Dämpfung
 ρ = Luftdichte
 y_0 = größter Schwingungsaussschlag einer Schwingungsform

$$\text{Generalisierte Masse} = M_{\text{gen.}} = \frac{\int_{x=0}^H m(x) \cdot \hat{y}(x)^2 \cdot dx}{\hat{y}_0^2} \approx \frac{\sum_{j=1}^N \Delta m_j \cdot \hat{y}_j^2}{\hat{y}_0^2}$$

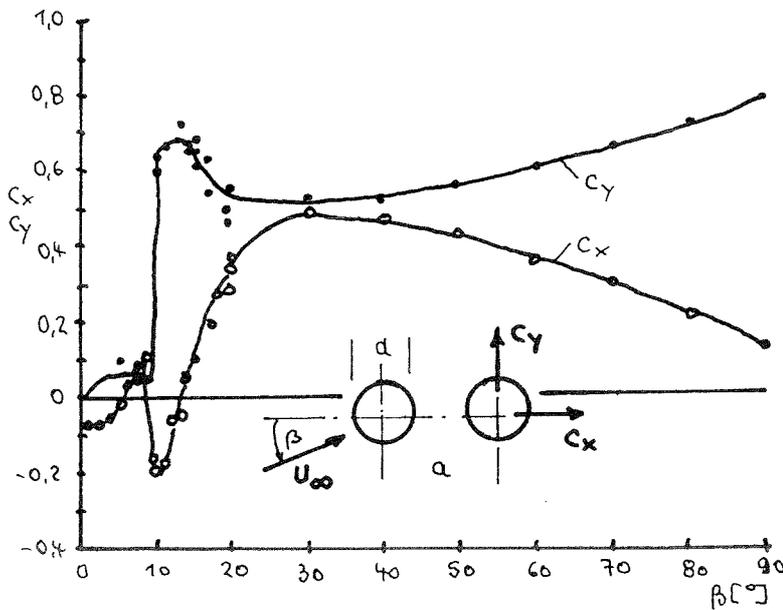
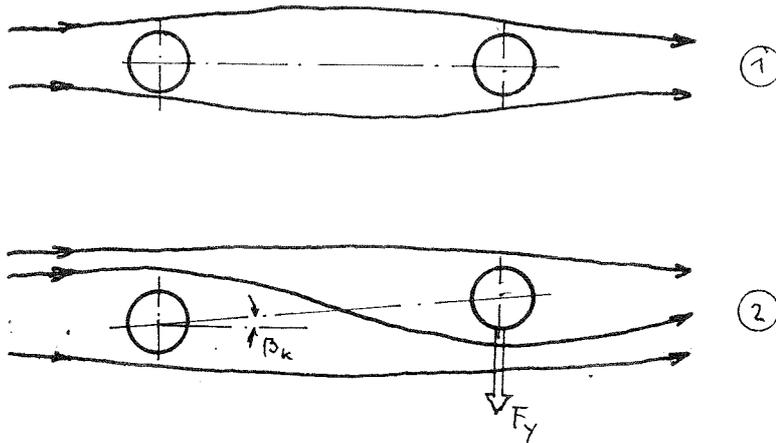
$$\text{Generalisierte Masse pro Längeneinheit } M = \frac{\int_0^H m(x) \cdot \left(\frac{\hat{y}(x)}{\hat{y}_0}\right)^2 \cdot dx}{\int_0^H \left(\frac{\hat{y}(x)}{\hat{y}_0}\right)^2 \cdot dx}$$



- Abschnitt 4.6.2. Interferenz - Galloping

Bei engstehenden Zylindern tritt eine weitere Instabilität auf, die in ihrer Erscheinungsform dem Galloping sehr verwandt ist. Grund dafür ist ein plötzliches Umschlagen der Strömung beim Überschreiten eines kritischen Anströmwinkels. Befindet sich nämlich der rückwärtige Zylinder im Strömungsnachlauf des luvseitigen Zylinders, wird auf ihn kaum eine Seitenkraft ausgeübt (Zustand ①). Beim Erreichen eines kritischen Anströmwinkels β_k schlägt die Strömung um und fließt mit hoher Geschwindigkeit durch die Lücke (Zustand ②). Der rückwärtige Zylinder erfährt auf Grund der Druckabsenkung an der der Lücke zugekehrten Seite eine hohe Seitenkraft ($-F_y$). Ist der Zylinder elastisch genug, wird er sich in die negative y -Richtung bewegen, der kritische Anströmwinkel wird unterschritten und der Strömungszustand ① tritt wieder ein. Dadurch wird der Zylinder entlastet, er schwingt

zurück über β_k hinaus, so daß der Zustand ② wieder eintritt. Dieser Wechsel geschieht im Takte der Eigenfrequenz des Zylinders.



Sowohl in Modellversuchen [132, 10] als auch an Originalschornsteinen [34] konnten heftige Interferenzgalloping-Schwingungen beobachtet werden.

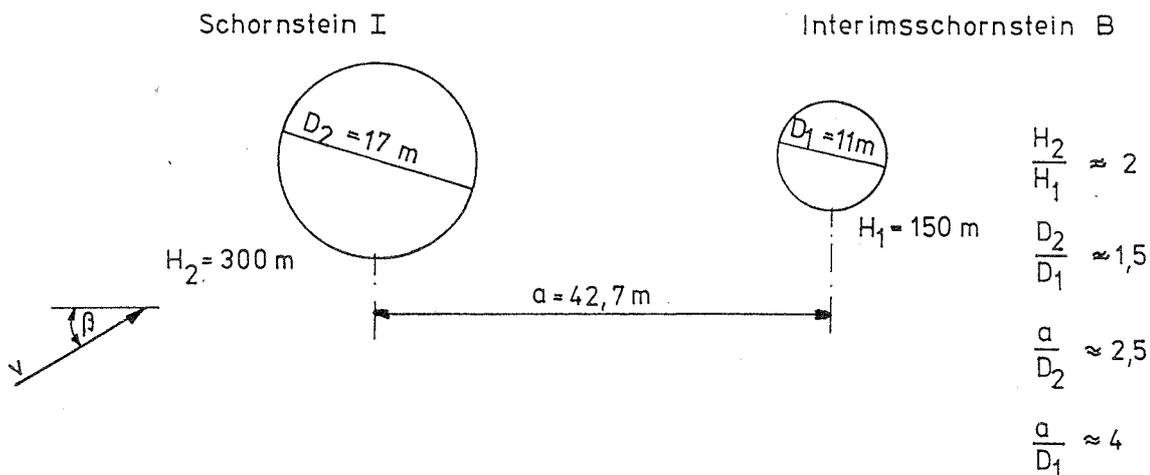
- Abschnitt 5.2.1.1 Einschränkung der Wirksamkeit von
aerodynamischen Maßnahmen gegen Wirbelerregung

Durch Beobachtung in Windkanalversuchen wurde festgestellt, daß sich im Strömungsnachlauf von Zylindern mit Scruton-Wendeln nach einer Distanz von ca. 4 - 6 x Durchmesser die Wirbelstraße wieder neu formiert. Beginnt dann der Zylinder mit größeren Amplituden zu schwingen ($y/d \geq 0,2$), springt die Wirbelstraße plötzlich an den Zylinder heran und die Schwingung verstärkt sich. Es treten wirbelerregte Amplituden wie bei Zylindern ohne Wendeln auf [23].

Dieser Fall kann z.B. bei Schornsteinen mit sehr kleinen Massendämpfungsparametern auftreten ($M \leq 6$). Die Neuformierung der Wirbelstraße hat weiterhin Bedeutung für Reihenordnungen von Kaminen. Trotz Wendeln erfahren die im Nachlauf stehenden Kamine eine erhöhte Erregung (Buffeting). Eine ähnliche Beobachtung wurde auch von Cox/Wong [36] gemacht, der mit Leitblechen versehene Kamine in Tandemanordnung untersuchte. Er stellte trotz aerodynamischer Maßnahmen (Leitbleche) bei Abständen von 6 - 7 Durchmessern Instabilität des rückwärtigen Modells fest. Ebenso berichten Beaumont/Walshe / 35 / über heftige Schwingungen von drei in Reihe stehenden 78 m hohen mit Wendeln versehenen Stahlkaminen.

Meiche, G.: Schadensfall an einem 150m hohen Stahlbeton-
schornstein
Zur Veröffentlichung eingereicht
"Windtechnologischer Gesellschaft - Berichte"
Oktober 1990

Am 24.11.1984 erfolgte der Einsturz eines 150m hohen Stahlbetonschornsteines im Kraftwerk Boxberg. Der eingestürzte Schornstein lag im Windschatten eines 300m hohen Stahlbetonschornsteines. Die Ergebnisse der vorgenommenen Schadensbegutachtungen ergaben, daß der Einsturz vorrangig infolge Schwingungen quer zur Anströmrichtung erfolgte. Die Bruchstelle in stark gezackter Form befand sich oberhalb der Fuchsöffnung in ca. 50m Höhe über Oberkante Fundament.



Zum Zeitpunkt der Havarie wurden in benachbarten Windmeßstationen Windgeschwindigkeitsspitzen bis zu 35m/s in 10m über Grund registriert. Die Windrichtung aus West-Südwest lag bei $\beta \approx 30^\circ$ zur Reihenachse.

Trätner, A.: Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnungen.

Zur Veröffentlichung eingereicht "Windtechnologische Gesellschaft - Berichte", Oktober 1990

Beschrieben werden Ergebnisse eines Forschungsvorhabens über winderregte Querschwingungen von Stahlbetonschornsteinen in Reihenanordnung, das aufgrund des Einsturzes eines 150m hohen Stahlbetonschornsteines im Kraftwerk Boxberg ausgelöst wurde. Die Windkanaluntersuchungen wurden im Windkanal der Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH durchgeführt.

Aufgrund der wirtschaftlichen Umwandlungen mußte diese Forschungsaufgabe vorzeitig abgebrochen werden.

Im Windkanal wurden "winderregte Querschwingungen von in Zweiergruppen angeordneten Kreiszyklindern" untersucht. Als Meßzylinder wurde ein aus Glasfaser-Laminat gefertigtes Kreiszyklinderrohr (Durchmesser 30, Länge 450) mit einer Wandstärke von 1,5mm verwendet. Das logarithmische Dekrement und die Scrutonzahl wurden Stahlbetonschornsteinen angepaßt ($\sigma = 0,05$; $M_R = 26$ und $\cdot 63$). Es wurden Kraftmessungen mit Dehnungsmeßstreifen am zylindrischen Bieeglied durchgeführt. Die Zylinder wurden zur Realisierung einer größeren effektiven Modellstreckung (Höhe/Durchmesser) mit Endscheiben abgeschlossen. Es erfolgte eine Variation des Durchmesser-, Höhen- und Abstandsverhältnisses sowie des Anströmwinkels zur Reihung. Die Messungen erfolgten im unterkritischen- und teilweise im modellierten transkritischen Bereich. Der transkritische Reynoldszahlbereich wurde mittels längs des Zylinders angebrachten Leisten ($4 \times 4\text{mm}^2$) bzw. von mit Klebeband aufgeklebten Drähten (Durchmesser 2,5mm), sowie mit Hilfe von Leiteinrichtungen modelliert. Es wurden Abstandsverhältnisse $a/d_1 = 3,25; 4; 5,05; 6,8$ und 10 sowie Anströmwinkel zur Reihung $\beta = 0^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$ realisiert.

(Index 1 = Modellzylinder, Index 2 = Blendenzylinder).

Bei den Windkanaluntersuchungen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Bei den Durchmesserhältnissen $d_2/d_1 = 1,0$ werden für Abstandsverhältnisse $a/d_2 = 10$ die Werte des Einzelzylinders unterschritten. Nur für kleine Abstandsverhältnisse $a/d_2 < 4$ werden die maximalen Beanspruchungen des Einzelzylinders bedeutend überschritten.
- Beim Durchmesserhältnis $d_2/d_1 = 1,5$ muß bereits bei $a/d_2 < 6$ mit einer Erhöhung der maximalen Beanspruchungen gegenüber dem Einzelzylinder gerechnet werden.
- Das Durchmesserhältnis der beiden Zylinder bestimmt wesentlich die Strouhalzahl. Die Querkraftbeiwerte werden durch das Höhenverhältnis der Zylinder beeinflusst. Der Nachlauf des im Anstrom stehenden Zylinders ist dafür die wesentliche Ursache. Wenn die Zylinderhöhe $H_2 > H_1$ ist, wird der im Nachstrom stehende Zylinder von gleichmäßigen abgehenden Wirbeln getroffen, die nicht durch die Kopfstörung beeinflusst werden. Die strömungsmechanisch ähnlichen Zylinderabstände werden bei $d_2 > d_1$ durch den Durchmesser des größeren im Anstrom befindlichen Zylinders bestimmt.
- Als Umrechnungsgrundlage für die Messungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich sollten grundlegende Konfigurationen der Doppelanordnung im modellierten transkritischen Reynoldszahlbereich benutzt werden.
- Beim Abstandsverhältnis $a/d_1 = 5$ treten Spitzen in den Beanspruchungen der Doppelanordnung auf. Dieses Phänomen bestätigt die von Krishaswamy [15] veröffentlichten Forschungsergebnisse.
- Bei kleinen Abstandsverhältnissen ($a/d_2 < 4$) dürften allgemeine Angaben über die auftretenden Lastwirkungen nur sehr schwer möglich sein.

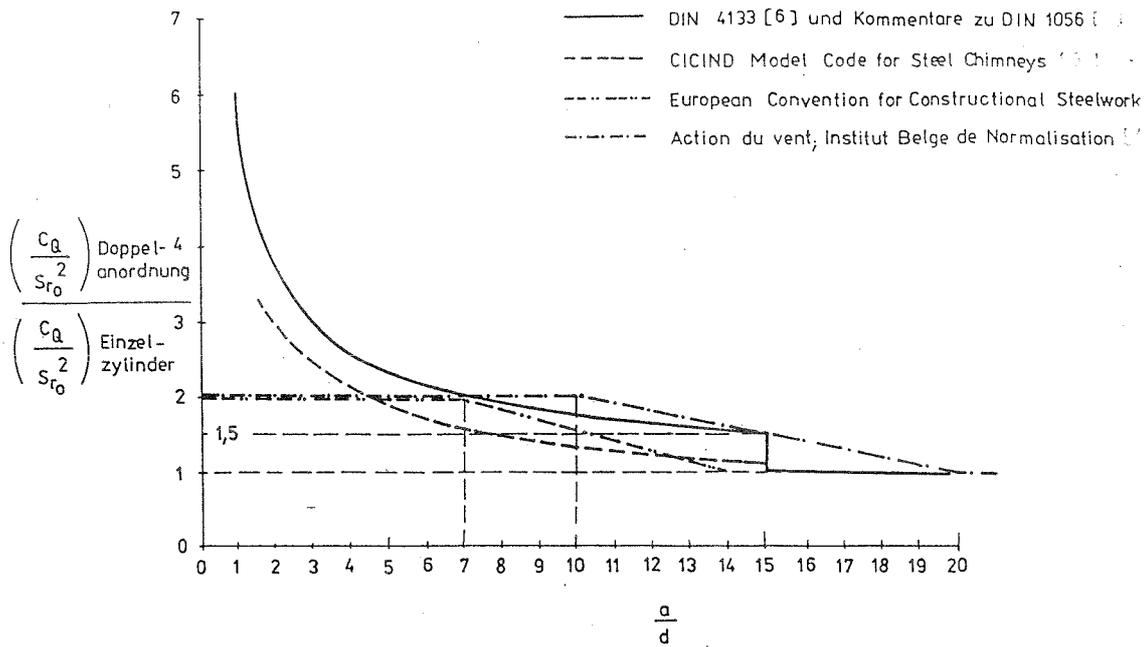


Bild 2/1: Zusammenstellung der in verschiedenen Vorschriften enthaltenen Annahmen für Erhöhungsbeiwerte (Doppel- zu Einzelanordnung)

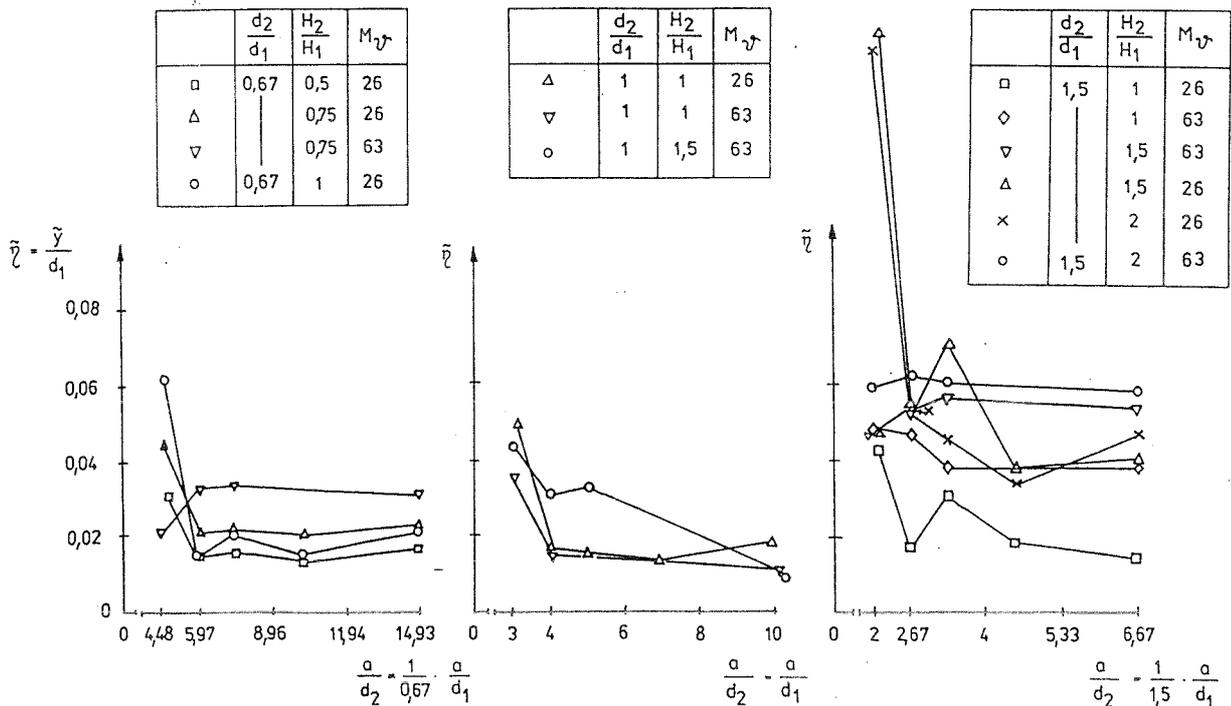


Bild 2/3: Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich (Schwingungsamplitude des im Nachstrom stehenden Zylinders)

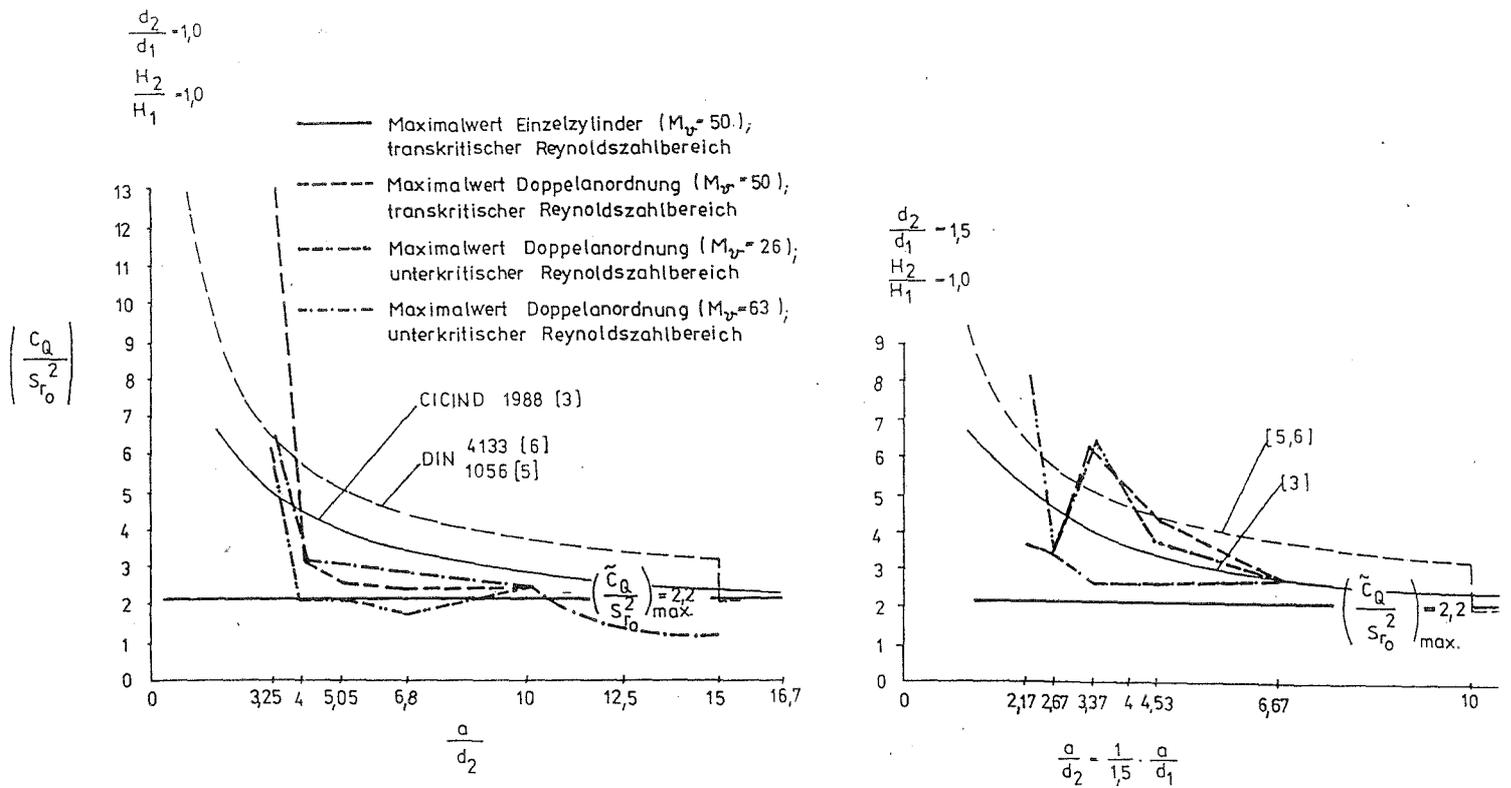


Bild 24: Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen im unterkritischen und transkritischen Reynoldszahlbereich

Literaturstellen, auf die in der Literaturlauswertung
hingewiesen wird :

- [1] Wordlaw, R.L.: Approaches the suppression of windinduced vibrations of structures, Preprints II Symposium on Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Karlsruhe, 1979, pp. 160-180.
- [2] Counihan, J.: A method of simulating a neutral atmospheric boundary layer in a wind tunnel, AGARD Conf.Proc., No.48, 1969.
- [3] Ruscheweyh, H.: Winderregte Schwingungen von Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung. VDJ Berichte Nr. 419, 1981. Technische-wissenschaftliche Information des KABE-Werkes.
- [4] Hirsch, G.: Practical experiences respective passive control of steel chimney vibrations by means of a new type of auxiliary damping system. Proc. 5th. Chimney Congress, Essen, October 1984. S. 155-160.
- [5] Wahle, M.: Beitrag zur passiven Kontrolle schwach gedämpfter elastischer Strukturen mittels dynamischer Schwingungsdämpfer. Dissertation, RWTH Aachen. Juli 1985.
- [6] Hirsch, G.: Passive Control of steel chimney vibrations originated by wind and earthquake. Proc. 4th. Ind. Symp. on Ind. Chimneys, The Hague, 1981, S. 111-126.
- [7] Hirsch, G.: Practical experiences in passive vibration control of chimneys - Conclusions from wind tunnel and full scale tests. Proc. of 2nd Int. Symp. Structural Control, University of Waterloo, Juli 1985
- [8] Gerhardt, H.J.Kramer, C.: Interference effects for groups of stacks. Proc. of the 4th. Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1980, Buildings Aerodynamics, Part. 2, S. 183-194.

- [9] Zdravkovich, M.M.: Aerodynamics of two parallel circular cylinders of finite height at simulated high Reynolds-number. Proc. of the 3rd Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1978, part. 2, pp. 137-150.
- [10] Ruscheweyh, H.: Winderregte Schwingungen zweier engstehender Kamine. Proc. 3rd. Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1978, Part. 2, pp. 175-184
- [11] Lyons, R.A., Woorton, L.R.: Wind induced oscillations of steel chimney stacks. Chimney Design Symp., Edingburgh, 1973 publ. von Atkins Res. & Dev., Surrey
- [12] Whitbread, R.E.: Practical solutions to some windinduced vibration problems. Nat. Phys. Lab. NPL Rep. Sci. R 124 (1975).
- [13] Canadian Structural Design Manual 1970, Supplement NO 4 to the Nat. Building Code of Canada, Ass. Committee on the Nat. Building Code, Nat. Res. Council of Canada, Ottawa.
- [14] Vandeghan, A., Alexandre, M.: Vibration des cheminées on acier sonst/action du vent. Ass. Int. des ponts et charpentes, Memoires voi. 29/1, S. 95-132 (1969).
- [15] Sachs, P.: Wind Forces in Engineering. Pergamon Press 1972, S. 141.
- [16] Cooper, K.R., Wordlaw, R.L.: Aeroelastic instabilities in wakes. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo 1971, S. 647-655.
- [17] Wardlow, R.L., Cooper, K.R., Scalon, R.H.: Observations on the problem of subspan oscillation of bundled power conductors. Int. Symp. "Vibration Problems in Industry", Keswich 1973, Paper No. 323, 18 S.
- [18] Falco, M., Gasparetto, M.: On vibrations induced on a cylinder in the wake of another due to vortex shedding. Meccanica 9/4, S. 325-364 (1974).

- [19] Krishnaswamy, T.N, Rao, G.N.V., Durvasula, S., Reddy, K.R. Model observations of interference effects on oscillatory response of two identical stacks. Proc. of the Fourth Int. Conf. on "Wind Effects on Buildings and Structures", Heathrow 1975, S. 209-214.
- [20] Griffith, R: Vibration experience with four in-line chimneys on a windy site. Proc. of a Symp. on Wind Effects on Building and Structures, Loughborough 1968, paper 20, 16 S.
- [21] Vivkery, B.J.: A cross-wind buffeting in a group of four-in-line model chimneys. Proc. of the 4th Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1980, Buildings Aerodynamics, Part 2 S. 169-182.
- [22] Hahnekamp, W., Hammer, W.: Transverse vibration behaviour of steel stacks in a row-Windtunnel tests with turbulent flow. Proc. of the 4th Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1980, Buildings Aerodynamics Part 2, S. 155-167
- [23] Ruscheweyh, H.: Straked-in-line steel stacks with low mass damping parameter. Proc. of the 4th Coll. on Part. 2 S. 195-204.
- [24] Walshe, D.E., Cowdrey, C.F.: A brief study of the effect of shrouds on buffet amplitude of chimney stacks. NPL Mar. Sci. Techn. Memo 2-27 (1972)
- [25] Zdravkovich, M.M.: Flow-induced vibration of two cylinders in tandem and their suppression. in: Naudscher (ed.) Flow-induced Structural Vibrations, S. 630-639, Springer Verlag 1974.
- [26] Cooper, K.R.: Wake galloping, an aeroelastic instability. in: Naudaschar (ed.), Flow-induced Structural Vibrations, S. 762-766, Springer Verlag 1974.
- [27] Cooper, K.R.: The buffeting of a tall building in a turbulent wake. Proc. of the Fourth Canadian Congr. of Appl.Mech., Montreal 1973, S. 715-716.

- [28] Gerhardt, H.J., Kramer, C., Jansen, H.: Wind loads on slender prismatic structures. Proc. of the 3rd Coll. on Industrial Aerodynamics, Aachen 1978, Part 2, S. 91-105.
- [29] Sanders, J.W., Melbourne, W.H.: Buffeting effects of upstream buildings. Proc. 5th Int. Conf. on Wind Eng., Fort Collins 1979, Vol. 593-606
- [30] Reinhold, T.A., Tielemann, H.W., Maher, F.J.: Interaction of square prisms in two flow fields. In: Journ. of Industrial Aerodynamics, 2 (1977) S. 223-241.
- [31] Zambrano, T.G., Peterka, J.A., Cernak, J.E.: Wind-load interaction on an adjacent building. In: Proc. of 3rd Nat. Conf. of Wind Engineering Research 1978, Gainesville, Florida, Paper III 13.-1
- [32] Ruscheweyh, H.: Dynamische Windwirkungen an Bauwerken und Interferenzeinfluß. Veröffentl. in Vorb.
- [33] Bardowicks, H.: Untersuchungen der Einflüsse von Querschnittsform und Schwingweite auf aeroelastische Schwingungen scharfkantiger prismatischer Körper. Dissertaion TU Hannover 1976
- [34] Petersen, C.: Baupraxis und Aeroelastik, Probleme - Lösungen - Schadensfälle. In Mitteilung des Kurt-Risch-Instituts der TU Hannover CRI-K 1/78, Band II, S. 424-449.
- [35] Beuamont, M., Walshe, D.E.: Investigation into windinduced oscillation on the 76m high supporting steel chimneys. Proc. 4th Int. Symp. Ind. Chimneys, The Hague, Netherlands, 1981, S. 127-135.
- [36] Cox, R.N., Wong, H.Y.: To tame a vortex street. DGLR-Jahrestagung, Aachen 1981, Vortrag Nr. 81-023.
- [37] Krishnaswamy, T.N., Rao, G.N.V., Durvasula, S. Reddy, K.R.: Modell observations of Interference Effects on Oscillatory Response of two identical Stacks. Proceedings of IV. Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures Heathrow Press, pp 209-214, 1975

FORSCHUNGSVORHABEN

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei
kreiszyllindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

Ergänzung zum Teil 1: Literaturlauswertung

Auftraggeber: Institut für Bautechnik
IfBt - Az.: IV 1-5-657/91

Bearbeiter: Prof. Dr. habil. Gerhard Spaethe
Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Mitglieder der Betreuergruppe:
Prof. Dr. Ruscheweyh
Prof. Dr. Petersen
Dr. Nieser
Dipl.-Ing. Hirtz

Zeuthen im März 1992

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen zur Literaturlauswertung

Symbolverzeichnis

Ausgewertete Literaturstellen

- Albrecht, T; Barnes, F. H.; Baxendale, A. J.; Grant, J.:
Vortex shedding from two cylinders in tandem
- Kiya, M.; Arie, M.; Tamura, H.; Mori, H.: Vortex shedding
from two circular cylinders in staggered arrangement
- Baxendale, A. J.; Grant, J.: The flow past two cylinders
having different diameters
- Jgarashi, T: Characteristics of the flow around two circu-
larcylinders arranged in tandem (1st Report)
- Jgarashi, T: Characteristics of the flow around two circular
cylinders arranged in tandem (2nd Report)
- Jgarashi, T.: Characteristics of a flow around two circular
cylinders of different diameters arranged in tandem
- Jgarashi, T; Katsumi, S.: Characteristics of the flow around
three circular cylinders arranged in line
- Zdravkovich, M. M.: Review of flow interference between two
circular cylinders in various arrangements
- Zdravkovich, M. M.; Pridden, D. L.: Interference between two
circular cylinders; series of unexpected discontinuities
- Zdravkovich, M. M.: Induced oscillations of two interfering
circular cylinders. Flow induced vibrations in fluid
engineering
- Medeiros, E. B.; Zdravkovich, M. M.: Flow induced oscilla-
tions of two unequal circular cylinders

Vorbemerkungen

Die vorliegende Ergänzung zum Literaturbericht enthält weitere Auswertungen von veröffentlichten Ergebnissen über Interferenzerscheinungen bei winderregten Zylindern in Gruppen- und Reihenordnung. Es handelt sich hierbei im wesentlichen um Literaturstellen, die uns dankenswerter Weise durch die Herren der Betreuergruppe zugänglich gemacht wurden. In der Endfassung des Berichtes wird diese Ergänzung dem Teil 1 angefügt; entsprechend ist die Seitennummerierung gewählt.

Interferenzwirkungen bei hohen dynamischen Verformungen und somit aeroelastischen Effekten wurden in die Auswertung nicht mit einbezogen. Diese Schwingungserscheinungen wurden behandelt von:

- Ruscheweyh, H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken unter Interferenzeinfluß. Stahlbau RWTH Aachen, Schriftenreihe, Heft 11, 1985.
Die bewegungsinduzierten Erregerkräfte, die durch Relativbewegungen der beiden Zylinder hervorgerufen werden, wurden bezeichnet mit Interferenzgalloping (hysteretic flow switching).
- Cooper, K. R.; Wardlaw, R.L.: Aeroelastic instabilities in wakes. Proc. of the 3rd intern. conf. on wind effects on buildings and structures, Tokio 1971 pp. 647-655.
Berichtet wird über gallopingartige Instabilitäten an Freileitungen mit großen Abstandsverhältnissen $a/d > 10$.
- Connors, H.J.: Fluid elastic vibrations of tube arrays excited by cross flow, ASME publ., Flow-induced vibrations in heat exchangers 1970.
Beschrieben werden Instabilitäten in Rohrwärmeaustauschern.

- Zdravkovich, M.M.: Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. Flow induced vibrations in fluid engineering. England, 14.-16.09.1982

Die aus der Interaktion zwischen Zylinderbewegung und Strömung entstehenden Schwingungen wurden als fluid-elastic excitation bezeichnet.

Diese Interferenzwirkungen sind im Gegensatz zu Stahlschornsteinen und -stützen, Rohrtachwerken, Offshorestrukturen und Seilen bei Stahlbetonschornsteinen bedeutungslos, da die auf den Durchmesser bezogene Querschwingungsamplitude $y/d < 0,01$ ist, so daß Rückkopplungen der Schwingungen auf den aerodynamischen Erregermechanismus kaum auftreten. Die Galloping-Einsatzwindgeschwindigkeit liegt über den maximal auftretenden Windgeschwindigkeiten. Bei den Windkanalversuchen mit Kennwerten von Stahlbetonschornsteinen konnten diese Interferenz-Strömungserscheinungen nicht erzeugt werden.

Eine große Anzahl von Veröffentlichungen behandelt die Druckverteilung bei einem Kreiszylinder in Gruppenanordnung. Da bei diesen Untersuchungen auch die Strouhalzahl bzw. die Wirbelfrequenz erfaßt wurden, werden diese Ergebnisse in der Auswertung behandelt. Die Wirbelerregung ist bei Schwingungen durch Interferenzeinfluß die häufigste Erregerart.

Kenntnisse über die Wirbelfrequenz und die Strouhalzahl sind deshalb von großer Bedeutung.

- Albrecht, T., u.a.: "Vortex shedding from two cylinders in tandem" berichten über Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern in Tandemanordnung. Die Untersuchungen erfolgten mit Messingzylindern.
- Kiya, M. u.a.: "Vortex shedding from two circular cylinders in staggered arrangement" beschreiben Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern über einen großen Anordnungsbereich. Als Modelle wurden Messingzylinder verwendet.
- Baxendale, A.J. u. a.: "The flow past two cylinders having different diameters" veröffentlicht Untersuchungen mit zwei

Zylindern von unterschiedlichen Durchmessern. Gemessen wurden die Oberflächendruckverteilung, der Gesamtdruck und die Strouhalzahl. Benutzt wurden Messingzylinder.

- Jgarashi, T.: "Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem" (1st und 2nd Report), untersuchen die Strömungsverhältnisse von zwei Zylindern in Tandemanordnung. Es erfolgte eine Klassifizierung der Strömungserscheinungen sowie die Bestimmung der Strouhalzahlen und der Druckverteilung.
- Jgarashi, T.: "Characteristics of a flow around two circular cylinders of different diameters arranged in tandem" bestimmte die charakteristischen Strömungskennwerte bei zwei Kreiszylindern mit unterschiedlichem Durchmesser. Als Ergebnisse wurden gemessene Strouhalzahlen bekanntgegeben.
- Igarashi, T. u. a.: "Characteristics of the flow around three circular cylinders arranged in line" untersuchten charakteristische Strömungskennwerte von drei Zylindern in Reihenanordnung. Die Resultate wurden verglichen mit vorhandenen Ergebnissen an Reihenanordnungen mit zwei und vier Zylindern.
- Zdravkovich, M. M.: "Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements" hat vorhandene strömungstechnische Kennwerte für verschiedene Gruppenanordnungen zusammengestellt. Im Auswertungsbericht erscheinen Druckverteilungsmessungen, Strouhalzahlen und Strömungserscheinungen.
- Zdravkovich, M. M. u. a.: "Interference between two circular cylinders" untersuchten diskontinuierliche Strömungserscheinungen bei zwei Zylindern in Tandemanordnung.

Für wirbelerregte Schwingungen von Kreiszylindern in Gruppen- und Reihenanordnung existieren nur wenige Veröffentlichungen, die im ersten Literaturbericht nicht erfaßt werden konnten.

- Zdravkovich, M. M.: "Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders" kategorisiert die Strömungsnach-

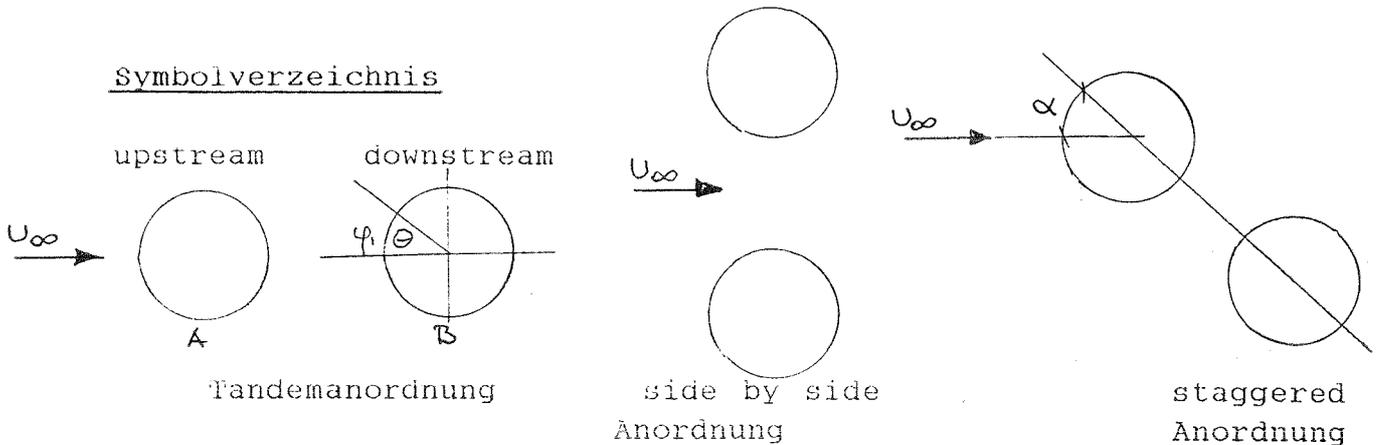
lauferscheinungen. Bekanntgegeben werden experimentelle Untersuchungsergebnisse mit Zylindern aus Aluminiumrohren. Die maximalen Amplituden und die Schwingungsbilder werden für eine Vielzahl von Zylinderanordnungen aufgezeichnet. Die im Beitrag beschriebenen Ergebnisse von fluid-elastic excitation wurden nicht ausgewertet.

- Medeiros, E. B. u. a.: "Flow induced oscillations of two unequal circular cylinders" veröffentlichten Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen von Zylinder-Doppelanordnungen. Die Scrutonzahl wurde von 10 bis 300 variiert. Die Zylinderdurchmesser haben Verhältnisse von 2:1 und 1:2. Ermittelt wurde die kritische Windgeschwindigkeit, bei der ein schnelles Anwachsen der Amplitudenwerte erfolgt.

Alle ausgewerteten Veröffentlichungen berichten über experimentelle Windkanaluntersuchungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich. Die Kennwerte der Modellzylinder sind Stahlbauwerken angepaßt. Messungen im transkritischen Reynoldszahlbereich bzw. im modellierten transkritischen Reynoldszahlbereich waren, genauso wie Untersuchungen mit Modellzylindern, deren Kennwerte Stahlbetonschornsteinen angepaßt wurden, in der internationalen Literatur nicht zu finden.

Sie sind Gegenstand der in dieser Forschungsarbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen.

Symbolverzeichnis



- U_∞, u_0 = ungestörte Strömungsgeschwindigkeit
- Re, R = $u \cdot d / \nu$ = Reynoldszahl
- ν = kinematische Zähigkeit der Luft
- D, d = Zylinderdurchmesser
- f = Wirbelablösefrequenz
- St, S = $f \cdot d / u$ = Strouhalzahl
- ρ = Dichte der Luft
- Sc = Scrutonzahl = $2 \cdot M \cdot \delta / \rho \cdot d^2$
- δ = logarithmisches Dekrement der Dämpfung
- M = generalisierte Masse pro Längeneinheit
- L = Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder bei Tandemanordnung
- T = Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder bei side by side Anordnung
- δ, l = Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder bei staggered Anordnung
- $\delta/d, L/d, T/d, l/d$ = Abstandsverhältnisse der Zylinder
- x, y = Koordinaten
- F_D = Kraft pro Längeneinheit am downstream Zylinder in Anströmrichtung
- F_L = Kraft pro Längeneinheit am downstream Zylinder quer zur Anströmrichtung
- c_D = drag coefficient $F_D / (1/2 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot D)$; aerodynamischer Beiwert in Anströmrichtung
- c_L = lift coefficient $F_L / (1/2 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot D)$; aerodynamischer Beiwert quer zur Anströmrichtung
- c_p = pressure coefficient $(p - p_0) / (1/2 \cdot \rho \cdot u_0^2)$; Druckbeiwert

$C_{p b}$ = base-pressure coefficient; Druckbeiwert am downstream Zylinder bei $\Theta = 180^\circ$
 $C_{p g}$ = gap pressure coefficient; Druckbeiwert am downstream Zylinder bei $\Theta = 0^\circ$
 p = Druckbeiwert am downstream Zylinder bei Θ
 p_0 = Druckbeiwert in der freien Strömung
 f, n, N = Wirbelablösefrequenz

Albrecht, T.; Barnes, F. H.; Baxendale, A. J.; Grant, I.:
Vortex Shedding from two cylinders in tandem. Journal of wind
engineering and industrial aerodynamics, 28 (1988), Seite
201-208

Berichtet wird über Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern in Tandemanordnung. Der Durchmesser des downstream Zylinders beträgt 22,5 mm. Der upstream Zylinder hat drei unterschiedliche Durchmesser (23,6 mm; 24,6 mm; 25,7 mm). Für eine konstante freie Strömungsgeschwindigkeit führen Veränderungen des Durchmessers des upstream Zylinders zu Veränderungen der Wirbelablösefrequenzen. Es wurde ermittelt, daß die Wirbelablösefrequenz des downstream-Zylinders die des upstream-Zylinders bestimmt, so daß beide Frequenzen gleich sind.

Im zweiten Teil des Experimentes wurde der downstream Zylinder beibehalten und der upsteam Zylinder durch eine flache Platte ersetzt.

Experimentelle Angaben

Die Untersuchungen wurden im 1,2 m x 1,2 m schwach-turbulenten Windkanal der Physics department der University Edinburgh durchgeführt. Die Zylinder wurden aus Messing hergestellt. Die Kreisendscheibe hatte einen Durchmesser von 106 mm.

Ergebnisse

Gemessen wurden die Wirbelfrequenzen an beiden Zylindern. Die Windgeschwindigkeiten betragen 6,7 bis 21 m/s. Die Resultate sind in den Tabellen 1 bis 3 zusammengestellt.

Es bedeuten: u_0 = freie Strömungsgeschwindigkeit
 R = Reynoldszahl = $\frac{u_0 \cdot d_2}{\nu}$
 ν = kinematische Zähigkeit der Luft

d_2 = Durchmesser des downstream Zylinders
 f_1 und f_2 = Wirbelablösefrequenz von upstream
 und downstream Zylinder

S = Strouhalzahl = $f_1 * d_1 / u_0$

d_1 = Durchmesser des upstream Zylinders

l = Abstand zwischen den Mittelpunkten der Zylinder

TABLE 1

Frequencies of vortex shedding with an upstream cylinder of diameter 25.7mm.

l mm	U_0 ms ⁻¹	$R \times 10^{-4}$	f_2 Hz	f_1 Hz	S
133	6.78	1.02	48.5	48.5	0.184
133	11.52	1.73	81.3	81.3	0.181
133	16.26	2.44	114.1	114.1	0.180
133	20.98	3.15	144.3, 146.9	144.3, 146.9	0.180, 0.177
184	6.81	1.02	52.8	52.8	0.199
184	11.53	1.73	85.8	85.8	0.191
184	16.28	2.44	118.9, 119.6	119.2	0.188
184	20.99	3.15	153.9	153.9	0.188
254	6.75	1.01	51.6	51.6	0.196
254	11.50	1.73	86.1	86.1	0.193
254	16.25	2.44	119.2	120.6	0.191
254	21.00	3.15	156.1	153.9	0.188

TABLE 2

Frequencies of vortex shedding with an upstream cylinder of diameter 24.6mm.

l mm	U_0 ms ⁻¹	$R \times 10^{-4}$	f_2 Hz	f_1 Hz	S
132	6.77	1.02	50.8	50.6	0.184
132	11.50	1.73	84.8	84.8	0.181
132	16.26	2.44	118.7	117.7, 118.7	0.178, 0.18
132	21.01	3.15	151.3	151.3	0.177
184	6.76	1.02	53.4	53.2	0.194
184	11.52	1.73	89.7	89.2	0.190
184	16.27	2.44	124.3	124.3	0.188
184	21.00	3.15	159.1	158.2, 159.1	0.185, 0.186
254	6.77	1.02	54.4	54.2	0.197
254	11.53	1.73	90.2, 91.1	90.2, 91.4	0.192, 0.195
254	16.29	2.44	125.1, 126.8	125.5	0.190
254	21.02	3.15	161.0, 162.3	160.6	0.188

In Tabelle 2 sind zwei Werte für die Frequenzen angegeben, wo zwei Spitzen im Frequenzspektrum enthalten waren.

TABLE 3

Frequencies of vortex shedding with an upstream cylinder of diameter 23.6mm.

t mm	U_0 ms ⁻¹	$R \times 10^{-4}$	f_2 Hz	f_1 Hz	S
132	6.78	1.02	53.0	53.0	0.185
132	11.48	1.72	88.5	89.0	0.183
132	16.30	2.44	123.5	124.3	0.180
132	21.06	3.16	157.6, 160.5	160.5	0.180
184	6.74	1.01	55.3	55.3	0.194
184	11.47	1.72	92.2	92.0	0.189
184	16.48	2.47	130.8	130.8	0.187
184	21.08	3.16	166.2	166.2	0.186
254	6.76	1.02	56.7	56.1, 56.7	0.196, 0.198
254	11.49	1.72	93.0, 93.8	94.0	0.193
254	16.27	2.44	130.9	131.2	0.190
254	21.0	3.15	166.8, 168.0	166.8, 167.6	0.187, 0.188

Schlußfolgerungen

Eine Prüfung der Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern in Tandemanordnung, bei denen der Durchmesser oder die Breite des upstream Zylinders verändert wurde, hat gezeigt, daß die Wirbelablösefrequenzen des downstream Zylinders sich über einen Bereich hinweg dem upstream Zylinder angleichen. Beide Frequenzen sind gleich.

Wenn die Wirbelablösefrequenz des upstream Zylinders einen kritischen Wert übersteigt, der vom Abstandsverhältnis abhängt, werden beide Frequenzen Unterschiede aufweisen.

Kiva, M.; Arie, M.; Tamura, H.; Mori, H.: Vortex shedding from two circular cylinders in staggered arrangement
Journal of Fluids Engineering, Vol.102, June 1980, S.166-170

Beschrieben werden die Resultate von experimentellen Untersuchungen über Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern gleichen Durchmessers über einen breiten Bereich von staggered Anordnungen. Der größte Teil der Untersuchungen erfolgte mit Reynoldszahlen von $1,58 \cdot 10^4$ und gleichmäßiger Strömung.

Experimentelle Angaben

Die Untersuchungen erfolgten in einem Windkanal mit einer Untersuchungssektion von 0,2 m Höhe, 0,4 m Breite und 1,0 m Länge. Die zwei Messingzylinder vom Durchmesser 0,955 cm haben ein Längen-Durchmesser-Verhältnis von 20,9. Das Zentrum des Zylinderpaares liegt 0,3 m downstream vom Beginn der Testsektion. Der Abstand $\delta \cdot d$ der Zylinder wurde variiert in den Bereichen von $1,0 \cdot d$ bis $5,5 \cdot d$.

Die Positionen, wo Wirbelablösefrequenzen gemessen wurden, sind in Fig. 2-4 für die Fälle $\alpha=15,45$ und 75° , $\delta=2,0$ dargestellt.

Dabei bedeuten: f = Wirbelablösefrequenz

$$Re = \text{Reynoldszahl} = \frac{u_* \cdot d}{\nu}$$

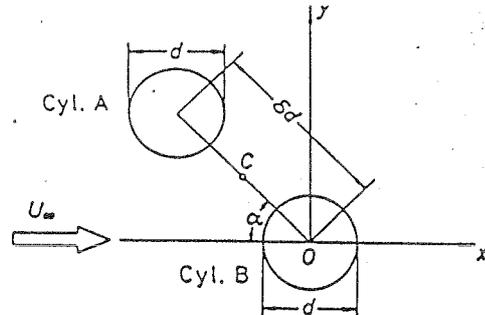
$$St = \text{Strouhalzahl} = \frac{f \cdot d}{u_*}$$

u_* = ungestörte Windgeschwindigkeit

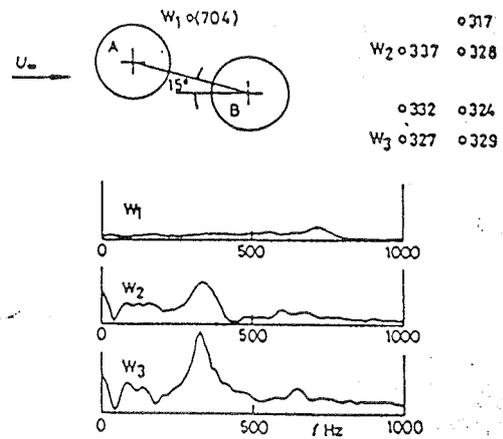
Die Experimente wurden für den Bereich $\alpha = 0 \dots 180^\circ$ durchgeführt. Für $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ist A der upstream Zylinder. Für $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ist A der downstream Zylinder.

In Fig. 5-8 sind die Strouhalzahlen vom Zylinder A für $\alpha = 0$ bis 180° angegeben.

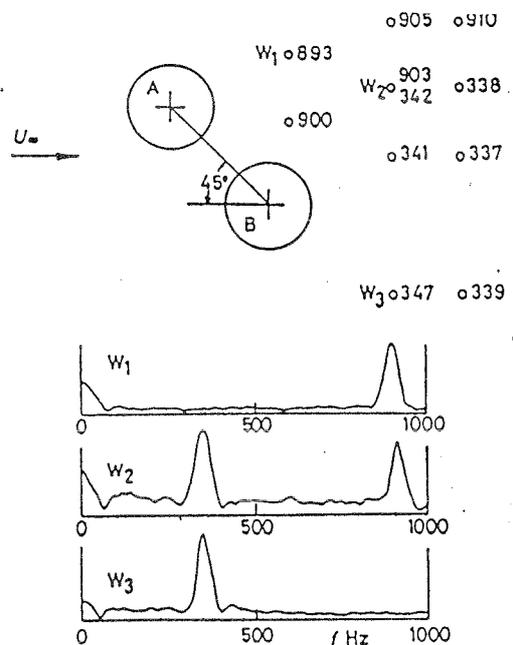
Definition der Bezeichnungen



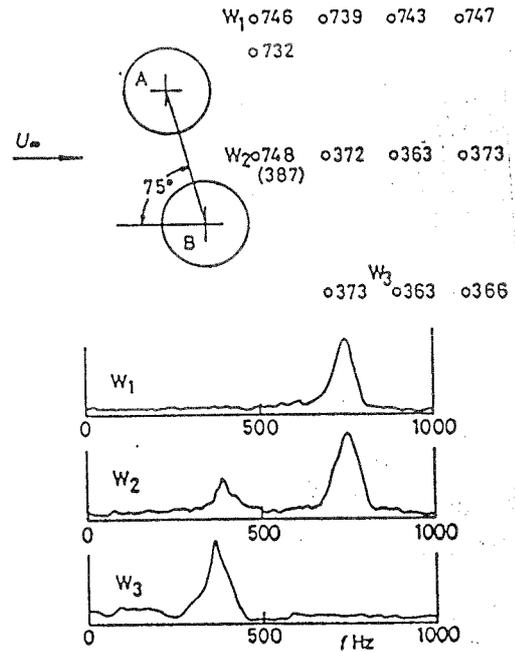
Spektren der Wirbelablösefrequenzen für die Positionen W_1, W_2, W_3 bei $\alpha = 15^\circ$



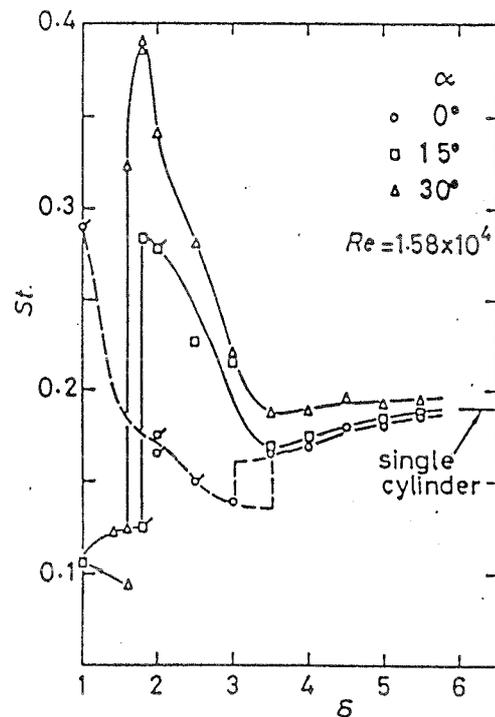
Spektren der Wirbelablösefrequenzen für die Positionen W_1, W_2, W_3 bei $\alpha = 45^\circ$



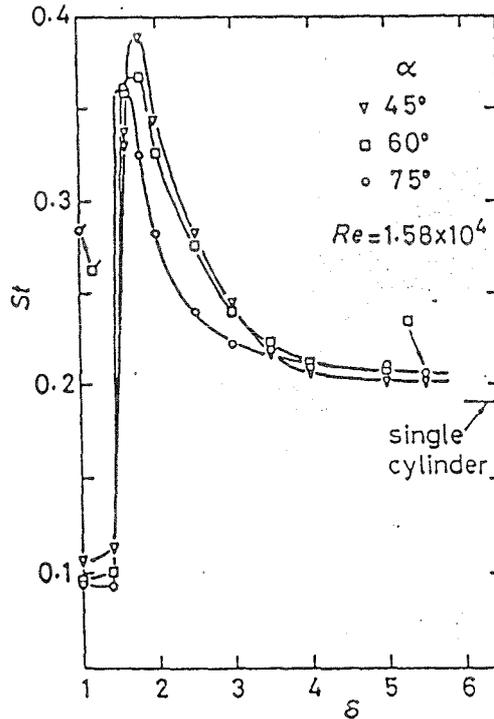
Spektren der Wirbelablöse-
frequenzen für die Positionen
 W_1, W_2, W_3 bei $\alpha = 75^\circ$



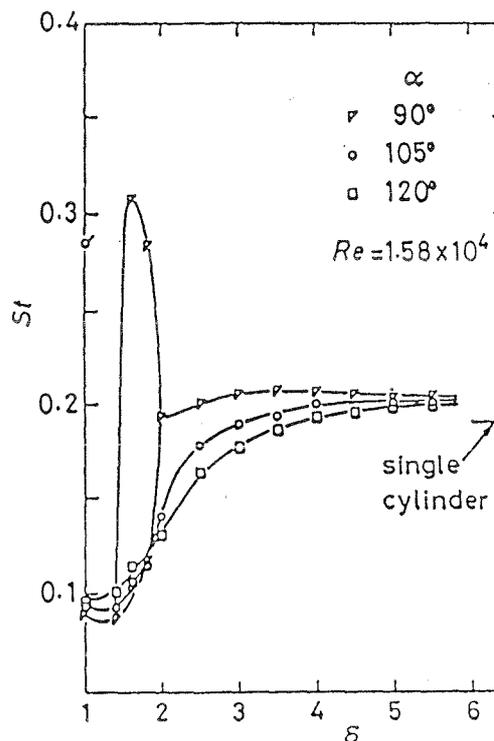
Strouhalzahlen vom
Zylinder A für $\alpha=0,$
15 und 30°



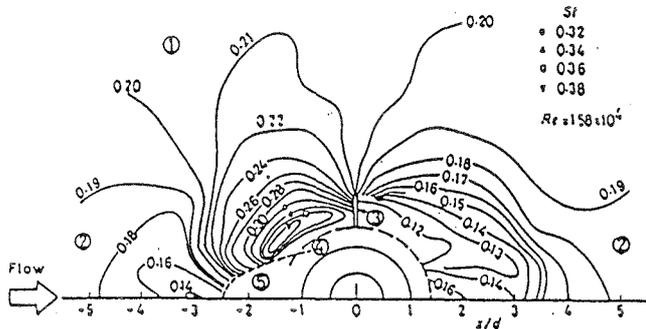
Strouhalzahlen vom
Zylinder A für $\alpha=45,$
60 und 75°



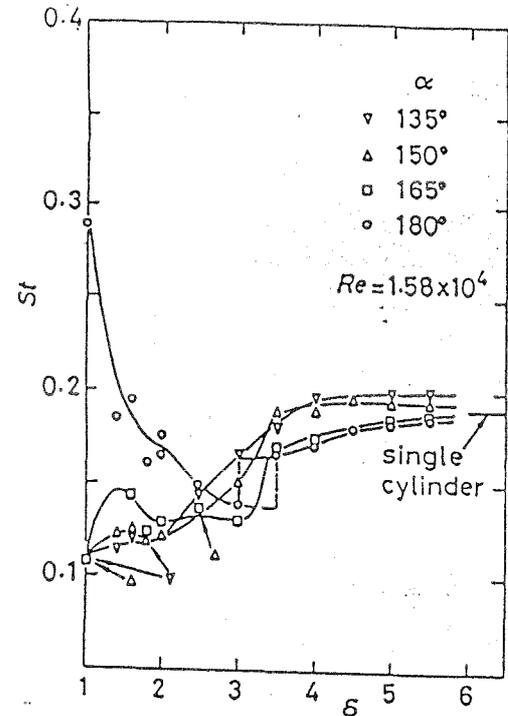
Strouhalzahlen vom
Zylinder A für $\alpha=90,$
105 und 120°



Strouhalzahlen vom
Zylinder A für $\alpha=135^\circ$,
150, 165 und 180°



Strouhalzahlen für alle Anordnungen



Die Kurven der konstanten Strouhalzahlen wurden linear eingezeichnet zwischen den Meßwerten. Alle Möglichkeiten können klassifiziert werden. In Abhängigkeit von der Anordnung ist die Strouhalzahl, die vom Zylinder A erzeugt wird, größer oder kleiner als beim Einzelzylinder.

Zylinder A kann in folgende 5 Regionen eingeteilt werden:

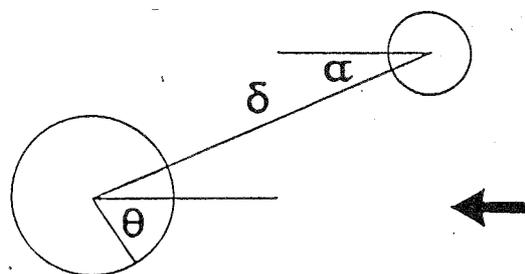
- (1) Region wo die Strouhalzahl höher ist als als beim Einzelzylinder
- (2) Region wo die Strouhalzahl kleiner ist als beim Einzelzylinder
- (3) Region wo keine stabilen Wirbel erzeugt werden
- (4) Region wo das Zylinderpaar sich verhält wie ein Einzelzylinder
- (5) Region wo nur schwache oder keine Wirbel erzeugt werden

Die Strouhalzahl für den downstream Zylinder ist i.a. kleiner als beim Einzelzylinder, außer für Fälle mit Abstandsverhältnissen kleiner 1,4 und Tandemanordnung.

Baxendale, A. J.; Grant, J.: The flow past two cylinders having different diameters. Aeronautical Journal, April 1985

Diese Veröffentlichung beschreibt Resultate von Untersuchungen an zwei Zylindern. Der Durchmesser vom downstream Zylinder ist doppelt so groß wie der Durchmesser des upstream Zylinders.

Anordnung der zwei Zylinder



Gemessen wurde die Oberflächendruckverteilung des downstream Zylinders, der Gesamtdruck und die Strouhalzahl von beiden Zylindern für Abstandsverhältnisse von 1,32 bis 3,88 · D (D ist der Durchmesser des downstream Zylinders) und Winkeln von 0° bis 45°.

Es wurde ermittelt, daß für Abstandsverhältnisse größer als der "kritische Abstand", die Strouhalzahlen der Wirbelablösefrequenzen beider Zylinder für einen großen Winkelbereich identisch sind.

Gewählte Bezeichnungen:

$$c_D = \text{drag coefficient} = F_D / (1/2 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot D)$$

$$c_L = \text{lift coefficient} = F_L / (1/2 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot D)$$

D = Durchmesser vom downstream Zylinder

D/2 = Durchmesser vom upstream Zylinder

F_D = drag Kraft pro Längeneinheit am downstream Zylinder

- F_L = lift Kraft pro Längeneinheit am downstream Zylinder
- n = Wirbelablösefrequenz des upstream Zylinders
- N = Wirbelablösefrequenz des downstream Zylinders
- S = Strouhalzahl, für upstream Zylinder $S = n \cdot D / 2 \cdot u_0$
für downstream Zylinder $S = N \cdot D / u_0$
- u_0 = ungestörte Windgeschwindigkeit

Experimentelle Angaben

Die Untersuchungen wurden an der University of Edinburgh durchgeführt. Die Arbeitssektion im Windkanal ist 1,4 m lang und 0,46 m breit und hoch. Der Windkanal erzeugt turbulenzarme Strömungen.

Die Reynoldszahl betrug $1,45 \cdot 10^4$, basierend auf dem downstream Zylinder. Die Zylinder wurden aus Messing hergestellt. Der upstream Zylinder hatte einen Durchmesser von 8 mm, der Durchmesser des downstream Zylinders betrug 16 mm.

TABLE 1
The positions at which the pressure distributions were measured

δ mm δ/D		α						
21	1.32	0	2	5	10	15	20	30
31	1.94	0	2	5	10	15	22	
40	2.50	0	2	5	10	15	20	25
50	3.12	0	2	5	10	15	20	
53	3.32	0		6	11		20	35
62	3.88	0			10	15	20	

Tabelle 1 enthält die Meßstellen der Druckverteilungsmessungen

Die Wirbelablösefrequenzen wurden mit hot-wire anemometer gemessen, im Abstand $1,5 \cdot$ Zylinderdurchmesser quer zur Windrichtung und $2 \cdot$ Zylinderdurchmesser in Strömungsrichtung vom Zylindermittelpunkt entfernt. Für $\alpha < 20^\circ$ und bei nicht synchronen Ablösefrequenzen war die Bestimmung kompliziert. Die Wirbelablösefrequenzen wurden für jeden Zylinder in 5° Intervallen im Bereich 0° bis 45° bestimmt mit Abständen von $\delta = 21, 31, 40, 48, 53$ und 60 mm.

TABLE 2
The Strouhal numbers and base pressures when the cylinders are in tandem

δ/D	Strouhal number		Base pressure	
	upstream cylinder	downstream cylinder	upstream cylinder	downstream cylinder
1.32		0.220	-0.55	-0.95
1.94		0.210	-0.45	-0.87
2.50	0.157	0.174	-0.78	-0.69
3.00	0.173	0.177	-0.93	-0.75
3.32	0.179	0.179	-0.95	-0.74
3.75	0.183	0.177	-1.03	-0.77

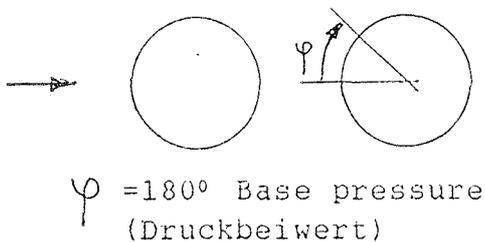


Tabelle 2 enthält die Druckverteilung und die Strouhalzahlen für die Tandemanordnung

In Fig. 11 sind die Wirbelablösefrequenzen für beide Zylinder in verschiedenen Anströmrichtungen dargestellt. Bei $\delta < 1,94 \cdot D$ und $\alpha = 0^\circ$ trat beim upstream Zylinder keine Wirbelablösung auf. Wirbel wurden aber an anderen Stellen beobachtet. Für $\delta = 1,32 \cdot D$ variierte die Wirbelablösung vom upstream Zylinder nur geringfügig mit α und hatte den sehr hohen Wert $S \approx 0,42$. Für $\delta = 1,94 \cdot D$ wurde dieser Wert stark reduziert auf $s \approx 0,22$ bei $\alpha = 45^\circ$. Für den downstream Zylinder verminderte sich der Wert von $S \approx 0,22$ bei $\delta = 1,32 \cdot D$ auf $0,17$ bei Steigerung von α auf 45° .

Die meisten Messungen der Strouhalzahl ergaben sich für $\delta \geq 3,0 \cdot D$ einen Bereich, für welchen die Strouhalzahlen beider Zylinder identisch sind. Die Wirbelablösefrequenz des downstream Zylinders ist exakt die Hälfte der Wirbelablösefrequenz des upstream Zylinders. Die Wirbelablösung erfolgt synchron. Nicht synchrone Frequenzen ergeben sich bei $\delta \geq 3,0 \cdot D$ und $\alpha \geq 30^\circ$.

Der drag und lift coefficient für den downstream Zylinder wurden aus der Druckverteilung rund um den Zylinder ermittelt. Die Veränderungen des lift coefficients mit α zeigt Fig. 13.

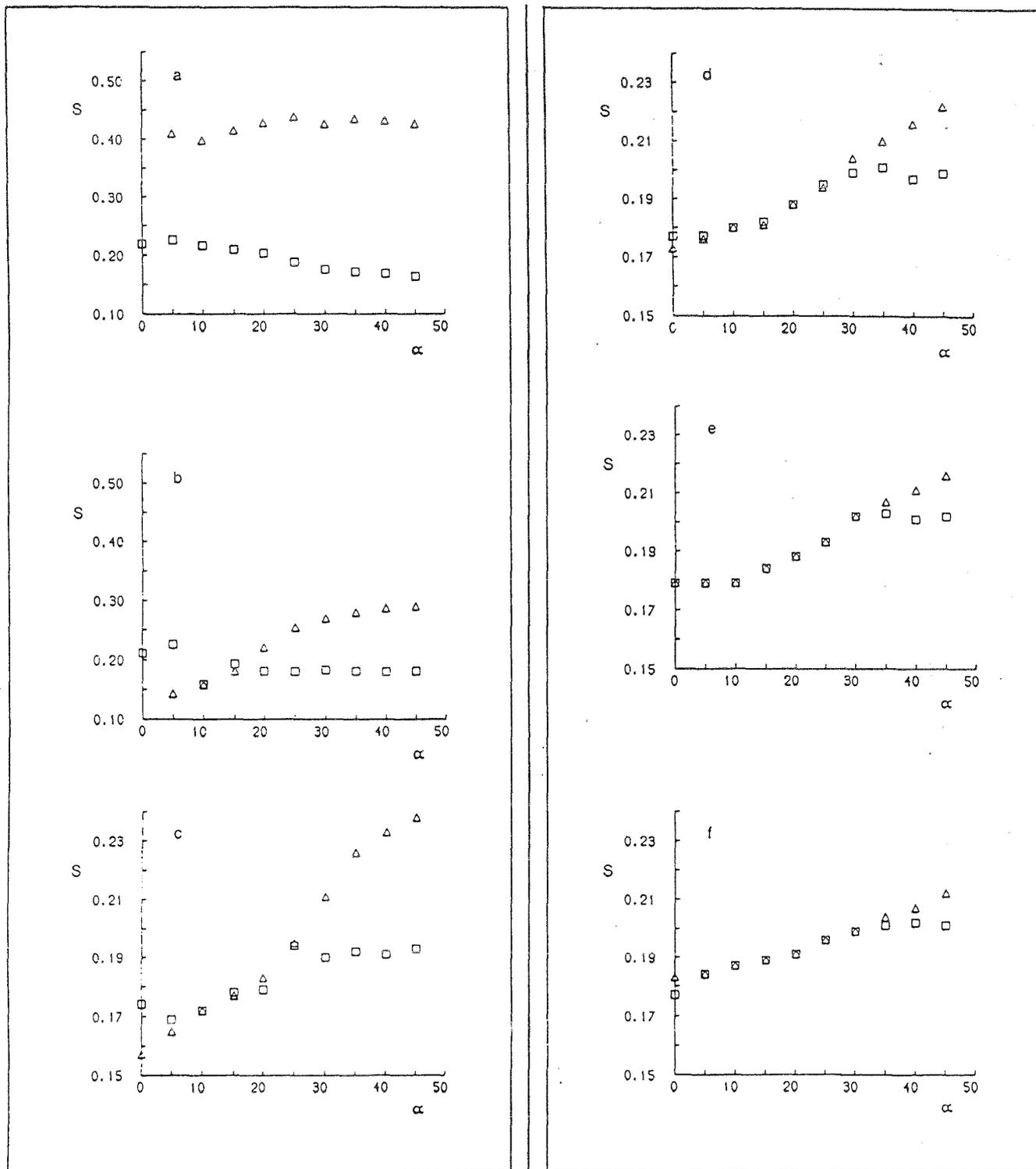


Figure 11. The variation of the Strouhal numbers with the angle of stagger.

(a) $\delta/D = 1.32$, (b) $\delta/D = 1.94$,
(c) $\delta/D = 2.50$, (d) $\delta/D = 3.00$,
(e) $\delta/D = 3.32$, (f) $\delta/D = 3.75$.
Upstream cylinder Δ ,
Downstream cylinder \square .

Veränderung des lift coefficient
mit dem Winkel α

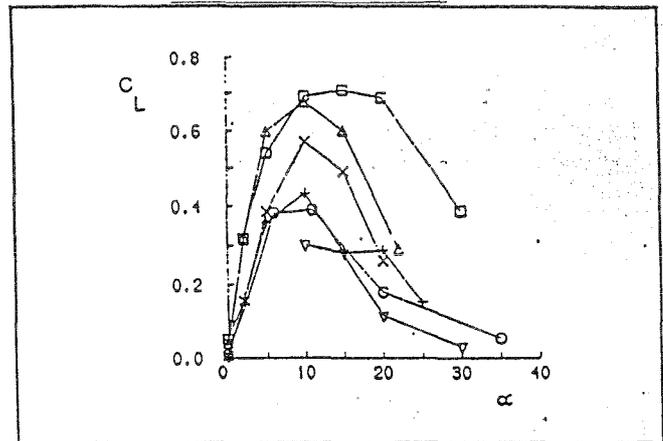


Figure 13. The variation of the lift coefficient with the angle of stagger.

$\delta/D = 1.32$ □, $\delta/D = 1.94$ △,
 $\delta/D = 2.50$ ×, $\delta/D = 3.12$ +,
 $\delta/D = 3.32$ ○, $\delta/D = 3.88$ ▽.

Jgarashi, T.: Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem (1 st Report)
 Bulletin of the JSME, Vol. 24, No. 188, February 1981

Die experimentellen Untersuchungen hatten das Ziel, die Strömungsverhältnisse von zwei Zylindern in Tandemanordnung zu untersuchen. Die Reynoldszahlen im unterkritischen Bereich und die Abstandsverhältnisse wurden variiert.
 $(8,7 \cdot 10^3 \leq Re \leq 5,2 \cdot 10^4; 1,03 \leq L/d \leq 5,0)$

Experimentelle Angaben

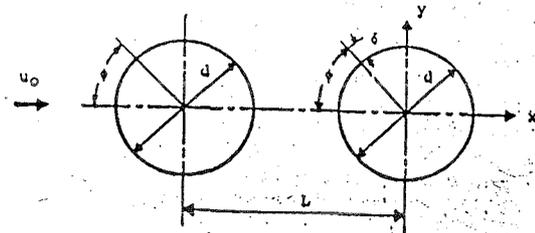


Fig. 1: Koordinatensystem und Bezeichnungen
 - Zylinderhöhen sind gleich
 - Zylinderdurchmesser $d = 34 \text{ mm}$
 - Ungestörte Anströmgeschwindigkeit $u_0 = 4 \dots 24 \text{ m/s}$
 - Windkanaltestsektion $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ($H = 600 \text{ mm}$)
 - Wirbelablösefrequenzen wurden ermittelt hinter dem downstream Zylinder bei $x=2 \cdot d$ und $y=0,5 \cdot d$

Ergebnisse

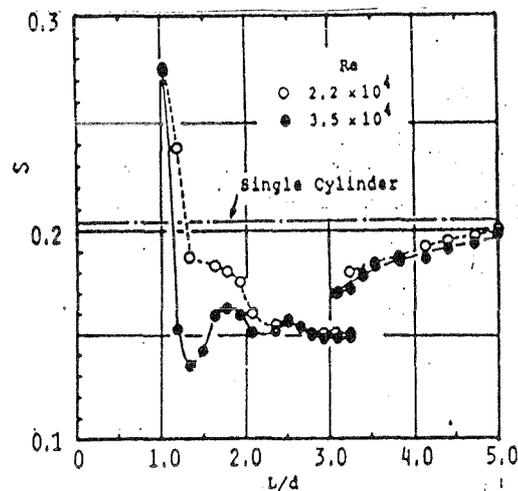
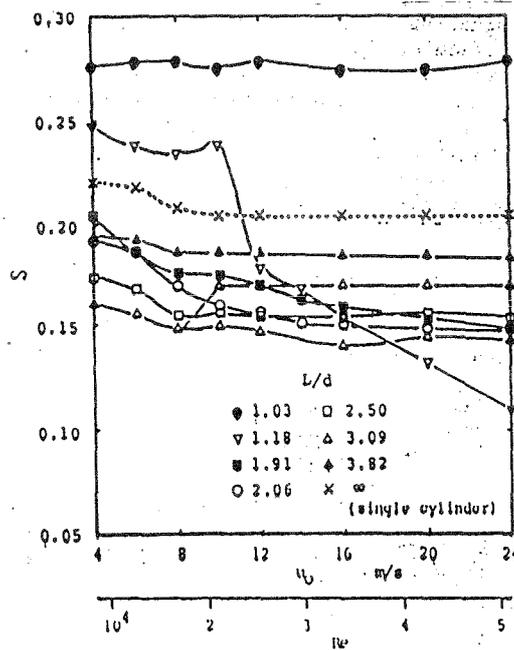


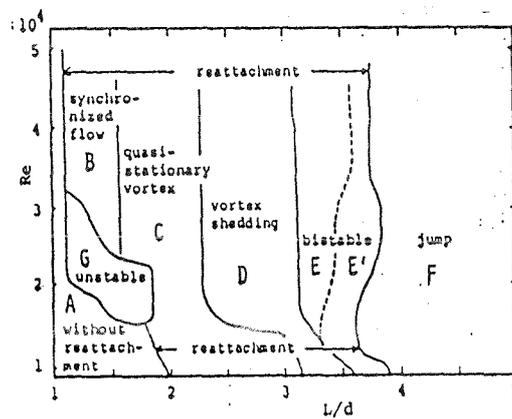
Fig. 4 Strouhalzahl hinter dem downstream Zylinder

Fig. 5 Strouhalzahl
in Abhängigkeit von
der Reynoldszahl



Die Strömungserscheinungen von zwei Zylindern in Tandemanordnung können in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis und der Reynoldszahl dargestellt werden.

Klassifizierung der
Strömungserscheinungen



A - Separate Ablösung vom upstream Zylinder wird vom downstream Zylinder nicht beeinflusst

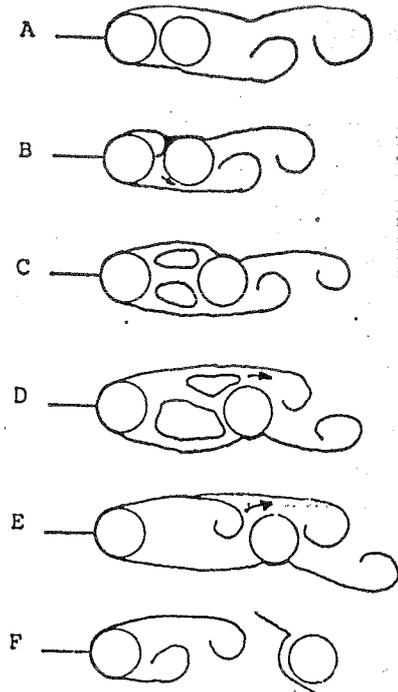
B - Wirbelablösung synchron an beiden Zylindern

C - Quasistationäre Wirbel bilden sich zwischen den Zylindern

D - Quasistationäre Wirbel werden instabil

E - Bistabile Strömung

F - Separate Grenzschicht vom upstream Zylinder greift auf die Vorderseite des downstream Zylinders über



Jgarashi, T.: Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem (2nd report). Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 233. Nov. 1984

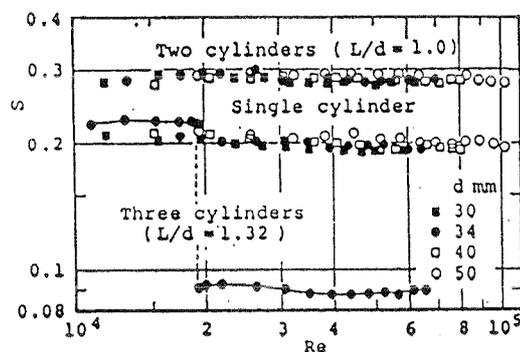
Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von detaillierten charakteristischen Strömungserscheinungen bei kleinen Abstandsverhältnissen. Übereinstimmung wird mit vorhandenen Ergebnissen, daß diskontinuierliche Strömungserscheinungen bei Abstandsverhältnissen $L/d=3,5$ bis $3,8$ erzeugt werden, erzielt. Dieser Bereich wird als critical spacing bezeichnet.

Experimentelle Angaben

- Niedergeschwindigkeits-Windkanal
- Zylinderdurchmesser $d=30, 34, 40, 50$ mm
- Strömungsgeschwindigkeit $u_0=6...32$ m/s
- Turbulenzintensität $0,55...0,6$ %
- Reynoldszahl $1,15 \cdot 10^4 \leq Re \leq 1,03 \cdot 10^5$
- Zylinderabstand $1,0 \leq L/d \leq 1,5$

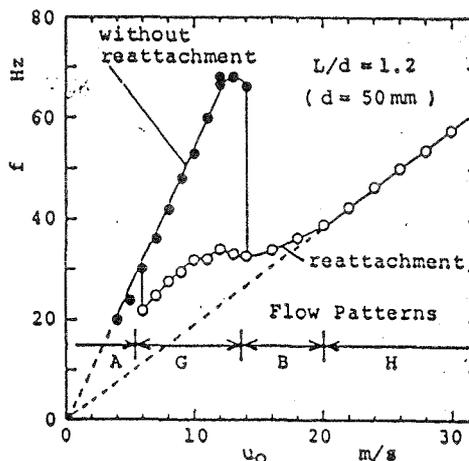
Ergebnisse

- Strouhalzahl hinter den Zylindern

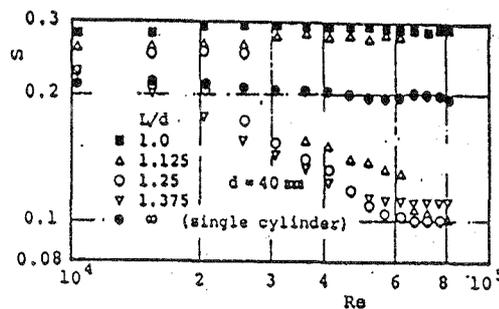


- Wirbelablösefrequenzen von zwei Zylindern
 $Re > 6,41 \cdot 10^4$

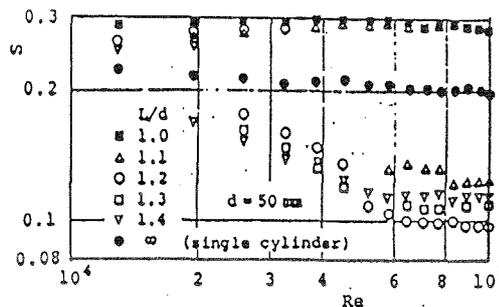
without reattachment =
 ohne Rückkopplung der Grenzschicht vom ersten zum zweiten Zylinder



- Korrelation der Strouhalzahl mit der Reynoldszahl bei unterschiedlichen Zylinderdurchmessern und Abstandsverhältnissen

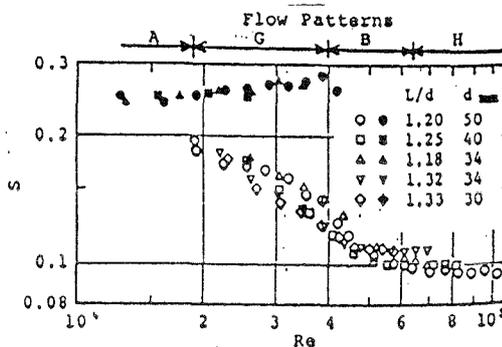


(a)



(b)

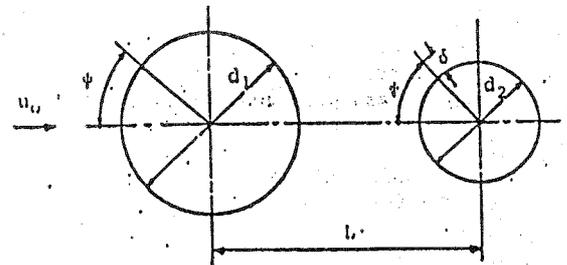
- Strouhalzahl für 4 Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern



Jgarashi, T.: Characteristics of a flow around two circular cylinders of different diameters arranged in tandem.
Bulletin of the JSME, Vol. 25, No. 201, March 1982

Zur Bestimmung charakteristischer Strömungskennwerte bei zwei Kreiszylindern mit unterschiedlichen Durchmessern wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Experimentelle Angaben



- Durchmesser verhältnisse $d_2/d_1 = 0,68$
- Reynoldszahl $1,3 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5,8 \cdot 10^4$ bezogen auf den Durchmesser d_1
 $Re = u_0 \cdot d_1 / \nu$
- Abstandsverhältnis $0,9 \leq L/d_1 \leq 4,0$
- Strouhalzahl $S = f \cdot d_1 / u_0$ wurde im Strömungslauf des 2. Zylinders gemessen
- Koordinatensystem und Bezeichnungen $d_1 = 50 \text{ mm}$, $d_2 = 34 \text{ mm}$
- Windkanalsektion $600 \times 150 \text{ mm}$ ($H = 600 \text{ mm}$), Strömungsgeschwindigkeit $u_0 = 4 \dots 18 \text{ m/s}$, Turbulenzintensität $0,5 \%$.

Allgemeines

Die meisten Untersuchungen an Doppelzylinderanordnungen wurden mit gleichem Durchmesser durchgeführt. Mit unterschiedlichen Durchmessern wurden lediglich Untersuchungen veröffentlicht von:

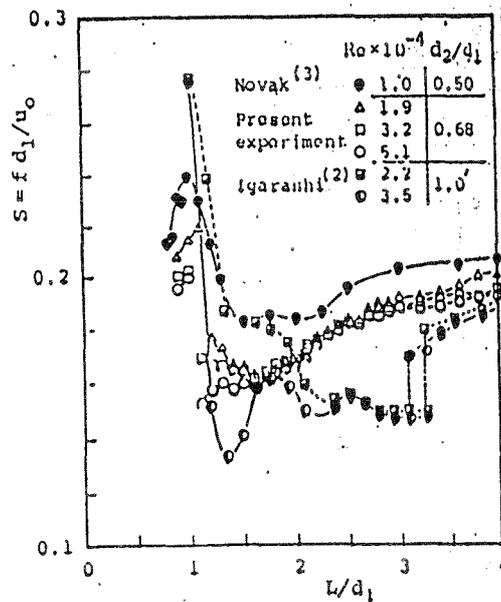
- Novak, J., Acta Technica, Czechoslovak Akademie of Sciences, No. 3 (1975), p. 366 hat die Wirbelfrequenzmessungen hinter der Doppelanordnung bearbeitet.

Das Durchmesser Verhältnis d_2/d_1 betrug 0,5 und 2,0

- Hiwada, M., et. al., Bulletin of the JSME, Vol.22, No. 167 (1979), p.715 führte Messungen für $0,13 \leq d_1/d_2 \leq 0,52$ durch.
- Igarashi, T., Preprint of Japan Soc. Mech. Engrs (in japanisch), No 774-13, (1977), p.84 berichtet über experimentelle Untersuchungen mit Durchmesser Verhältnissen $d_2/d_1 = 0,68$

Ergebnisse

- Wirbelablösefrequenzen hinter dem zweiten Zylinder



Jgarashi, T.; Katsumi, S.: Characteristics of the flow around three circular cylinders arranged in line. Bulletin of JSME Vol. 27, No.233, November 1984

Die Untersuchungen wurden zur Bestimmung charakteristischer Strömungskennwerte von drei Zylindern in Reihenanordnung durchgeführt.

Die Resultate wurden verglichen mit vorhandenen Ergebnissen an Reihenanordnungen mit zwei und vier Zylindern.

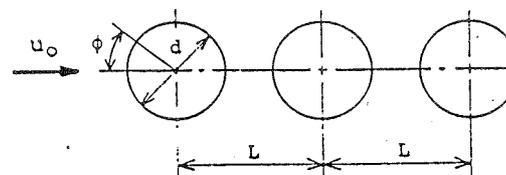
Untersuchungen an Vielfachanordnungen wurden bereits durchgeführt von:

- an drei und vier Zylindern von Ishigai, S. and Nishikawa, H. Bulletin of the JSME, Vol. 18, No. 119 (1975) p. 528

Bei $1,4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1,35 \cdot 10^4$ wurden Druckverteilungsmessungen und Wirbelablösefrequenzen hinter der Zylinderanordnung gemessen. Abstandsverhältnisse $L/d = 1,5 \dots 2,0$

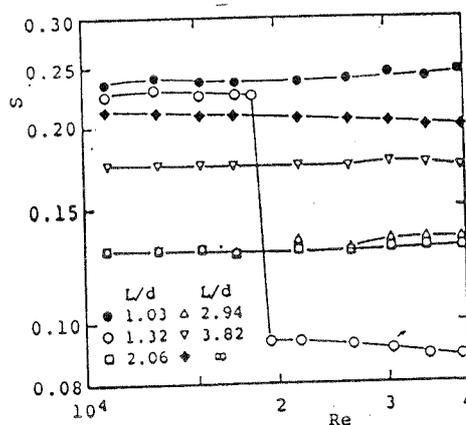
Experimentelle Angaben

- Koordinatensystem und Bezeichnungen
- $d = 34 \text{ mm}$
- $u_0 = 5 \dots 18 \text{ m/s}$
- $1,09 \cdot 10^4 \leq Re \leq 3,92 \cdot 10^4$
- Turbulenzintensität $0,55 - 0,60 \%$
- Abstandsverhältnisse $L/d = 1,0 \dots 4,0$



Ergebnisse

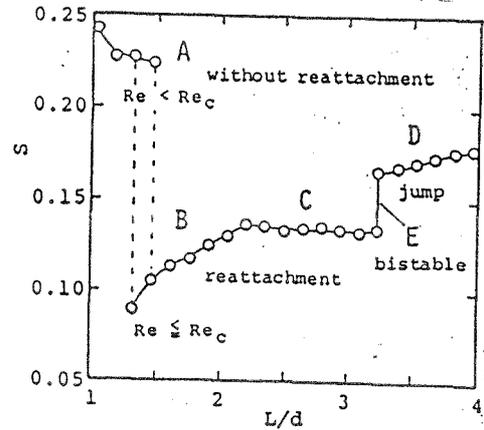
- Die Strouhalzahl wurde hinter dem 3. Zylinder gemessen.



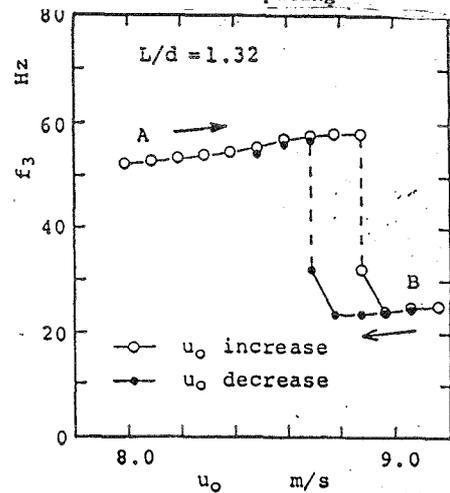
(a) effect of Reynolds number

- Bei $L/d = 3,24$ existieren zwei verschiedene Strouhalzahlen.

- Bei $L/d = 1,32$ wurden zwei spezielle Frequenzen erzeugt.
(Hysterese der Wirbelablösefrequenz im Übergangsbereich zwischen Strömungsart A und B)

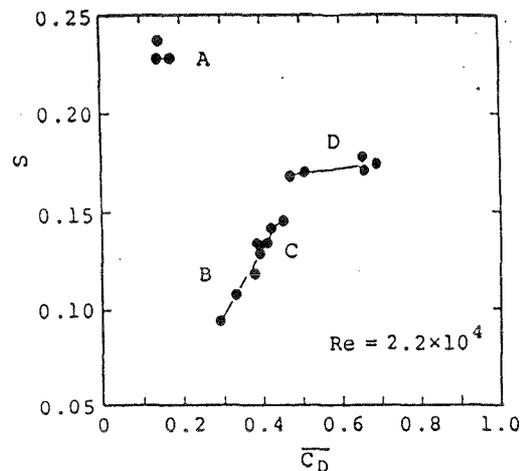
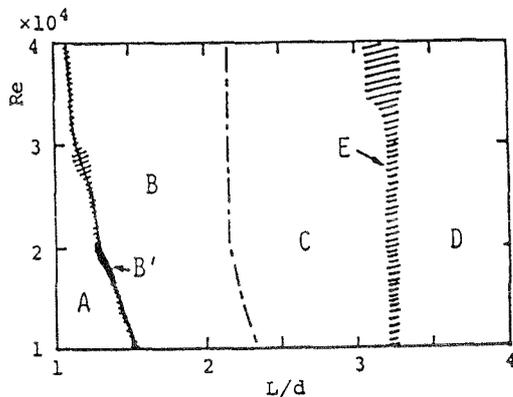


(b) effect of spacing



Die folgende Tabelle ergibt eine Zusammenstellung von strömungstechnischen Kennwerten für drei Zylinder in Reihenanordnung. Die Klassifizierung der Strömungserscheinungen und die Korrelation von aerodynamischem Beiwert und Strouhalzahl enthalten die beigefügten Diagramme.

Flow Pattern	Shear Layer	Range	S	C_{D2}	$\overline{C_D}$
A	(W,W)	$Re < Re_c$	0.23 ~ 0.24	-0.6	0.16
B'	(W,W) & (W,R)	$Re = Re_c, L/d = 1.32$	bistable, hysteresis		
B	(R,R)	$Re \geq Re_c, L/d < 2.21$	0.09 ~ 0.13	-0.4 ~ -0.3	0.3 ~ 0.4
C	(R,J)	$2.21 \leq L/d < 3.24$	0.13	-0.3 ~ -0.1	0.4 ~ 0.5
E	(R,J) & (J,J)	$L/d = 3.24$	bistable : Jump $C \rightarrow D$ and $D \rightarrow C$		
D	(J,J)	$L/d > 3.24$	0.16 ~ 0.18	0.35 ~ 0.42	0.6 ~ 0.7

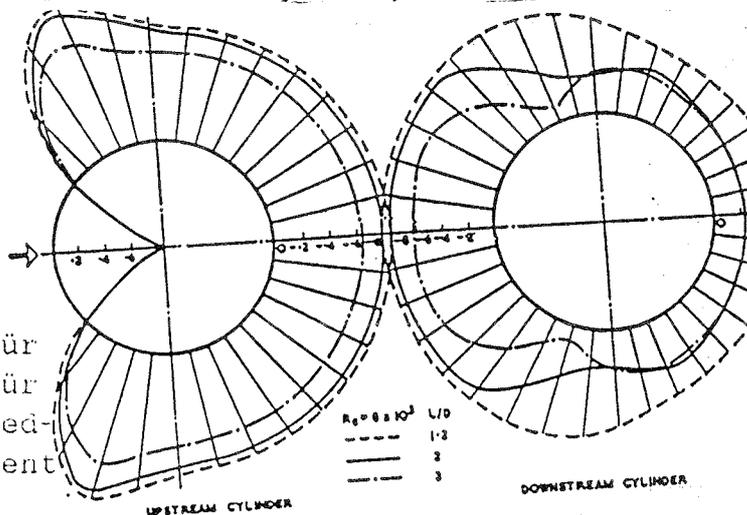


M. M. Zdravkovich: Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements.
 Journal of Fluids Engineering, Dezember 1977, Seite 618-633

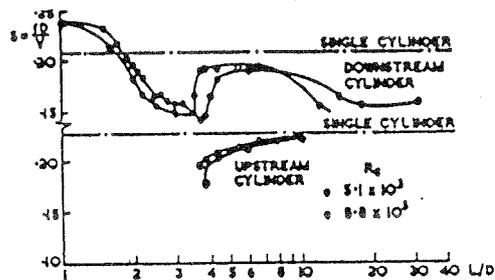
Der Beitrag enthält eine Zusammenstellung von strömungstechnischen Kennwerten für Gruppenanordnungen:

- Tandemanordnung (tandem arrangement)
- side by side - Anordnung
- alle anderen Anordnungen (staggered arrangement)

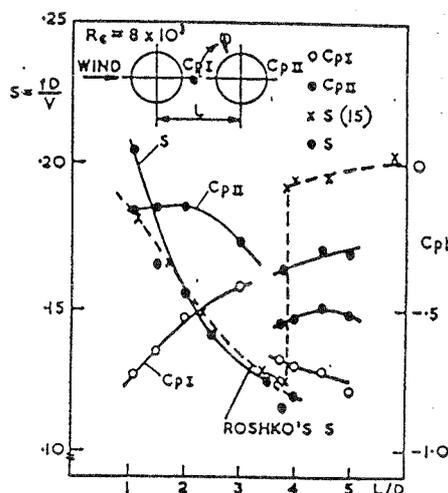
Die Abbildung enthält die Druckverteilung von zwei Zylindern bei unterschiedlichen Abstandsverhältnissen.



Im Bild sind Strouhalzahlen für den unterkritischen Bereich für Tandemanordnung mit unterschiedlichen Abstandsverhältnissen enthalten (Oka u.a.1972). Am upstream Zylinder tritt bei $L/D < 3,8$ keine Wirbelablösung auf. Beim downstream Zylinder wird die Strouhalzahl kontinuierlich gesenkt im Bereich $1 \leq L/D \leq 3,8$.

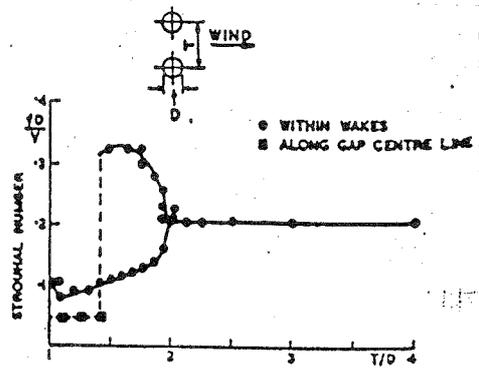


Der diskontinuierliche (unterbrochene) Bereich des Strömungsbildes ist im nebenstehenden Bild zu erkennen. Dargestellt ist der base pressure coefficient ($\varphi=180^\circ$) sowie die Strouhalzahl des hinteren Zylinders bei Tandemanordnung (Ishigai u.a. 1972) und beim Einzelzylinder hinter einer Rechteckplatte (Roshko 1955). Der kritische Abstand liegt bei

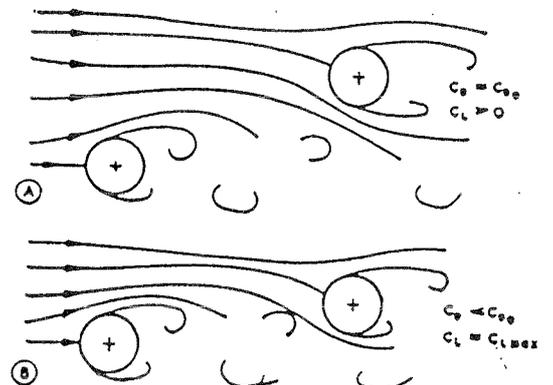
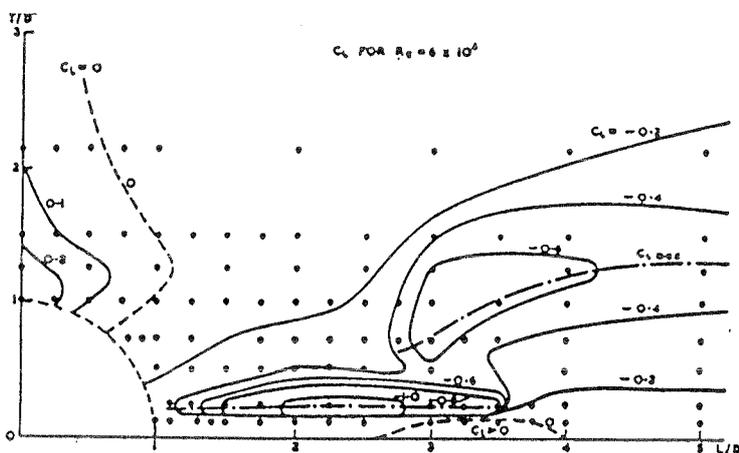


$L/D=3,8$. Bei kleineren Abständen wurden Strömungsschwankungen nur hinter dem downstream Zylinder beobachtet. Bei $L/D > 3,8$ tritt die Wirbelstraße hinter beiden Zylindern auf, und die Wirbelablösefrequenzen sind gleich groß.

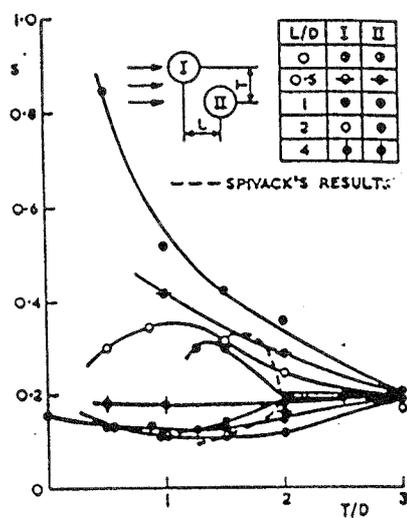
Für side by side Anordnungen wurden systematische Messungen von Spirack (1946) durchgeführt. Er fand für alle Abstandsverhältnisse $T/D > 2$ eine Frequenz in beiden Nachlaufbereichen, die gleiche Größenordnung wie beim Einzelzylinder aufweist. Bei $T/D < 2$, wurden unterschiedliche Frequenzen in beiden Nachlaufbereichen festgestellt.



Die meisten Anwendungsfälle in der Praxis beinhalten die staggered Anordnung. Die Bilder zeigen den lift force coefficient für den downstream Zylinder bei $Re = 6,1 \cdot 10^4$ und Strömungserscheinungen in staggered Anordnungen. (c_D = drag coefficient; c_{D0} = drag coefficient für Einzelzylinder; c_L = lift coefficient)

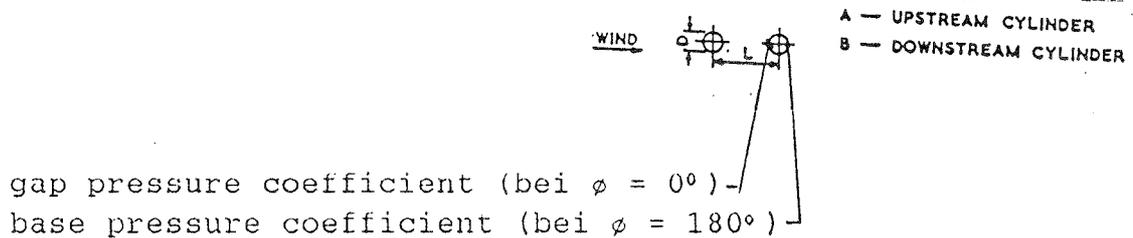


Das folgende Bild enthält Meßergebnisse der Wirbelablösefrequenz von Jshgai u.a., die im Jahr 1972 veröffentlicht wurden. Der upstream Zylinder hat eine höhere Strouhalzahl. Die Spitze wird bei $L/D = 1$ erreicht. Beim downstream Zylinder treten geringere Werte auf. Die Strouhalzahl liegt unter dem Einzelzylinder.



Zdravkovich, M. M.; Pridden, D. L.: Interference between two circular cylinders; series of unexpected discontinuities. Journal of Industrial Aerodynamics 2(1977) Seite 255-270.

Wenn zwei Zylinder in Tandemanordnung angeordnet sind, zeigen sich bei bestimmten Abstandsverhältnissen diskontinuierliche Sprünge bei den Meßwerten für den front (gap) und base Druck.



Durchgeführt wurden systematische Messungen der drag und lift-Kräfte am downstream Zylinder bei unterschiedlichen Abstandsverhältnissen T/D (transverse) und L/D (longitudinal).

Bei der Tandemanordnung wurde der diskontinuierliche Bereich bei Abstandsverhältnissen $L/D \approx 3,5$ gefunden. Bei der side by side Anordnung trat dieser Effekt bei $T/D \approx 2$ auf. Der dritte diskontinuierliche Bereich wurde bei staggered Anordnung bei $L/D = 3$ und $T/D = 1/4$ gefunden. Die Existenz dieser diskontinuierlichen Bereiche kann strömungsinduzierte Schwingungen mit großen Amplituden erzeugen.

Zdravkovich, M. M.: Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. Flow induced vibrations in fluid engineering. September 14-16, 1982, England

Interferenzerscheinungen zwischen zwei Kreiszyklindern in verschiedenen Anordnungen bringen Veränderungen der Wirbelablösung. Die Resultate hängen von der Zylinderanordnung ab. Diskontinuierliche Veränderungen des Strömungsbildes können große Amplituden bei bestimmten hohen kritischen Windgeschwindigkeiten erzeugen. Die verschiedenen Varianten können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

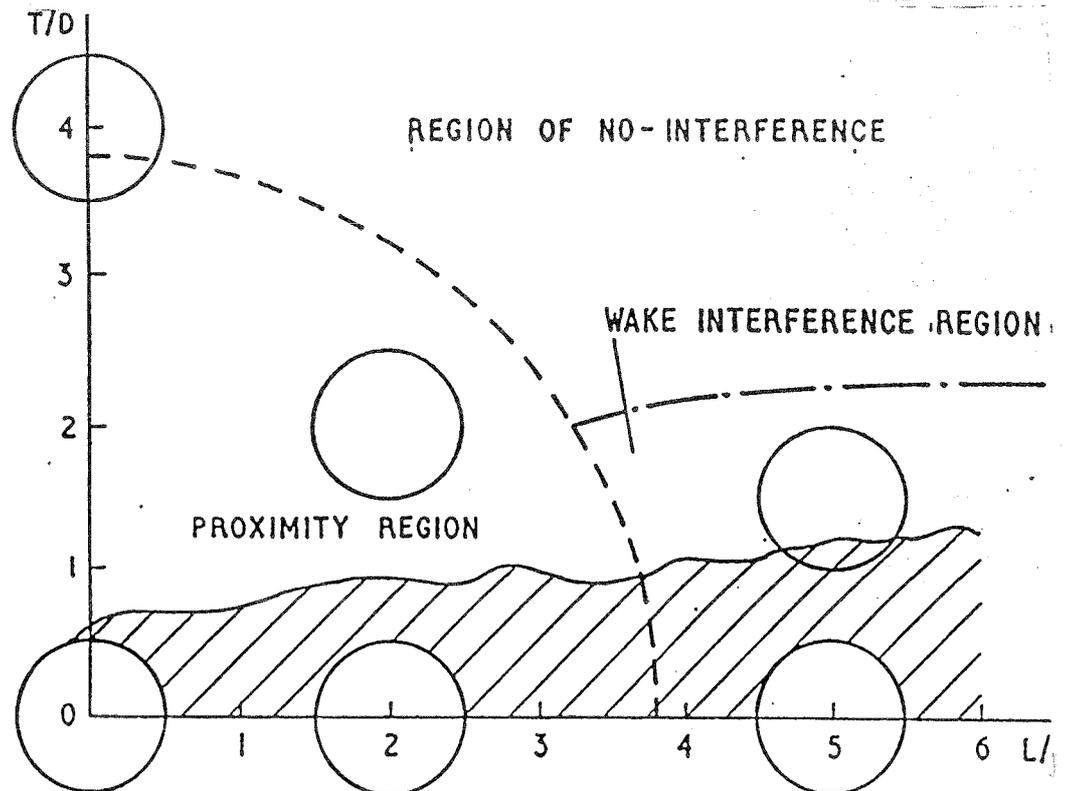
1. Strömungsinstabilität führt zu schnell aufbauenden großen Amplituden vorherrschend in Windrichtung.
2. Strömungsinstabilität führt zu langsam aufbauenden Amplituden bis zu bestimmten Größen, vorherrschend in Windrichtung.
3. Strömungsinstabilität führt allmählich zu großen Amplituden vorherrschend quer zur Windrichtung.

Die Interferenz zwischen zwei Zylindern wird beginnen, entweder wenn die Anordnung weitgehend geschlossen ist (enge Zylinderanordnung), oder wenn der hintere Zylinder an den vorderen grenzt oder in seinem Nachlauf ist. Die erste Kategorie heißt proximity interference und die zweite wake-interference.

Die proximity-interference schließt alle Anordnungen (tandem, syde by side, staggered) bis zu bestimmten Abständen zwischen den Zylinderachsen ein. Die wake-interference tritt ziemlich weit stromabwärts in der Tandemanordnung und geringfügig bei der staggered Anordnung auf.

Das Bild zeigt schematisch die Regionen:

- keine Interferenz
- proximity-interference
- wake interference

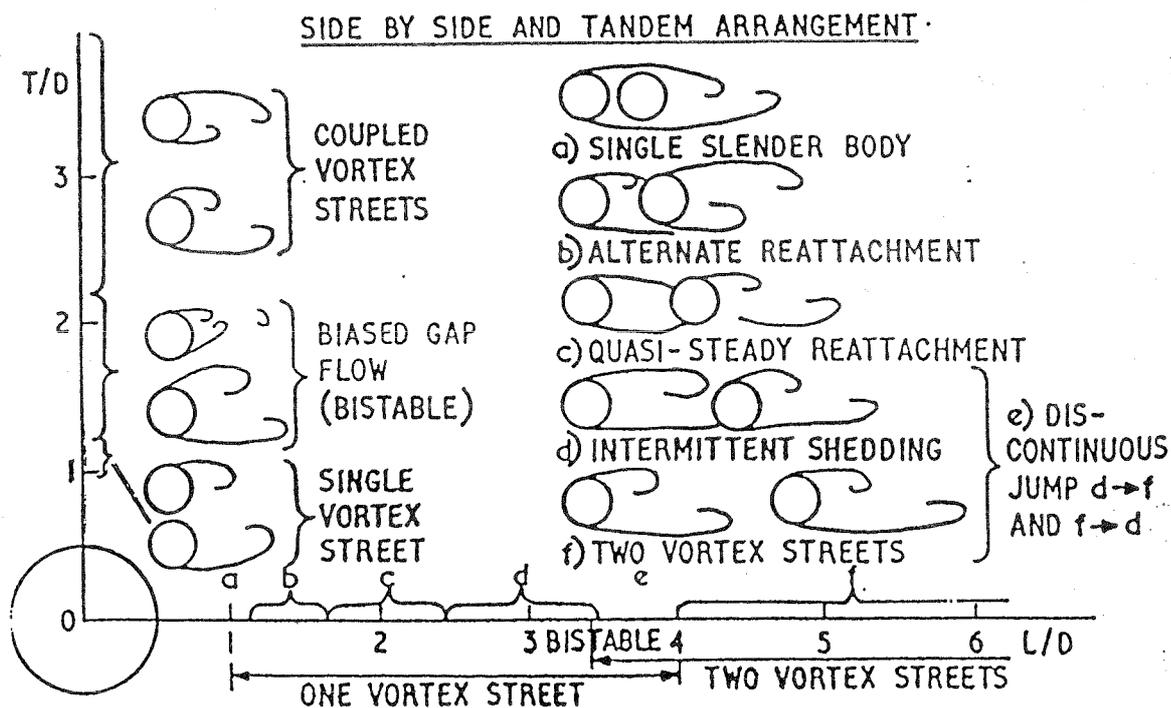


Der proximity effect für zwei Zylinder bei side by side Anordnung kann eingeteilt werden in drei Strömungsmerkmale:

- Kleiner Zylinderabstand $1 \leq T/D < 1,2$ eine Wirbelstraße wird stromabwärts geformt. Zwei Zylinder wirken als Einzelkörper.
- Kleiner Zylinderabstand $1,2 < T/D < 2,2$. Die Frequenz der Wirbelablösung ist in beiden Nachläufen unterschiedlich.
- Bei steigendem Abstand haben beide Wirbelstraßen die gleiche Frequenz.

Beim proximity effect in Tandemanordnung treten folgende Unterschiede auf:

- Für Abstände bis zu dem kritischen Bereich von L/D stromabwärts wird die Wirbelstraße hinter der upstream Zylinderfront unterdrückt.
- Für Abstände über dem kritischen Bereich erzeugen beide Zylinder Wirbelstraßen.



Experimentelle Angaben

vortex shedding {

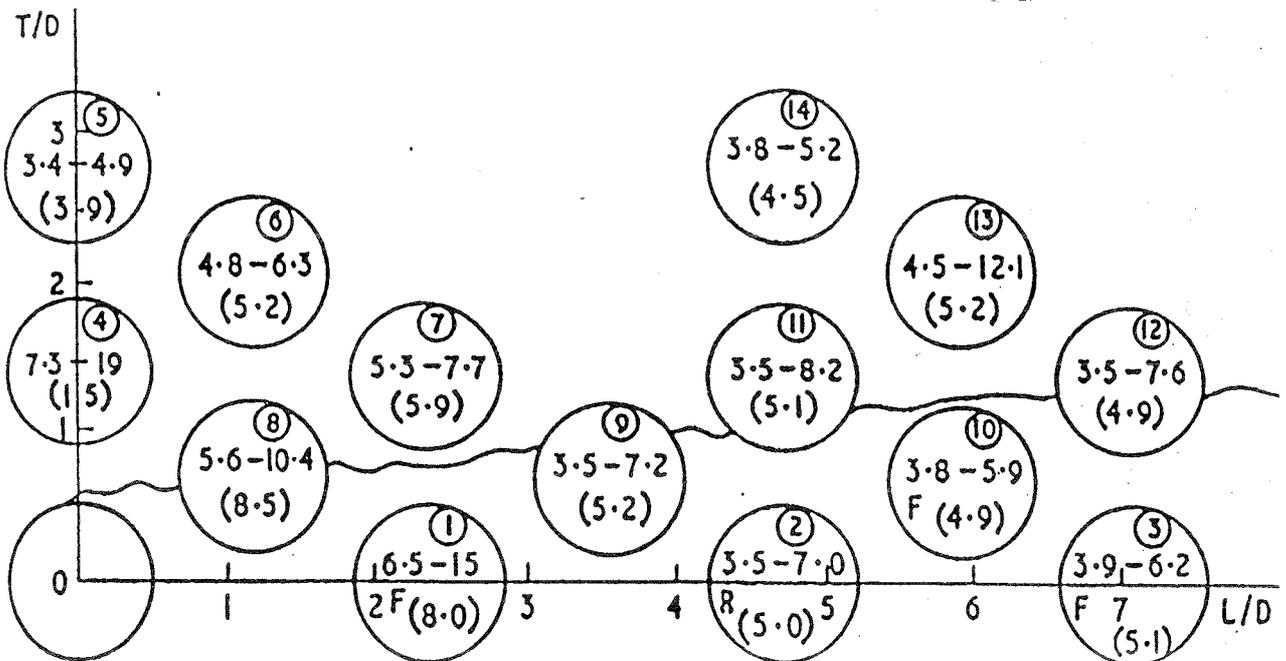
- Windkanal 0,3 · 0,6 m
- Windgeschwindigkeitsbereich 6...36 m/s
- Zylinder aus Aluminiumrohren, Außendurchm. 25,3 mm
- Länge 296 mm
- Eigenfrequenz 71 Hz
- logarithmisches Dämpfungsdekrement 0,013
- Scrutzahl 23
- Reynoldszahlbereich $1 \cdot 10^4$ bis $8 \cdot 10^4$

fluid-elastic forces {

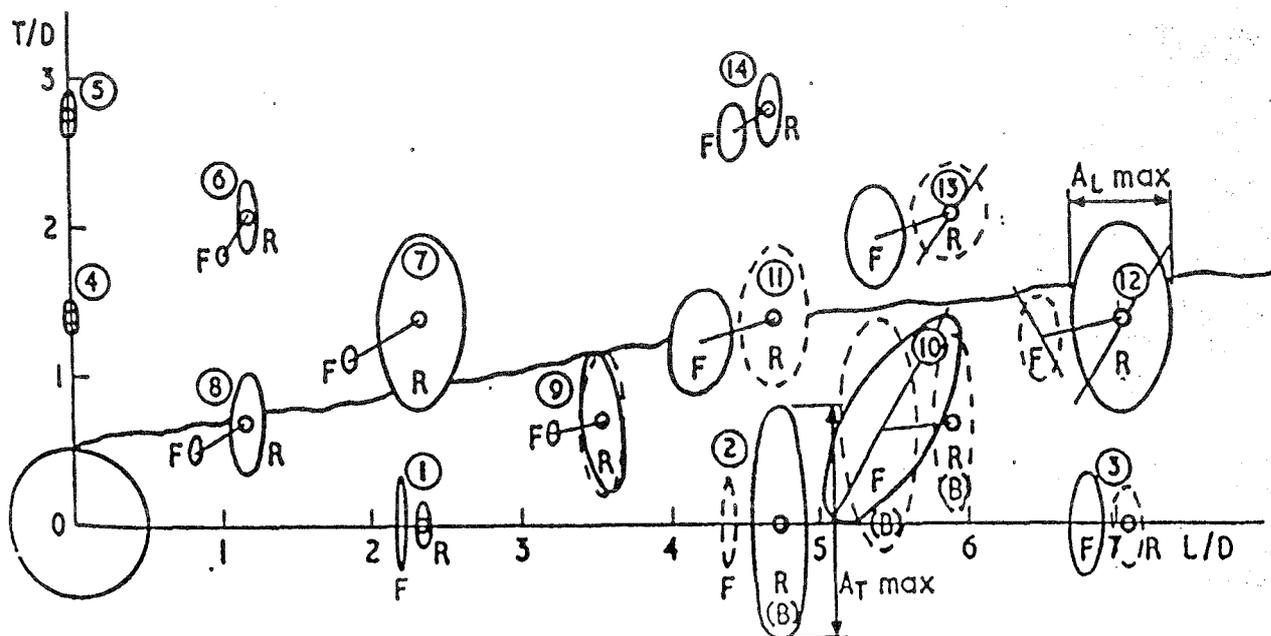
- Windkanal 0,45 · 0,45 m
- Zylinder aus Aluminiumrohren, Außendurchmesser
- 38,1 und 50,8 mm
- Länge 406 mm
- logarithmisches Dekrement der Dämpfung 0,07
- Scrutzahl 80
- Reynoldszahlbereich $1,5 \cdot 10^4$ bis $9,5 \cdot 10^4$
- Eigenfrequenz 10,5 Hz

Wirbelerregte Schwingungen

Im Bild sind die experimentellen Anordnungen für die proximity-interference, wake-interference und no-interference Regionen dargestellt. Im Kreis sind die reduzierten Geschwindigkeiten $W = v/n_c \cdot D$ (v = freie Strömungsgeschwindigkeit, n_c = Eigenfrequenz des Zylinders, D = Zylinderdurchmesser) der Anfangs- und Endgeschwindigkeit im Synchronisationsbereich enthalten. In runden Klammern ist die kritische reduzierte Windgeschwindigkeit, bei der die maximale Amplitude auftrat, dargestellt.



Im nächsten Bild sind die erhaltenen Schwingungsbilder des Frontzylinders F (upstream) und des hinteren (rear) Zylinders R (downstream) für die maximale Amplitude bei Wirbelerregung angegeben. Keine Interferenzwirkungen treten bei Anordnung 14 auf. Die maximale Antwort wurde bei der Anordnung 10 gefunden, wo der Zylinder vollständig im Nachlaufbereich stand. Die Amplitudenwerte der Zylinder sind im Bild auf das 10 fache vergrößert dargestellt.



Die wirbelinduzierten Schwingungen hängen von der Zylinderanordnung ab. Die Schwingungen in der proximity-interference Region waren bedeutend größer als in der no-interference Region. Der hintere Zylinder hatte bedeutend größere Amplituden als der vordere Zylinder. Die Zylinderschwingungen mit großen Amplituden lagen stromabwärts in der wake-interference Region.

Anmerkung

Die im Beitrag beschriebenen Ergebnisse der Fluid-elastic-excitation wurden nicht ausgewertet, da diese Schwingungserscheinungen experimentell im Rahmen der vorliegenden Forschungsaufgabe nicht untersucht werden.

Medeiros, E. B.; Zdravkovich, M. M.: Flow induced oscillations of two unequal circular cylinders. Eighth International Conference on Wind Engineering, 8-12 Juli 1991

Bei den beschriebenen Versuchsergebnissen wurde die Strouhalzahl von 10 bis 300 variiert. Die Zylinderdurchmesser haben Verhältnisse von 2:1 und 1:2. Es wurden Messungen bei verschiedenen Anordnungen und verschiedenen reduzierten Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Ermittelt wurden die kritische Windgeschwindigkeit für verschiedene Tandem-, side by side- und staggered Anordnungen.

Die Amplituden von zwei Zylindern in x- und y- Richtung können durch folgende Parameter beschrieben werden.

$$\frac{A_j(x,y)}{d,D} = F_j [D/d, L/D, T/D, v_{ri}, S_{ci}, Re_i]$$

i=1,2

Dabei bedeuten: d, D = kleinerer und größerer Durchmesser
A/D bzw. A/d = relative Amplituden
L = Abstand zwischen den Zylindern in Strömungsrichtung
T = Abstand zwischen den Zylindern quer zur Strömungsrichtung
 $v_r = v/n \cdot d$ oder $v/n \cdot D$ = reduzierte Windgeschwindigkeit
 $S_c = 2 \cdot m \cdot \delta / \rho \cdot d^2$ oder $2 \cdot M \cdot \delta / \rho \cdot D^2$
= Scrutonzahl
 Re = Reynoldszahl bezogen auf die zwei Durchmesser

Bei der experimentellen Untersuchung wurden folgende Varianten betrachtet:

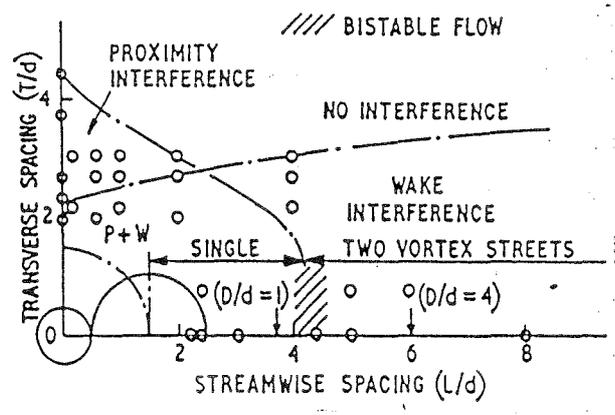
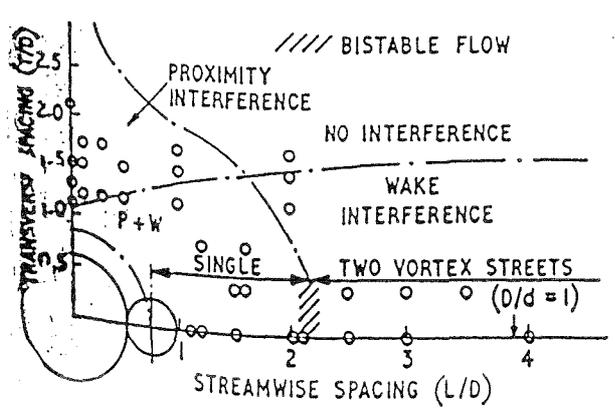
- $D/d = 2$ und $d/D = 0,5$
- $1,25 < L/D < 3$ und $1,5 < L/d < 7$
- $1,25 < T/D < 2,5$ und $1,5 < T/d < 4,2$
- $10 < V_{rD} < 65$ und $8 < V_{rd} < 100$
- $10 < S_c < 300$
- $4 \cdot 10^3 < Re < 7 \cdot 10^4$

Im nachstehenden Bild sind die untersuchten Varianten mit Kreisen gekennzeichnet. Die Anordnungen liegen in drei Interferenzbereichen.

Der upstream Zylinderbereich ist

- größer

- kleiner

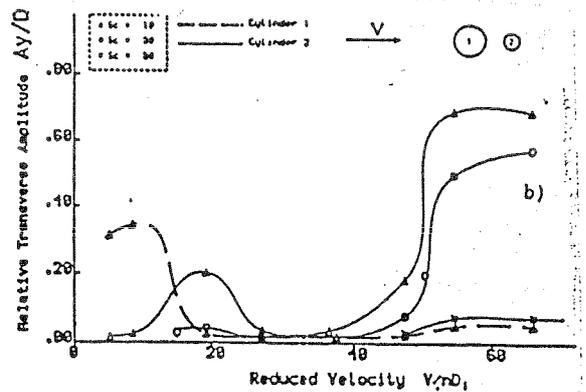
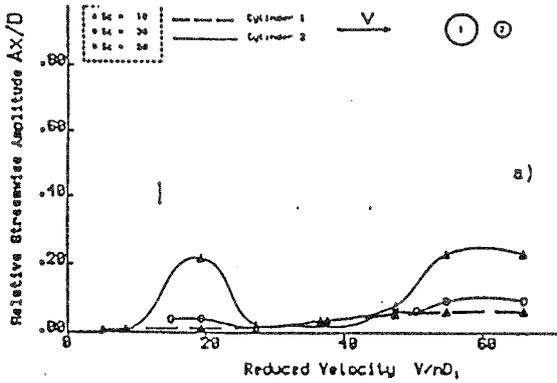


Das nächste Bild enthält typische Amplitudenwerte. Der upstream Zylinderdurchmesser ist der größere. Die Amplitude in Anströmrichtung ist relativ klein, während quer zur Anströmrichtung bei beiden Zylindern bei $v_r=45$ hohe Amplituden beginnen.

Schwingungsamplituden bei Tandemanordnung, $L/D=1,2$:

- in Anströmrichtung a)

- quer zur Anströmrichtung b)

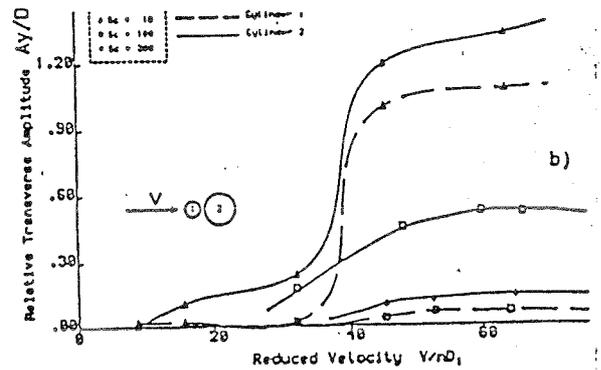
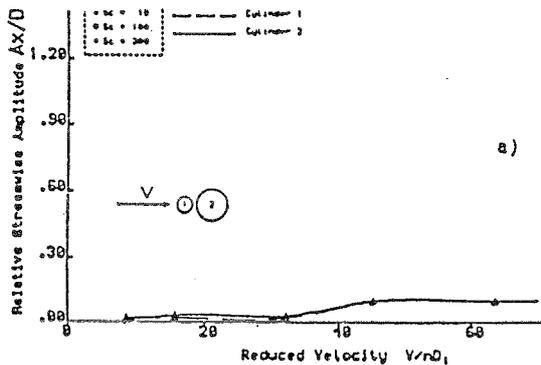


Im folgenden Bild ist eine umgekehrte Tandemanordnung untersucht worden. Der upstream Zylinderdurchmesser ist der kleinere. Die Schwingungsamplitude in Anströmrichtung ist klein, während quer zur Anströmrichtung bei $v_r=3,5$ große Werte entstehen.

Schwingungsamplituden bei umgekehrter Tandemanordnung, $L/D=1,2$:

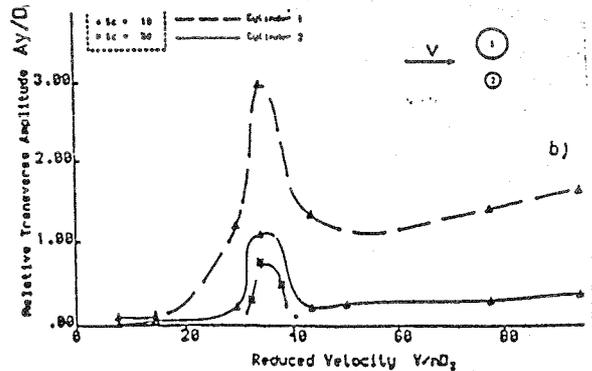
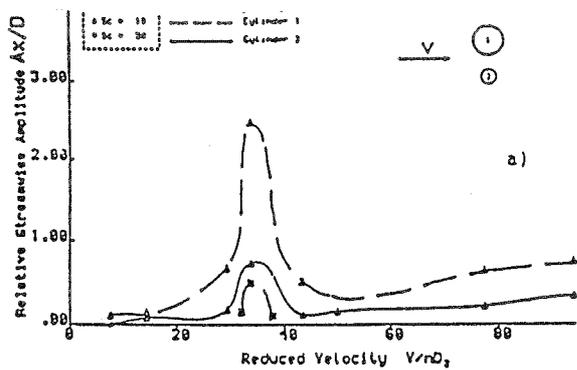
- in Anströmrichtung a)

- quer zur Anströmrichtung b)



Im nächsten Bild werden kleine Instabilitäten bei side by side Anordnung angegeben. $(A_y/D)_{max} = 0,3$ tritt wieder bei $v_r=32$ auf. Schwingungsamplituden bei side by side Anordnung, $T/D=1,15$:

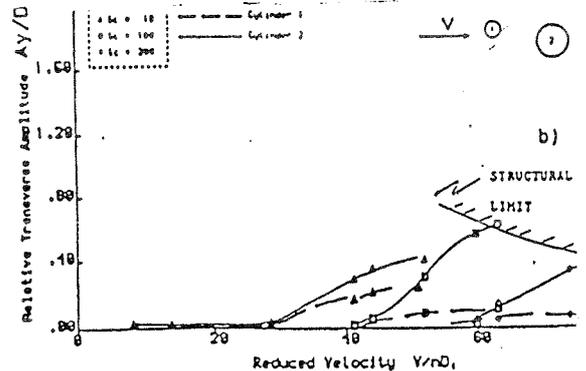
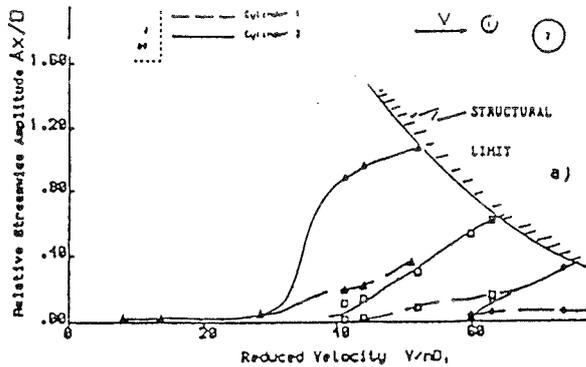
- in Anströmrichtung a) - quer zur Anströmrichtung b)



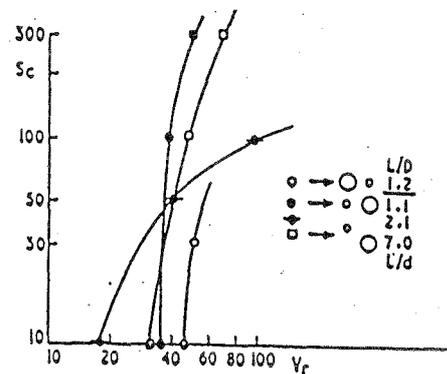
Im nachstehenden Bild ist eine weitere Anordnung mit starken Instabilitäten angegeben. Die vorherrschende Amplitude tritt in Anströmrichtung auf, bei $v_r=25$ für $Sc=10$. Bei $Sc=300$ liegt A/D unter $0,2$ bei $v_r=70$.

Schwingungsamplitude bei staggered Anordnung, $L/d=7,0$, $T/d=0,8$:

- in Anströmrichtung a) - quer zur Anströmrichtung b)



Die kritische Windgeschwindigkeit $v_{r,c}$ wird dort angesetzt, wo eine schnelle Steigerung der Amplituden erzeugt wird. Im Bild wird die kritische Windgeschwindigkeit $v_{r,c}$ in Abhängigkeit von der Scutonzahl für drei Anordnungen dargestellt. Die Tandemanordnung mit $L/D=1,2$ ist die stabilste, wenn der upstream Zylinder den größeren Durchmesser aufweist. Am wenigsten stabil ist die Tandemanordnung mit $L/D=2,2$. Die anderen Tandem- und staggered Anordnungen liegen dazwischen.



**Teil 2: Zusammenstellung
von vorhandenen
Schornsteingruppen
in Ostdeutschland**

Forschungsvorhaben

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei
kreiszyklindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

Teil 2 Zusammenstellung von vorhandenen Schornsteingruppen in
Ostdeutschland

IfBt - Az.: IV 1-5-657/91

Bearbeiter:

Prof. Dr. Gerhard Spaethe
Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Mitglieder der Betreuergruppe:

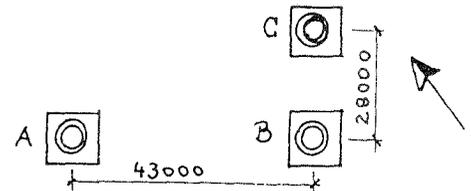
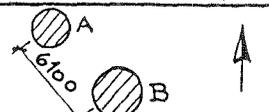
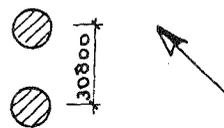
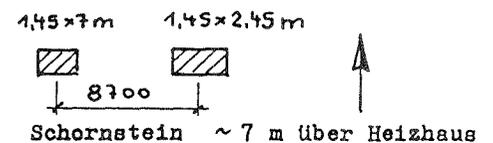
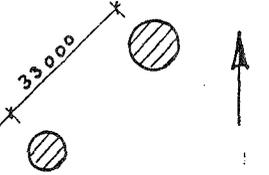
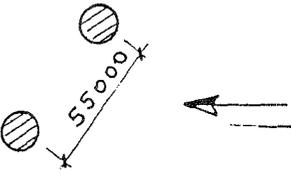
Prof. Dr. Ruscheweyh
Prof. Dr. Petersen
Dr. Nieser
Dipl.-Ing. Hirtz

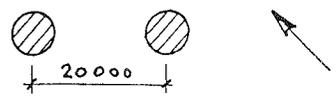
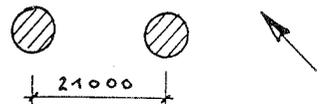
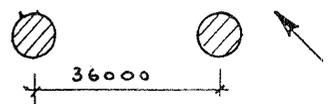
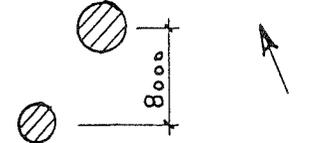
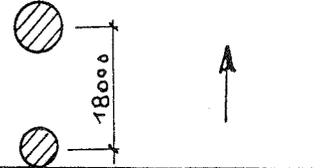
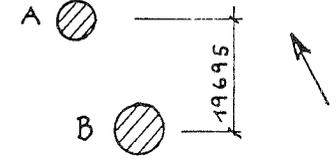
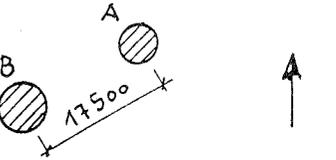
Zeuthen im Dezember 1991

Zusammenstellung von bestehenden Schornsteingruppen aus Stahl-
beton (Stb) Mauerwerk (MW) und Stahlblech (Sb)
in Ostdeutschland

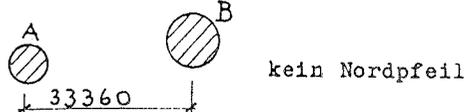
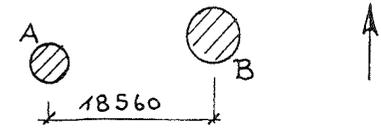
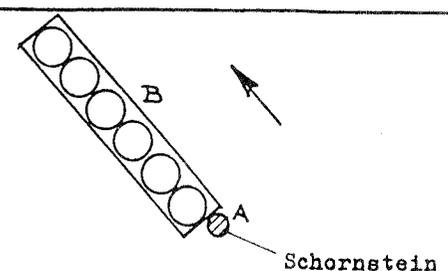
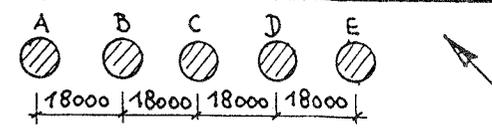
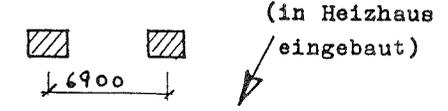
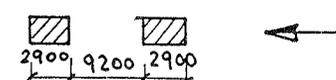
<u>Verwendete Bezeichnungen:</u>	MW	Mauerwerk
	Stb	Stahlbeton
	Sb	Stahlblech
	Z	Zylinder
	K	Konus
	R	Rechteckschornstein
	a	Mittelpunktabstand
	D_m	mittlerer Durchmesser

Die Zusammenstellung beruht auf Angaben des ehemaligen
VEB Spezialbaukombinat Magdeburg.

Lfd. Nr.	Ort	H [m]	a/Dm	Form	Bauweise	Baujahr	Lage	Projektdokum.
1	Berlin (Wilhelminenhofstraße)	A) 50 B) 50 C) 50	9,56 6,22	Z/K 	MW MW MW	1905 1905 1905		nicht vorhanden
2	Pankow	A) 19 B) 35	2,84	keine Angaben	MW/1 (wird abgebrochen) MW	- nicht bekannt - im Bau		-
3	Berlin Köpenicker Straße	A) 70 B) 70	6,61	K K	MW MW	1953 1953		-
4	Berlin Herzbergstr. 68-70	A) 12,75 B) 12,75	~4,19	R (zylind) R "	MW MW	ca. 1920 ca. 1920		nicht vorhanden
5	Berlin Herzbergstr. 79	A) 59 B) 59	8,0	keine Angaben	MW MW	1892 1892		nicht vorhanden
6	Merteroda	A) 57 B) 103	6,11	keine Angaben wahrsch.K	MW MW	1912 1939		für "B" vorhanden
7	Hüngeda	A) 33 B) 40	10,18					nicht vorhanden

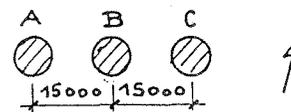
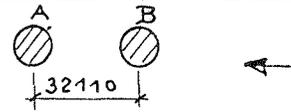
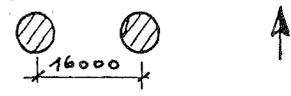
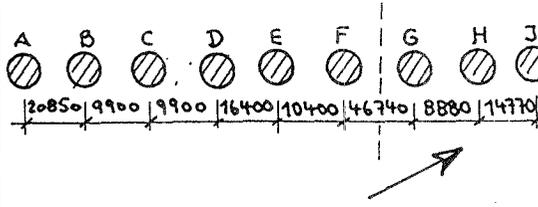
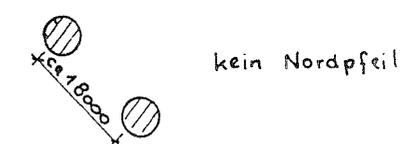
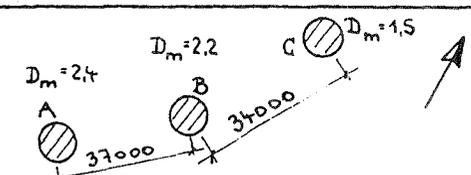
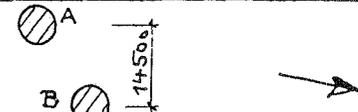
Lfd. Nr.	Ort	H [m]	a/Dm	Form	Bauweise	Baujahr	Lage	Projektdokum.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	Erfurt/ Gispersleben	A) 80 B) 75	4,0	keine Angaben	Stb	1960 1960		nicht vorhanden
9	Teistungen	A) 100 B) 100	6,36	keine Angaben	MW MW	1967 1967		vorhanden
10	Deuna	A) 100 B) 100	5,54	keine Angaben (Sch-A 72/ 460.0.1)	Stb Stb	1974 1974		vorhanden (Sch-A 72/ 460.0.1)
11	Gräfenroda	A) 40 B) 70	3,08	K K	MW MW	ca. 1928 1965		-
12	Erfurt Getreidewirtschaft Heizwerk	A) 60 B) 60	6,0 6,0	keine Angaben	MW Stb	1966 1980		-
13	Bernau	A) 40 B) 100	3,76	keine Angaben	MW/i Stb	1984 1984		A: BMK Ost Berlin Nr.2/228/02/05/01 B: SBKM Sch-A-83/3900.0.2
14	Eberswalde/ Finow	A) 38 B) 84	3,57 (nur ein \emptyset angegeben)	K K	MW MW	1900 1929		A: nicht B: vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	Schwedt Papier-u. Karton- werke	A) 60 B) 140	4,22	keine An- gaben	MW Stb	1961 1979		nicht vorhanden
16	Schwedt- PCK	A) 140 B) 140	8,17	keine An- gaben	Stb Stb	1963 1963		Ipro K-M-St. Proj.Nr.K-M-St 67 P8/5061
17	Schwedt- PCK	A) 70 B) 100	7,98	keine An- gaben	MW MW	1963 1963		nicht vorhanden
18	Eberswalde- Finow 2	A) 30 B) 30,5	6,67	keine An- gaben mit Ab- spannung	MW S.b	1955 1982		vorhanden
19	Eberswalde- Finow 2	A) 36 B) 32		K Z	MW MW	ca. 1900 ca. 1900		nicht vorhanden
20	Brieskow- Finkenheerd	A) 110 B) 110 C) 114 D) 110 E) 125	8,75 8,36 3,54 8,42	K K K K K	MW mit MW Stahl- MW einlagen Stb Stb	1921 1922 1928 1929 1931		nicht voll- ständig

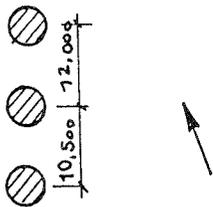
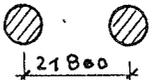
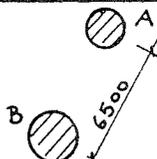
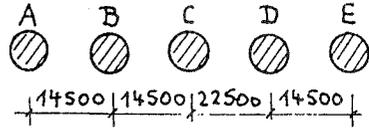
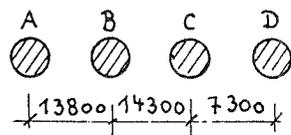
1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	Steintoch b. Seelow	B) 100 A) 50	7,74	keine Angaben	Stb Sb(nicht abge- spannt)	1984 1983		A: vorh. B: vorh. 6251-2-5266/ 21-9841
22	Gargast b. Seelow	A) 50 B) 60	8,03	keine Angaben Z	Sb(nicht abgesp.) MW	1983 1984		A: vorh. B: vorh. 6251-1-5167/ 21-9841
23	Herzfelde	A) 70 B) 45		Z	Sb Kalkbrenn- öfen im Stahlfach- werk	1972 1972		vorhanden (Adresse an- gegeben)
24	Herzfelde	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100 E) 100	3,48	K K K K K	Stb Stb Stb Stb Stb	1967 1967 1961 1961 1967		vorhanden (Adresse angegeben)
25	Neuenhagen	A) 20 B) 20	2,38	R R	MW MW	1912 1912		unvoll- ständig
26	Strausberg	A) 24 B) 24	10,57/ 27=3,9	R R	MW MW	1974 1974		vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	Kahla	A) 70 B) 70 C) 70	4,19 8,55	K K K	MW MW MW	1960 1960 1960		KMST 598/ 2865 (v.9.3.59)
28	Jena Energie- kombinat	A) 180 B) 225	8,92	K K	Stb Stb	1971 1982		A:KMST 68P8- 5215/12 B:SchwA81/ 3066.0.1
29	Gera HKW	A) 120 B) 120	6,47	K K	Stb Stb	1960 1965		Spezialbau Leipzig 15/052 (v.21.1.1958)
30	Schwarza	A) 90 B) 150	4,8	Z	MW Stb	1954 1962		- teilweise dort im Archiv
31	Maxhütte- Unterwellen- born Kesselhaus- Ost	A) 28 B) 35	5,0	Z Z	Sb Sb	1958 1958		-
32	Maxhütte- Unterwellen- born Hochofen	A) 70 B) 90	5,04	K K	MW MW	1910 1961		-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
33	Friedersdorf	A) 103,6 B) 103,6 C) 103,6	4,33	K K K	MW MW MW	1911 1911 1911		vorhanden
34	Weißenfels	A) 70 B) 90	6,32	K(quadr. Sockel) K	MW MW	1913 1922		-
35	Krumpa	A) 100 B) 100	6,89	K K	MW MW	1960 1960		Konzess.akte Bau 966/967
36	Zeitz	A) 100 B) 100	10,85	Z K	MW Stb	1937 1937		Konzess.akte 738
37	Bitterfeld	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100 E) 146 F) 146	10,59 9,4 4,35 5,9 2,98	K K K K K K	MW MW MW MW MW MW	1915 1916 1917 1918 1927 1935		A B nicht C vor- D handen E Zeichnun- F gen vor- handen
38	Wolfen	A) 90 B) 120	5,03	K K	MW MW	1969 1963		nicht vor- handen
39	Wolfen	A) 120 B) 146	3,19	K K	MW MW	1911 1936		nicht vor- handen

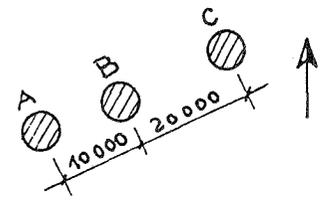
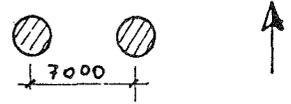
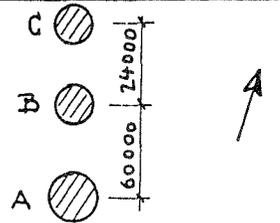
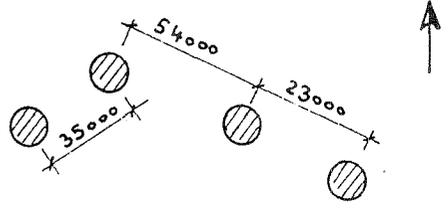
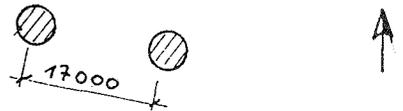
1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	Zementwerke Bernburg Sitz Nienburg	A) 100 B) 100 C) 100	2,85 2,85	keine An- gaben	MW MW MW	1961 1961 1961		B 60-2488/1
41	Filmfabrik Wolfen	A) 145,03 B) 145,85	4,01	keine An- gaben	MW MW	1936 1936		-
42	Walzwerk Hettstedt	A) 100 B) 100	4,49	K K	MW MW	1957 1966		B 66-4655
43	Kupfer- u. Silberhütte Hettstedt	A) 35 B) 28 C) 35 D) 35 E) 35 F) 35 G) 30,2 H) 45 I) 35	8,34 3,96 3,96 6,56 4,16 17,0 2,96 5,37	Z Z Z Z Z Z K keine Angabe Z	Sb Sb Sb Sb Sb Sb MW Sb Sb	1972 1973 1974 1975 1976 1977 1910 1984 1978		vorhanden für "G" keine Angaben
44	Schönheide	A) 62 B) 60	5,29	keine Angaben	MW MW	1954 1920		nicht vorhanden
45	Aue	A) 40 B) 31 C) 27	Abstände größer 10 D		MW zum Abbruch 1903 MW vorgesehen 1905 MW 1915			Bauakten vorhanden
46	Rothenkirchen	A) 30 B) 40	5,07	keine Angaben	MW MW			A) Spezialbau- Dresden B) SBKM A82/3116.0,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
47	Braunkohlenwerk Thräna	A) 100 B) 100	3,64 D _m nicht genau bestimmbar	K K	MW MW	1928 1928	<p>Projekt beim Betreiber</p>	vorhanden
48	Kraftwerk Regis	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100	kein maßgeb. ϕ angegeben	K K K K	MW MW MW MW	1959 1957 1930 1928		vorhanden
49	Colditz	A) 40 B) 40	nur lichte Weite angegeben	K K	MW MW	1935 1935		vorhanden
50	Grimma	A) 40 B) 50 C) 50	nur lichte Weite angegeben	Z K K	Sb (ohne Absp.) MW MW	1983 1968 1962		vorhanden
51	Naunhof	A) 35 B) 60	~ 7	K Z	MW (für Abbruch) Stb	1960 1984		vorhanden
52	Osschatz	A) 30 B) 30 C) 30 D) 30 E) 30	~ 5 " " " "	K K K K K	MW MW MW MW MW	1967 bis 1971		vorhanden Nr. 588-5472
53	BKW Regis	A) 76 B) 86 C) 100		K K K	MW MW MW	1911 1913 1951		vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
54	Salzwedel Zuckerfabrik	A) 24 B) 24 C) 24 (13,3 m über Dach)	7,06 6,18	keine An- gaben	Sb nicht Sb abge- Sb spannt (wahrschein- lich Erneue- rung 1986)	1927 1927 1927		vorhanden
55	Gommern	A) 62 B) 62	6,06	K K	MW MW	1955 1965		nur "B" KMST 63/3645/1
56	Seehausen	A) 18 B) 30	~ 2,8 (da kein D _m angege- ben)	K K	MW MW	1962 1972		-
57	Calbe/Saale	A) 19 B) 19 C) 19 D) 22 E) 22	~ 5,8 ~ 5,8 ~ 9 ~ 5,8 (da kein D _m)	Z Z Z Z Z	Sb Sb mit Sb Ab- Sb span- Sb nung	1955 " " " "		-
58	Barby/Elbe	A) 20 B) 20 C) 20 D) 20	~ 10,6 ~ 11 ~ 5,6 (da kein D _m)	Z Z Z Z	Sb Sb mit Sb Abspan- Sb nung ca. 12 m über Kesselhaus	1979 " " "		-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
59	Hennigsdorf	A) 70 B) 30 C) 29 D) 50 E) 60	keine D_m angegeben	keine An- gaben (Proj.vorh.)	MW MW MW MW MW	1964 1924 1925 1924 1952		vorhanden
60	Brandenburg	A) 40 B) 70	$D_{mA}=1,7$ $-2,5$ $D_{mB}=4,6m$ $B-B=6,5$ $B-A_1=2,2$	keine An- gaben	Sb mit Ab- spannung MW	1970-75 1950-56		vorhanden
61	Rostock- Bramow	A) 80 B) 160	3,37	keine An- gaben	MW Stb	1963 1981		vorhanden A: B61-2816/ B: Sch-A76/ 1025.0.3
62	Peenemünde- Kraftwerk	A) 26 m B) über C) Filter- D) konstr.	5,81	keine An- gaben	Sb Sb Sb Sb	1970 " " "		nicht vorhanden
63	Güstrow	A) 40 B) 50	3,2	K K	MW MW	1968 1981		A: nicht B) unvoll- ständig
64	Kleinow	A) 30 B) 30 - Schornstein B zum Abbruch vorgesehen	6,56 (\varnothing am Fuß)	K K	MW MW	1958 1958		nicht vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
65	Crivitz	A) 16 B) 16 A: 8m über Dach B: 6m über Dach	2,48	R R	MW MW	1975 1983		vorhanden
66	Sukow	A) 22 B) 22	1,54	R R	MW MW	1984 1984		vorhanden
67	Grimmen (Heizhaus)I	A) 40 B) 50	6,19	keine Angaben	MW Stb	1963 1984		vorhanden (PB 32/50/84)
68	Grimmen (Heizhaus)II	A) 40 B) 50	6,19	keine Angaben	MW Stb	1966 1984		- (gleiche Sch. wie 67)
69	Chemnitz (Wittsendorfer Str.)	A) 30 B) 30	~7,5 (da geschätzte Werte)	Z mit Abspannung	Sb Sb	1982 1982		-
70	Oelsnitz	A) 60 B) 120 "A" wird abgebaut	3,53	Z (mit Abspannung) K	Sb Stb	1983 1984/85		A: Nr. 4.39.06.23 B: Sch-A 83/ 2112.0.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
71	Suhl	A) 56 B) 56 C) 55	3,33 ~ 5,9 (da kein D _m)	Z } ohne Z } Abspan- K } nung	Sb Sb MW	1959 1959 1924		-
72	Suhl	A) 22 B) 30 ungenutzte Schornsteine	3,6	K K	MW MW	1916 1922		-
73	Grimmenthal	A) 100 B) 80 C) 80	6,7 3,0	Z Z Z	Stb Stb Stb	1972 1961 1961		-
74	Gröditz (Stahlwerk I)	A) 70 B) 70 C) 60 D) 70	8,86 1,5 6,2	- - - -	MW MW MW MW	1918 1951 1934 1951		A) nicht vorh. B) vorh. C) nicht vorh. D) vorh.
75	Gröditz (Stahlwerk II)	A) 50 B) 55	5,7	- -	MW MW	1951 1953		vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
76	Riesa (Martinwerk I)	A) 68 B) 60 C) 49 D) 50 E) 50 A ₁) 50 B ₁) 50 C ₁) 50	7,05 5,76 5,8 7,3 3,22 2,6	- - - - - - - -	MW MW MW MW MW MW MW MW	1913 1935 1940 1922 1934 1934 1939 1940		vorhanden
77	Riesa (Martinwerk II)	A) 60 B) 60 C) 60 D) 60	7,37 7,37 7,65	- - - -	MW MW MW MW	1950 1950 1950 1950		vorhanden
78	Ushmannsdorf	keine Lageangaben, aber aus Schreiben keine kritischen Abstände ersichtlich						nicht vorhanden
79	Pirna (Kunstseidenwerk)	A) 90 B) 110	9,74	- -	MW MW	1914 1939		vorhanden
80	Pirna (Energiekombinat)	A) 100 B) 100	5,57	- -	Stb Stb	1958 1958		vorhanden
81	Freital Gruppe 1 Gruppe 2	A) 50 B) 50 A) 50 B) 60	6,38 1,87	- - -	MW MW MW MW	1953 1953 1961		alles Ipro KMST
82	Freital	A) 51,26 B) 49,61	3,48	- -	MW MW	1969 1952		vorhanden

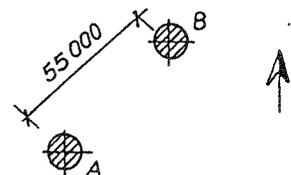
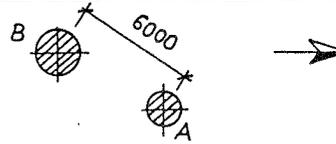
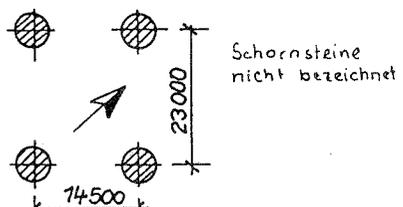
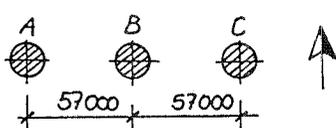
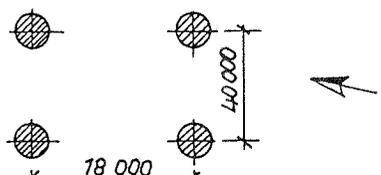
1	2	3	4	5	6	7	8	9
83	Lommatzsch (Meißen)	A) 20 B) 20 C) 20 D) 20	1,29 1,29	- - - -	Sb Sb Sb Sb	1981 1981 1981 1981		vorhanden
84	Schmiede- berg	A) 60 B) 60	7,0	- K	MW MW	1963 unbe- kannt		A: vorhan- den B) nicht
85	Gera-Nord HKW	A) 220 B) 220 C) 200	A-B 6,03 A-C 7,57 B-C 7,89	K K K	Stb Stb Stb			vorhanden
86	BHK Frei- berg Meldenhütten	A) 200 B) 200	7,54 (bei 0,7M)	K K	Stb Stb			vorhanden
87	Chemiewerk Coswig	A) 120 B) 120	10,92 (bei 0,7M)		MW MW			
88	Gast. Zschornowitz Gast. Vockerode	A) 100 B) 100	7,35		Stb Stb			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
89	HKW Chemnitz Nord I	A) 100 B) 100	5,35		Stb Stb	1958 ?		vorhanden
90	Zuckerfabrik Demmin	A) 60 B) 60	7,09	Z Z	Stb (60x1,6) Stb (60x1,6)			vorhanden
91	Pumpenfabrik Salzwedel	A) 30 B) 30	3,71	Z Z	Stb (30x1,2 Stb Moscho)	1981		vorhanden
92	Magdeburg Rothensee	A) 100 B) 100	8,91		Stb Stb			vorhanden
93	HW Chemnitz Beimler Str.	A) 90 B) 140	4,4		MW MW			
94	Heizwerk Chemnitz Süd	A) 40 B) 225	8,5		MW Stb			
95	Hagenwerder I	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100	4,79 5,19 4,79		Stb Stb Stb Stb			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<u>Interimsschornsteinstandorte</u>								
96	Dresden-Leuben Schwarzenberg Wittstock	A) 40 B) 100	2,74		MW Stb			
97	Wurzen	A) 40 B) 120	2,43		MW Stb			vorhanden (LVO)
98	Heiligenstadt	A) 40 B) 150	2,51		MW Stb			
99	Ludwigsfelde Sandershausen (im Bau) Fährbrücke	A) 40 B) 170	3,29 (0,7 H)		MW Stb			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	Kalikombinat "Werra"	A) 103 B) 100,8 C) 101,3 D) 61 E) 61 F) 61	D-E 3,7 E-F 5 Blechschorensteine nicht bezeichnet MW-Schorensteine nicht kritisch		MW MW MW Sb Sb Sb	1924 1940 1928 1983 21 m 1965 über 1972	<p>kein Nordpfeil</p>	keine Angaben
101	Kalikombinat "Werra" Fabrik "W. Pieck"	A) 110 B) 65 C) 100 D) 67 E) 62	A-B 3,18 B-D 8,77 C-D 16 C-E 3,7 (wahrscheinl. Ø am Fuß)		MW MW MW MW Sb (Provi- sorisch)	1943 1922 1961 1929 1984	<p>kein Nordpfeil</p>	keine Angaben
102	Kalikombinat "Werra" Fabr. "Marx- Engels"	A) 120 B) 98 C) 99 D) 40 E) 200 F) 40	A-B 7,4 B-D 12,7 D-F 27 G-F 7,2 F-E 12,5 C-E 9,6		MW MW MW MW Stb Sb	1977 1944 1940 1967 1984 1964		
103	Habke Kraftwerk "Phillipp Müller"	1) 90 2) 90 4) 130 5) 120 6) 130 7) 135	1-2 3,85 4-5 5 6-7 5,2	K K Z Z Z K	MW MW Stb Stb Stb MW	1928 1929 1930 1944 1935 1938		nicht vorhanden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
104	BKK Senftenberg (Kraftwerk Sonne)	A) 136 B) 136 C) 65 D) 65	B-C 5,88 A-D 10,4	K K K K	MW MW MW Stb	1900 1915 1936 1959		keine Angaben
105	BKK Senftenberg (Kraftw. Brieske)	A) 140 B) 140	7,9	K K	Stb Stb	1966 1966		keine Angaben
106	Lauchhammer Brikettfabrik	A) 62 B) 65	2,13		MW MW	1900 1926		nicht
107	Liebenweda Penkonik	A) 50 B) 55	5,3		MW MW	1940 1973		vorhanden
108	Weißwasser Oberlausitzer Glaswerke	A) 60 B) 60 C) 40 D) 28 E) 30	A-B 5,9 A-C 3,6 B-C 6,6 D-E 7,8 (nur Mündungs- \varnothing außen angegeben)		MW MW MW MW	1965 1965		nicht vorhanden
109	Döbern Glaswerk	A) 50 B) 50	5,4 (\varnothing am Fuß)	K K	MW MW	1965 1965		Ipro. K.-M.-St.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
110	Forst (Energiekombinat)	A) 80 B) 88	9,08	K K	MW MW	1972 1929		keine Angaben
111	Rüdersdorf	A) 25 B) ~30	3,9	Z K	Sb (Abspannung) MW	1979 1962		nicht vorhanden
112	Cottbus	A) 28,5 B) 28,5	~ 5 (Ø am Fuß)		MW MW	1960 1960		keine Angaben
113	Lauta (Schwarze Pumpe)	A) 110 B) 110 C) 110	~ 7,4 ~ 7,4		MW MW MW	1920 1920 1920		Zeichnung vorhanden
114	Zschornowitz	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100	~ 6 ~ 6,7		Stb Stb Stb Stb			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Gaskombinat <u>Schwarze Pumpe</u>							
115	Kraftwerk I	A) 120 B) 120 C) 120	4,44		Stb Stb Stb		nicht angegeben	
116	Kraftwerk II	A) 140 B) 140 C) 140	4,83		Stb Stb Stb		nicht angegeben	
117	Kraftwerk III	A) 200 B) 200	5,2		Stb Stb		nicht angegeben	
	Bereich Kraft- werke "Artur Becker" <u>Trattendorf</u>							
118	Kraftwerk I	A) 100 B) 100 C) 100 D) 100	4,8		Stb Stb Stb Stb		nicht angegeben	
119	Kraftwerk III	A) 120 B) 120	6,5		MW MW		nicht angegeben	
	Kraftwerk Plessa	A) 115 B) 120	15,3 nicht kritisch		MW MW			
	Braunkohlen- veredlung <u>Lauchhammer</u>							
120	Kraftwerk 64 Lauchhammer	A) 135 B) 135	5,9		MW MW		nicht angegeben	
121	Kraftwerk 65 Lauchhammer	A) 85 B) 85 C) 85	6,7 8,3		MW MW		nicht angegeben	

**Teil 3: Ergebnisse der
Windkanaluntersuchungen**

Forschungsvorhaben

**Winderregte Querschwingungen infolge
Wirbelablösung bei kreiszylindrischen
Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung**

Teil 3: Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen

Auftraggeber: Institut für Bautechnik
IfBt - Az.: IV 1-5-657/91

Bearbeiter: Prof. Dr. Gerhard Spaethe
Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Mitglieder der Betreuergruppe:
Prof. Dr. Ruscheweyh
Prof. Dr. Petersen
Dr. Nieser
Dipl.-Ing. Hirtz

Zeuthen im August 1992

INHALTSVERZEICHNIS

Vorbemerkungen

Bezeichnungen

Einführung und Zusammenfassung

1. Versuche zur Modellierbarkeit des transkritischen Bereiches am Einzelzylinder im mittleren Windkanal
 - 1.1 Versuchsaufbau und Versuchsumfang
 - 1.2 Ergebnisse der Variantenuntersuchungen
 - 1.2.1 Widerstandsbeiwert
 - 1.2.2 Turbulenzgrad im Nachlauf in Querrichtung
 - 1.2.3 Spektrale Dichte der Anemometer-Spannungsschwankungen
 - 1.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse von Variantenuntersuchungen

2. Modellierungsversuche des transkritischen Reynoldszahlbereiches am Einzelzylinder im großen Windkanal
 - 2.1 Physikalische Grundlagen
 - 2.2 Spezielle Aufgabenstellung
 - 2.3 Versuchsaufbau und Meßverfahren
 - 2.4 Versuchsumfang
 - 2.5 Versuchsergebnisse und Auswertung
 - 2.5.1 Widerstands- und statischer Querkraftbeiwert
 - 2.5.2 Dynamische Querkräfte
 - 2.5.3 Spektrale Dichten der Längsgeschwindigkeitsschwankungen
 - 2.6 Einschätzung der Ergebnisse
 - 2.6.1 Vergleich von Einzelzylindermessungen
 - 2.6.2 Zur Übertragung der Meßergebnisse von Mehrfachanordnungen in den transkritischen Reynoldszahlbereich

3. Strömungsnachlaufuntersuchungen in der Fließrinne

4. Windkanaluntersuchungen mit Zweiergruppen (Massetdämpfungsparameter $m_{\text{D}} \approx 26$) im mittleren Windkanal im unterkritischen Reynoldszahlbereich
 - 4.1 Versuchsergebnisse
 - 4.1.1 Strouhalzahlen der Doppelanordnungen

- 4.1.2 Kraftbeiwerte der Doppelanordnungen
- 4.1.3 Modellauslenkungen
- 4.2 Ergänzende Fließrinnenuntersuchungen

- 5. Windkanaluntersuchungen mit Zweiergruppen (Massedämpfungsparameter $m_{\text{d}} \approx 63$) im mittleren Windkanal im unterkritischen Reynoldszahlbereich
 - 5.1 Versuchsergebnisse der Doppelanordnungen
 - 5.1.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Doppelanordnungen
 - 5.1.2 Modellauslenkungen
 - 5.2 Zusammenfassung der Ergebnisse über Windkanalversuche an Zweiergruppen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

- 6. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von in Zweiergruppen angeordneten Kreiszyklindern bei Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches
 - 6.1 Versuchsaufbau
 - 6.2 Versuchsergebnisse von Doppelanordnungen bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung
 - 6.2.1 Vergleich von Strouhalzahlen und Querkraftbeiwerten
 - 6.2.2 Vergleich der maximalen Beanspruchungen mit Meßergebnissen von unterkritisch umströmten Doppelanordnungen

- 7. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Dreierreihenordnungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich
 - 7.1 Versuchsergebnisse
 - 7.1.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Dreieranordnung in Reihe

- 8. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Dreieckanordnungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich
 - 8.1 Strömungsnachlaufuntersuchungen in der Wasserfließrinne
 - 8.2 Versuchsergebnisse
 - 8.2.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Dreieckanordnung

- 9. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Vierer- und Fünfergruppen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

- 10. Literatur

VORBEMERKUNGEN

Das Phänomen der winderregten Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnungen wurde durch den Einsturz eines Stahlbetonschornsteines im Kraftwerk Boxberg bedeutungsvoll.

Am 24.11.1984 stürzte ein 150 m hoher Stahlbetonschornstein im Kraftwerk Boxberg ein, welcher im Windschatten eines 300 m hohen Stahlbetonschornsteines lag. Die Ergebnisse der vorgenommenen Schadensbegutachtungen ergaben, daß der Einsturz vorrangig infolge der winderregten Schwingungen quer zur Anströmrichtung erfolgte. Mit dem Ziel, dem Praktiker Berechnungsgrundlagen über die effektiv zu erwartenden winderregten dynamischen Belastungen bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnung zu übergeben, wurde das Forschungsvorhaben "Wirklichkeitsnahe Erfassung der Windwirkung auf rotationssymmetrische Baukörper, vorzugsweise für Massivschorensteine" bearbeitet [16].

Mit der Bearbeitung des Themas wurde im Jahre 1986 durch die Bauakademie begonnen. Auftraggeber war zunächst das damalige Spezialbaukombinat Magdeburg, Kombinatbetrieb Beton- und Kühlturmbau.

Durch die politische Wende und die darauf folgende Auflösung der Kombinate und der Bauakademie mußte die Bearbeitung des Themas abgebrochen werden. Im Jahre 1991 konnte die Arbeit durch die finanzielle Förderung des Institutes für Bautechnik unter der Themenbezeichnung "Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei kreiszylindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung" wieder aufgenommen und 1992 abgeschlossen werden.

Alle Windkanaluntersuchungen wurden in den beiden Windkanälen in Dresden-Klotsche durchgeführt. Die experimentelle Bearbeitung lag in den Händen von Herrn Dipl.-Ing. Klier und Herrn Dipl.-Ing. Koch.

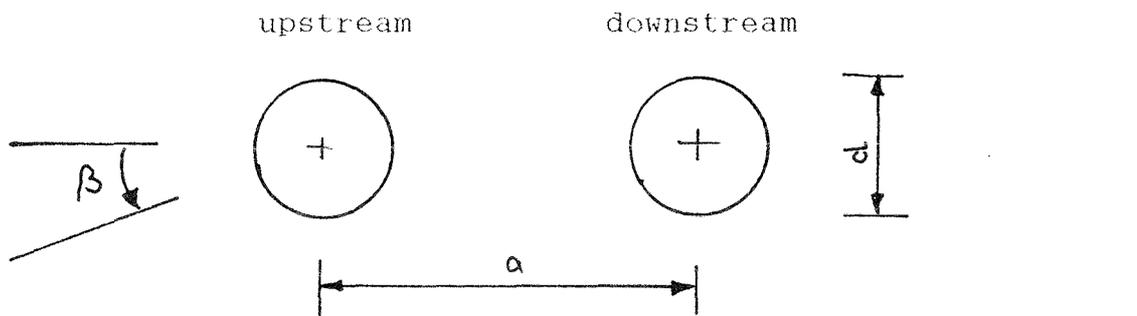
BEZEICHNUNGEN

Größe	Dimension	Erklärung
A	m ²	Projektionsfläche
a	m	Zylinderabstand
$\tilde{c}_L = 2 \cdot \tilde{F}_L \cdot \mathcal{D} / (\pi \cdot q_\infty \cdot A)$	-	Kraftbeiwert in Längsrichtung
$\tilde{c}_Q = 2 \cdot \tilde{F}_Q \cdot \mathcal{D} / (\pi \cdot q_\infty \cdot A)$	-	Kraftbeiwert in Querrichtung
$c_R = (c_L^2 + c_Q^2)^{1/2}$	-	resultierender Kraftbeiwert
$c_W = k \cdot F_W / (A \cdot q)$	-	statischer Widerstandsbeiwert
$c_Q = k \cdot F_Q / (A \cdot q)$	-	statischer Querkraftbeiwert
c _r	N/m	reduzierte Federkonstante
D	m	Zylinderabstand in der Diagonale
d	m	Durchmesser
d ₁	m	Durchmesser des Meßzylinders
d ₂	m	Durchmesser des Blendenzylinders
d _E	m	Durchmesser der Endscheibe
a/d, a/d ₁ , a/d ₂	-	Abstandsverhältnisse
F	N	Kraft
F _W	N	Widerstandskraft
F _Q	N	Querkraftbeanspruchung
F _L	N	Beanspruchung in Längsrichtung
$F_R = (F_L^2 + F_Q^2)^{1/2}$	N	resultierende Beanspruchung
f	Hz	Frequenz
f ₀	Hz	Eigenfrequenz
h	m	Wirbelabstand in y-Richtung
h _z , l	m	Zylinderhöhe
m	kg	Modellmasse
$m = m \cdot \mathcal{D} \cdot (l_1 \cdot d_1^2 \cdot S_M / 2)$	-	Massedämpfungsparameter
$q = \rho / 2 \cdot w_\infty^2$	Pa	Staudruck

$Re = d_1 \cdot w_\infty^2 / \nu_M$	-	Reynoldszahl
$St_r = f \cdot d / w_\infty$	-	Strouhalzahl
$St_{r0} = f_0 \cdot d_1 / w_\infty$	-	Strouhalzahl bei Resonanz
T_u	-	Turbulenzgrad
w_∞	m/s	ungestörte Strömungsgeschwindigkeit
x	m	Abszisse, Schwingungsaus- schlag in Längsrichtung
y	m	Ordinate, Quer- schwingungsaus- schlag
α	°	Winkel zur Anström- richtung
β	°	Anströmwinkel zur Reihen- achse
ν_M	m ² /s	kinematische Viskosität von Luft
ρ, ρ_M	kg/m ³	Dichte
δ	-	logarithmisches Dekre- ment der Dämpfung
$\Delta u^2 / \Delta f$	-	spektrale Dichte
$\eta = y/d_1 = F_0 / c_r$	-	bezogene Auslenkung

Indizes und Kennzeichnungen

0	Grundfrequenz
1	Meßzylinder
2	Blendenzylinder
∞	ungestörte Strömung
L	Längsrichtung
Q	Querrichtung
R	Resonanz
\bar{a}	linearer Mittelwert von a
\tilde{a}	Effektivwert von a
\hat{a}	Amplitude von a



EINFÜHRUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Die experimentellen Untersuchungen wurden in den Windkanälen der Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden-Klotsche durchgeführt.

Als Versuchsanlagen wurden verwendet:

- großer Niedergeschwindigkeits-Windkanal NK I
- mittlerer Niedergeschwindigkeitswindkanal NK II
- Wasserfließrinne zur Vorklärung ebener Um- und Durchströmprobleme

Die folgenden Übersichten enthalten die Kenndaten der Niedergeschwindigkeits-Windkanäle NK I und NK II sowie eine Schnittdarstellung des großen Niedergeschwindigkeits-Windkanales NK I.

Kenndaten:

NK I

Typ Göttinger Bauart mit offener Meßstrecke

Düse quasielliptisch

Breite: 4,25m

Höhe: 3,00 m

Fläche: 10,00 m²

Kontraktionsverhältnisse: 1:4,6

Meßstreckenlänge: 5,25 bis 8,25 m

maximale Strahlgeschwindigkeit: ca. 70 m/s

maximale Leistungsaufnahme: 1.350 KW

mittlerer Turbulenzgrad: < 0,5 %

NK II

Typ Göttinger Bauart mit offener Meßstrecke

Düse kreisförmig

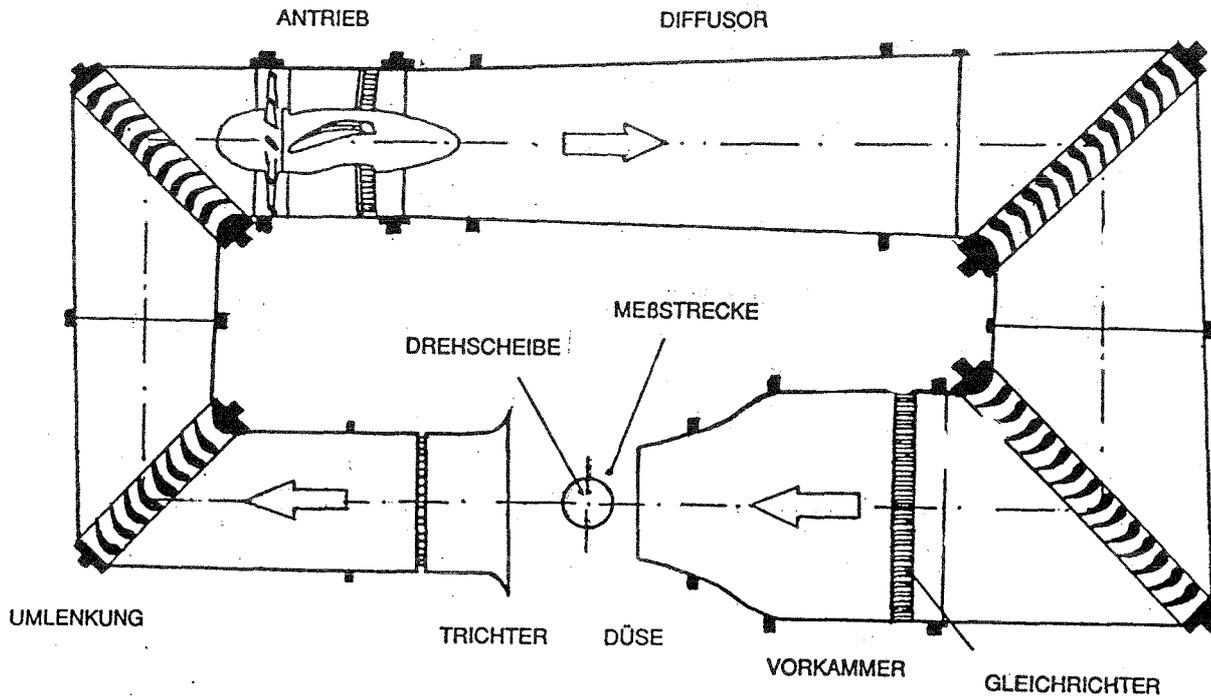
Durchmesser: 1 m

Fläche: 0,8 m²

Kontraktionsverhältnis: 1:9

Meßstreckenlänge: 1,75 m

maximale Strahlgeschwindigkeit: ca. 70 m/s
maximale Leistungsaufnahme: 80 KW
mittlerer Turbulenzgrad: < 0,2 %



Querschwingungsuntersuchungen können in den Windkanälen nur im unterkritischen und im unteren überkritischen Reynoldszahlbereich durchgeführt werden. In der Praxis treten bei Stahlbetonschornsteinen Querschwingungsbeanspruchungen im transkritischen Reynoldszahlbereich auf. Es wurden deshalb zunächst im mittleren und großen Windkanal experimentell die Strömungsnachläufe von Kreiszyklindern untersucht, mit dem Ziel, Fragen der Modellierbarkeit des transkritischen Reynoldszahlgebietes zu klären.

Diese experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß es möglich ist, bei Einzelkreiszyklindern das transkritische Rey-

noldszahlgebiet durch Messungen im kritischen Reynoldszahlbereich zu modellieren. Die Variante 2.2 im Abschnitt 2.4 "Störung durch Draht 2,5 mm Durchmesser mit Klebeband befestigt" erreicht die größten Querkraftbeiwerte und ist am günstigsten geeignet. Bei Mehrfachanordnungen können durch die unsymmetrische Anströmung des Nachlaufzylinders u.U. größere Fehler auftreten. Die realen Strömungsverhältnisse im transkritischen Strömungsbereich unterscheiden sich durch die Breite der Strömungsnachläufe, die bei Mehrfachanordnungen am Nachstromzylinder zu Änderungen gegenüber dem unterkritischen Reynoldszahlgebiet führen können. Es wurden deshalb zusätzlich zu den Untersuchungen im unterkritischen Bereich an ausgesuchten Zweiergruppen im simulierten transkritischen Reynoldszahlbereich im großen Windkanal gesonderte Untersuchungen durchgeführt.

Strömungsnachläufe lassen sich in der Wasserfließrinne relativ einfach darstellen. Es wurden deshalb Strömungsfelder um den Kreiszyylinder (einzeln oder in der Gruppe) mit ruhender und bewegter Kamera aufgenommen.

Im mittleren Windkanal wurden Doppelanordnungen mit unterschiedlichen Massendämpfungsparametern im unterkritischen Reynoldszahlbereich untersucht. Es erfolgten systematische Messungen der Stouhalzahl und dynamischen Beiwerte in Resonanz mit der Nachlaufwirbelerregung. Variiert wurden die Blendenabmessungen d_2/d_1 und l_2/l_1 , das Abstandsverhältnis a/d_1 , sowie die Anströmwinkel β zur Reihenachse. Als Maß für die vorhandene Beanspruchung kann die Auslenkung $\tilde{\eta} \approx \tilde{c}_q / S_r^2$ angesetzt werden. Im Vergleich zum Einzelzylinder ergeben sich bei der Zweiergruppe größere Beanspruchungen:

- bei kleinen Abstandsverhältnissen (große Massendämpfungsparameter können eine Ausnahme bilden)
- wenn der Meßzylinder niedriger als die Blende ist
- wenn der Durchmesser des Meßzylinders kleiner als der der Blende ist.

Im großen Windkanal wurden Untersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von in Zweiergruppen angeordneten Kreiszyindern bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung durchgeführt. Die das transkritische Gebiet charakterisierenden turbulenten Grenzschichten wurden mit Stolperdrähten erzeugt. Bei Anströmrichtungen $\beta=0^\circ$ wurde der Blendenzylinder bezüglich der Lage

der Stolperkanten symmetrisch zur Anströmrichtung gedreht. Die symmetrische Anströmung und das Wiederaanlegen der Strömung nach der Stolperkante wurde mit einer Fadensonde überprüft. Solange der Meßzylinder in dem stark turbulenten Nachlauf des Anströmzylinders liegt, wird durch die Turbulenz eine überkritische Strömung erzeugt. Die Wirkung gleicht der der Stolperkante. Nur wenn der Meßzylinder gerade die Nachlaufgrenzen berührt, wird eine merklich unsymmetrische Strömung auftreten. Dabei können Fehler bei der Modellierung des transkritischen Bereiches entstehen.

Bei den untersuchten Varianten des Blendendurchmessers und der Zylinderlänge wurden Strouhalzahlen, dynamische Querkraftbeiwerte und bezogene Auslenkungen in Resonanz bei unterschiedlichen Anströmbedingungen und Massedämpfungsparametern $m \cdot \omega \approx 62$ bzw. 50 gemessen. Das Durchmesser Verhältnis wurde zu $d_2/d_1=1$ bzw. 1,5 gewählt. Das Längenverhältnis der Zylinder betrug $l_2/l_1=1$ bzw. 1,36.

Das Durchmesser Verhältnis zwischen Blenden- und Meßzylinder bestimmt wesentlich die Größenordnung der Strouhalzahl. Kritische Belastungen für die untersuchten Varianten traten nur bei $a/d_1 \leq 5$ auf. Der Einfluß des Zylinderlängenverhältnisses ist im Gegensatz zum unterkritischen Reynoldszahlbereich unbedeutend.

Aus strömungsmechanischer Sicht ist die Nachlaufstruktur am unbewegten Kreiszyylinder unterkritisch und transkritisch ähnlich.

Ausgehend von Überlegungen von Kàrmàn folgt:

$$\frac{\tilde{C}_{Q, \text{Druckvert.}}}{C_{W, \text{unterkr.}}} \approx \text{const} \approx \frac{\tilde{C}_{Q, \text{Druckvert.}}}{C_{W, \text{transkr.}}}$$

$$\text{Damit wird } \frac{C_{Q, \text{Druckvert.}}}{\text{transkr.}} = \frac{C_{Q, \text{Druckvert.}}}{C_{W, \text{unterkr.}}} * C_{W, \text{transkr.}}$$

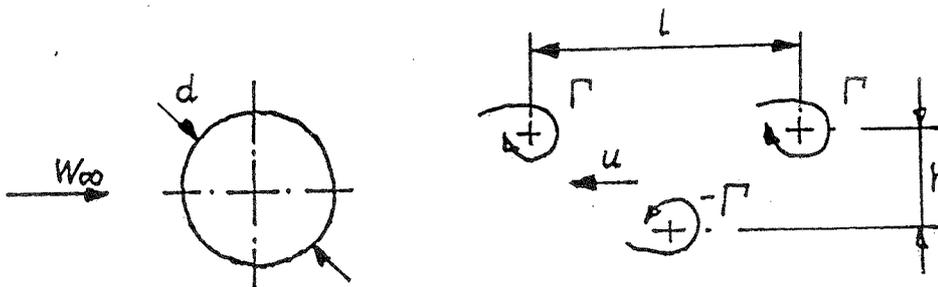
$$= 0,7 * 0,55 / 1,2 = 0,32$$

Das dürfte eine obere Grenze für den Querkraftbeiwert am Einzelzylinder im transkritischen Reynoldszahlgebiet sein. Für hohe Massendämpfungsparameter, also kleine Auslenkungen, verkleinert sich dieser Wert.

Aus gemessenen Widerstandsbeiwerten und Strouhalzahlen kann man die Wirbeleigengeschwindigkeit u/w und die Wirbelstraßenquerabmessungen h abschätzen.

Man erhält:

	C_w	S_{ro}	u/w	$h_{\text{unterkrit.}}/h_{\text{transkrit.}}$
unterkritisch	1,2	0,18	0,18	1,16
transkritisch	0,55	0,24	0,096	



Damit unterscheiden sich die Nachlaufquerabmessungen wenig, wohl aber die Wirbeleigengeschwindigkeiten und die für die Querkraftbeiwerte maßgebenden Zirkulationen.

Für Mehrfachanordnungen werden Strouhalzahlen und Querkraftbeiwerte maßgeblich vom Nachlauf des davor angeordneten Zylinders beeinflusst. Es kann also nicht geschlossen werden, daß bei Mehrfachanordnungen ohne weiteres die unterkritisch gemessenen Werte bezogen auf den Einzelzylinder übernommen werden können. Es wird postuliert, daß die Mehrfachanordnungen unterkritisch und transkritisch ähnlicher sind als Einfachanordnungen.

Dreieranordnungen in Reihe wurden unterkritisch im mittleren Windkanal untersucht. Ermittelt wurden die Strouhalzahlen, die dynamischen Beiwerte und die bezogenen Auslenkungen in Reso-

nanz bei unterschiedlichen Anströmbedingungen (Abstand, Anströmwinkel).

Der Meßzylinder wurde bei den verschiedenen Varianten vorn, hinten und in der Mitte angeordnet. Blenden- und Meßzylinder hatten Durchmesser-Verhältnisse von 1 bzw. 1,5 und Längen-Verhältnisse von 1 bzw. 2. Die Größenordnung der maximalen Beanspruchungen bei den Dreieranordnungen stimmt mit denen der vergleichbaren Doppelanordnung überein.

Die nachlauferregten Schwingungen von Dreieckanordnungen (gleichseitiges Dreieck) wurden ebenfalls im mittleren Windkanal im unterkritischen Reynoldszahlbereich untersucht. Bei den verschiedenen Varianten wurden die Verhältniswerte Meßzylinder/Blendenzylinder, Blendenzylinder 2/Blendenzylinder 1 in Durchmesser- und Längenbereich verändert. Die Anströmwinkel wurden von $\beta=0\dots360^\circ$ variiert. Die Abstandsverhältnisse betragen $a/d_1=3\dots10$. Die Messungen erfolgten mit unterschiedlichen Massendämpfungsparametern des Meßzylinders. Ermittelt wurden die Strouhalzahlen bei maximaler Kraft, die Effektivwerte des Querkraftbeiwertes und die effektiv bezogenen Auslenkungen bei maximaler Kraft.

Der Vergleich zwischen Dreieck- und Dreierreihenanordnungen zeigt, daß die Beanspruchungen bei vergleichbaren Zweieranordnungen hinsichtlich Durchmesser- und Längeneinflüssen in vergleichbarer Größe liegen. Dreieck- und Dreierreihenanordnungen lassen sich in vielen Fällen auf die entsprechende Zweieranordnung zurückführen.

Maximale Beanspruchungen treten in der Regel nur auf, wenn sich der Meßzylinder im turbulenten Nachlauf des stromaufwärts liegenden Zylinders befindet, oder er in der Nähe des Nachlaufes angeordnet ist. Die Lage der maximalen Beanspruchung wird auch durch den Massendämpfungsparameter beeinflusst.

Die nachlauferregten Schwingungen von Quadratanordnungen von Vierer- und Fünfergruppen wurden im unterkritischen Reynoldszahlbereich im mittleren Windkanal untersucht. Es wurde lediglich der Fall gleicher Zylinderhöhen und Zylinderdurchmesser betrachtet. Die Anströmwinkel wurden so variiert, daß die ungünstigsten Beanspruchungszustände erfaßt wurden. Die Abstandsverhältnisse betragen $a/d_1=3\dots12,6$ (17).

Bei der Fünfergruppe, Meßzylinder in der Mitte, erfolgten die Messungen mit einem konstanten Massendämpfungsparameter $m, \rho \approx 59$. Ermittelt wurden die Strouhalzahlen, die Effektivwerte des Kraftbeiwertes und die effektiv bezogenen Auslenkungen bei maximaler Kraft. Abweichungen der Meßergebnisse zu den Doppelanordnungen sind vorhanden.

Bei der Vierergruppe fallen die Strouhalzahlen erst bei $a/d_1 < 4,0$, während die Querkraftbeiwerte für $a/d_1 < 5,0$ stärker ansteigen. Für $a/d_1 = 15$ ist die Strouhalzahl des Einzelzylinders noch nicht erreicht.

Bei der Fünfergruppe steigen die Strouhalzahlen für $a/d_1 < 4,0$ wieder an und die Querkraftbeiwerte fallen. Bei $a/d_1 = 17$ entsprechen die Strouhalzahlen noch nicht den Werten des Einzelzylinders, während das für die Querkraft der Fall ist.

Bei Geschwindigkeiten bis zu $2,5 \cdot \text{Resonanz}$ konnten keine interferenzinduzierten Schwingungen sowohl im unterkritischen (NK II) als auch im transkritisch modellierten (NK I) Reynoldsbereich nachgewiesen werden. Nach [17] ist aber bei den vorliegenden großen Massendämpfungsparametern bei Strouhalzahlen $S_r < 0,05$ mit solchen zu rechnen. Dazu gehören in der Regel aber sehr hohe Windgeschwindigkeiten.

1. Versuche zur Modellierbarkeit des transkritischen Bereiches am Einzelzylinder im mittleren Windkanal

Das Grundproblem für die Übertragbarkeit von Modellmessungen in üblichen Windkanälen auf die Großausführung ist, daß sich die Reynoldszahlen um etwa zwei Größenordnungen unterscheiden und daß die Strömungszustände für den Kreiszylinder in den beiden Bereichen durch unterschiedliche Grenzschichtzustände quantitativ und z.T. auch qualitativ verschieden sind. Modelluntersuchungen sind nur im unterkritischen bzw. ^{im unteren} überkritischen Bereich

möglich. Die Querschwingungsbeanspruchungen von Stahlbetonschornsteinen erfolgen im transkritischen Reynoldszahlbereich. Maßgebend für den Kraftbeiwert und die Strouhalzahl ist die Ausbildung des Strömungsnachlaufes hinter dem umströmten Körper.

Im unterkritischen ($Re < 10^5$) bzw. transkritischen ($Re > 6 \cdot 10^6$) Reynoldszahlgebiet zeigen sich im Nachlauf der Kreiszyklinderumströmung, mehr oder weniger gut ausgebildet, zwei Wirbelreihen, deren Wirbel gegeneinander versetzt angeordnet sind. Diese wechselseitig von der Körperrückseite sich ablösenden Wirbel sind die Ursache der instationären Querkräfte.

Im mittleren Windkanal wurden zunächst experimentell die Strömungsnachläufe von Kreiszyklindern untersucht mit dem Ziel, Fragen der Modellierbarkeit des transkritischen Reynoldszahlgebietes zu klären.

In der Literatur gibt es Vorschläge, durch gewisse Oberflächenstörungen am Modell, die kritische Reynoldszahl herabzusetzen mit dem Ziel, die effektive Reynoldszahl zu erhöhen.

Eine andere Möglichkeit ist, weil unter- und transkritische Nachläufe etwa geometrisch ähnlich sind, im unterkritischen Bereich durch Leiteinrichtungen am Modell entsprechende schmalere Strömungsnachläufe zu erzeugen.

Beide Möglichkeiten wurden durch Luftwiderstandsmessungen und Untersuchung der Nachlaufstruktur mittels der Hitzdrahtanemometrie an einem Kreiszyklindermodell untersucht.

1.1 Versuchsaufbau und Versuchsumfang

Versuchsanlage: Mittlerer Windkanal NK II

Versuchsaufbau: Kreiszyklinder $d=127,6$ mm mit Endscheiben, Winkelprofil; Abb.1

Varianten für Kreiszyklinder:

- streifenförmige Störung auf einer Mantellinie des Modells

- größere obere Endscheibe
- Symmetriehle im Nachlauf
- Leiteinrichtungen in der Umgebung der größten Modell-
dicke

Variantenübersicht:

Bedingt durch den erkundenden Charakter der Versuche und um den Versuchsumfang zu beschränken, wurden keine ausführlichen Re-
Abhängigkeiten untersucht.

Die Variantenübersicht der Modellierung der Meß- und Auswerte-
größen zeigt Tab.1

Die Winkelprofile wurden in die Untersuchung aufgenommen, um
die Ähnlichkeit der Nachlaufstruktur zu zeigen.

1.2 Ergebnisse der Variantenuntersuchungen .

1.2.1 Widerstandsbeiwerte

Der Widerstandsbeiwert

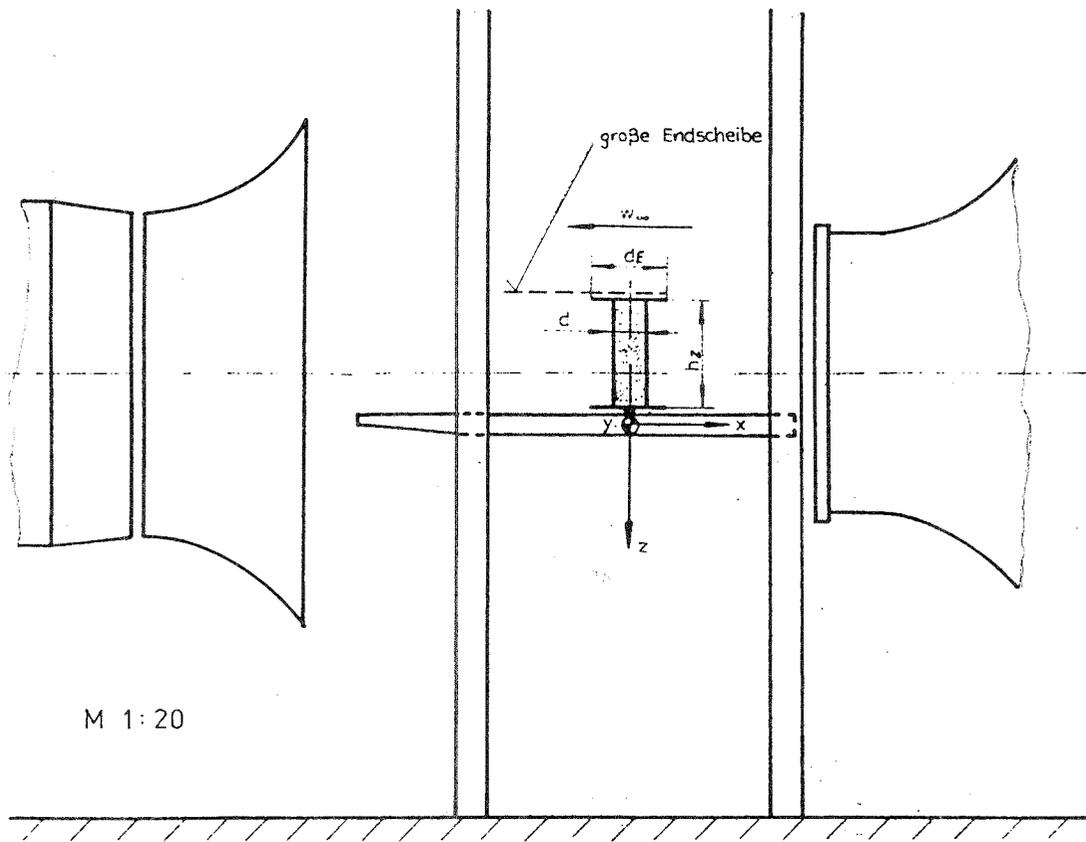
$$c_w = \frac{F_w}{(\rho/2) W_\infty^2 * A}$$

zeigt bei Variante 1.1 den bekannten Abfall $c_w(R_e)$.

Variante 1.2 bringt eine Verkleinerung der kritischen Reynolds-
zahl, aber größere c_w im überkritischen Bereich. Damit ist die
Nachlaufbreite größer als bei Variante 1.1. Die Modellierung
der Querkräfte ist fraglich.

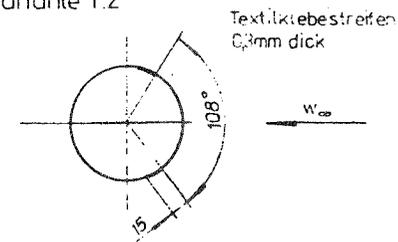
Bei den Varianten 1.3 bis 1.5 ist der Abfall $c_w(R_e)$ nicht vor-
handen. Variante 1.3 bringt durch die größere Endscheibe
 $c_w \approx 1.02$.

Variante 1.4 bringt eine Senkung auf $c_w \approx 0,80$. Durch die Leit-
bleche bei Variante 1.5 liegt die Strömung länger an. $c_w \approx 0,43$
liegt in überkritischer Größenordnung. Zur Strömungsart der
Grenzschicht ist keine Aussage möglich.

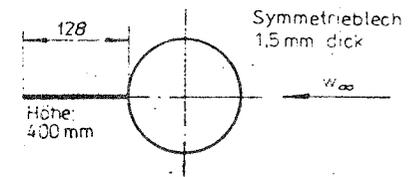


M 1:20

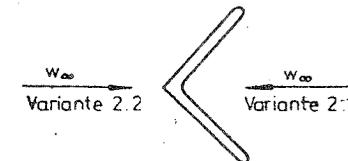
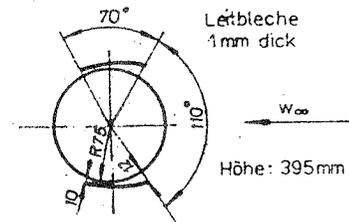
Variante 1.2



Variante 1.4



Variante 1.5



Modellgrößen:	1. Kreiszyylinder	$d = 127,6 \text{ mm}$	$h = 399,0 \text{ mm}$
	2. Winkelprofil (60×60×6mm)	$d_i = 83,5 \text{ mm}$	$h = 399,5 \text{ mm}$

Endscheibe:	klein	$\varnothing 280 \times 6 \text{ mm}$
	groß	$700 \times 300 \times 10 \text{ mm}$

Abb. 1: Versuchsaufbau NK II

Körperform	Var.	Körperoberfläche	Besonderheiten	Endscheibe		Abstand x/d Körper - Sonde		Re-Zahl-Bereich $Re \cdot 10^5$			
		glatt		klein	groß	klein	groß	≈1,04	≈2,27	≈2,74	≈5,37
Kreiszyylinder $d = 127,6 \text{ mm}$	1.1	×	—	×	—	×	×	×	—	×	×
	1.2	—	Streifenrauigkeit	×	—	—	×	×	—	—	×
	1.3	×	—	—	×	—	×	×	—	—	—
	1.4	×	Symmetriehle	—	×	—	×	×	—	—	—
	1.5	×	Leitbleche	—	×	×	×	×	—	—	—
Winkelprofil (60×60×6mm) $d_i = 83,5 \text{ mm}$	2.1	×	Anströmung →	×	—	×	×	—	×	—	—
	2.2	×	Anströmung ←	×	—	×	×	—	×	—	—

Tab 1 : Variantenübersicht zur Modellierung und zu den Meß- und Auswertegrößen

1.2.2 Turbulenzgrad im Nachlauf in Querrichtung

Die Turbulenzgradverläufe in Querrichtung zeigen für alle Varianten gewisse Ähnlichkeiten.

Der Nachlauf wird mit der Lauflänge breiter. Im Inneren nimmt der Turbulenzgrad mit wachsendem Abstand ab. Großen Widerstandsbeiwerten entsprechen große Turbulenzgrade und breitere Nachläufe.

Zu beachten ist die gute Übereinstimmung zwischen Variante 1.1 überkritisch und Variante 1.5 (Leitbleche)

1.2.3 Spektrale Dichten der Anemometer-Spannungsschwankungen

Die spektralen Dichten der Spannungsschwankungen im Nachlauf sind ein Maß für die Geschwindigkeitsschwankungen. Mit diesen hängen die Querkraftschwankungen zusammen. Quantitative Zusammenhänge können nicht angegeben werden.

Im unterkritischen Bereich zeigt Variante 1.1 eine ausgeprägte Spitze bei $S_r \approx 0,15$ bis $0,18$ (Streckungseinfluß!). Die Schwankungen sind stochastisch (schmalbandiges Rauschen). Es ist ein großer Anteil hoher Frequenzen enthalten. Die großen Karmanschen Wirbel sind von kleineren (hochfrequenten) Wirbeln überlagert. Im überkritischen Bereich zeigt sich die bekannte Verschiebung zu größeren Strouhalzahlen.

Variante 1.2 bringt eine breite spektrale Dichte. Variante 1.5 (Leitbleche) ergibt ein schmalbandiges Spektrum mit einer Spitze bei $S_r \approx 0,28$, was zum transkritischen Fall tendiert.

Diese spektrale Dicht würde dem transkritischen Fall vermutlich nahe kommen [1].

1.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse von Variantenuntersuchungen

Die Untersuchung der Strömungsnachläufe, insbesondere des Kreiszylinders, mit dem Ziel, Ergebnisse aus dem unterkritischen Reynoldszahlgebiet, in dem im folgenden nur Windkanaluntersuchungen möglich sind, ins transkritische Gebiet zu übertragen, führten zu folgenden Ergebnissen:

-Eine künstliche Absenkung der kritischen Reynoldszahl ist nicht effektiv.

-Leiteinrichtungen, die den Strömungsnachlauf wie im überkritischen Gebiet verkleinern, führen zu Widerstandsbeiwerten und spektralen Dichten der Geschwindigkeitsschwankungen wie im transkritischen Gebiet. Allerdings ist die Anwendung der Leiteinrichtungen in der unsymmetrisch umströmten Gruppenanordnung problematisch.

2. Modellierungsversuche des transkritischen Reynoldszahlbereiches am Einzelkreiszylinder im großen Windkanal

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde gezeigt, daß es durch Grenzschichtbeeinflussung am Kreiszylinder in der Nähe des kritischen Reynoldszahlbereiches möglich erscheint, das transkritische Reynoldszahlgebiet zu modellieren.

Im großen Windkanal wurde diese Modellierung am einzelnen Kreiszylinder erprobt.

Dazu wurden Kraftbeiwerte und Geschwindigkeitsschwankungen (spektrale Dichten) in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bzw. von der Strouhalzahl ermittelt und mit Literaturergebnissen des transkritischen Reynoldszahlbereiches verglichen.

2.1 Physikalische Grundlagen

Wie bereits im 1. Abschnitt gezeigt wurde, werden die Kraftbeiwerte und Strouhalzahlen durch die Nachlaufstruktur des Kreiszylinders bestimmt.

In Tab.2 sind die Eigenschaften der Kreiszylinderumströmung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl im Überblick dargestellt.

Im Vergleich zum unterkritischen Reynoldszahlbereich ist im transkritischen Bereich der Nachlauf schmaler, die Grenzschicht nahezu über der gesamten Länge turbulent, der Widerstands- und Querkraftbeiwert kleiner und die Strouhalzahl größer. Die spektralen Dichten der Geschwindigkeitsschwankungen sind in beiden Fällen schmalbandig. Das wird durch ein mehr oder weniger amplitudenmoduliertes harmonisches Signal charakterisiert.

Erreicht werden soll die Modellierung des transkritischen Falles durch turbulentmachen der Modellgrenzschicht im oberen unterkritischen Gebiet. Das Ziel ist erreicht, wenn die Kennwerte des transkritischen Falles nachgewiesen werden können.

Eine zusätzliche Forderung ist, daß die elastischen und Trägheitseigenschaften des Modelles so ausgelegt sind, daß die Resonanzgeschwindigkeit des Kreiszylindermodells im zu untersuchenden Reynoldszahlbereich liegt.

2.2 Spezielle Aufgabenstellung

Im großen Windkanal wurden an einem elastischen Kreiszylindermodell im unterkritischen und modellierten transkritischen Reynoldszahlbereich ermittelt:

- die Widerstandsbeiwerte,
- ausgewählte spektrale Dichten der Längsgeschwindigkeitsschwankungen im Modellnachlauf,
- die Querkraftbeiwerte in Abhängigkeit von der Strouhalzahl.

Die Modellierung des transkritischen Falles soll durch Störkörper bzw. durch eine Leiteinrichtung erzeugt werden. Die Variation der Modelldämpfung soll möglich sein.

Tabelle 2: Eigenschaften der Kreiszyylinderumströmung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl bei unendlicher Schlankheit

	unter-kritisch $Re < 2 \cdot 10^5$	über-kritisch $Re > 2 \cdot 10^5$	trans - kritisch $Re > 3 \cdot 10^6$
Grenzschicht	laminar	laminar turbulent	turbulent
Nachlaufbreite	breit	schmal	schmal
spektrale Dichte der Geschwindigkeitsschwankungen im Nachlauf	schmal-bandig	breit-bandig	schmal-bandig
Strouhalzahl Sr *	0,20	> 0,20	0,20 + 0,30
Widerstandsbeiwert C_w	1,2	0,3	0,5
Querkraft \tilde{C}_Q **	0,7		0,15 + 0,30

* Strouhalzahl der Geschwindigkeitsschwankungen im Nachlauf

** aus Druckverteilungsmessungen

Bei geometrisch und kinematischen Nachläufen gilt

$$S_r \sim 1/C_w$$

$$\tilde{C}_Q, \text{druckv.} \sim \tilde{C}_w$$

2.3 Versuchsaufbau und Meßverfahren

Im Prinzip wurde der gleiche Versuchsaufbau wie im mittleren Windkanal verwendet: schwerer steifer Unterbau - Biegeglied - leichtes, steifes Modell

Die Reynoldszahl soll die kritische überstreichen. Die Resonanzgeschwindigkeit soll in der Größenordnung wie im mittleren Windkanal liegen.

Um die Resonanzgeschwindigkeit möglichst groß zu halten, wurde ein Aluminiumrohr 110*1400 gewählt. Zur Variation der Dämpfung wurde die Möglichkeit vorgesehen, das obere Ende des Rohres mit feinem Sand zu füllen.

Abbildung 2 zeigt einen Überblick über den Versuchsaufbau im großen Windkanal:

- Modellständer (mit Sand gefüllt) auf einem Trägerrost zur Überbrückung der Meßgrube NK I,
- schwere Grundplatten,
- Biegeglied,
- mit Schrauben angeflanshtes Modellrohr, daß mit dem Flansch verschweißt wurde,
- wahlweise Aluminium- oder Sperrholzscheibe,
- auf der Bodenplatte des Windkanales wurde eine Zusatzbodenplatte auf Stützen angeordnet,
- der transkritische Reynoldszahlbereich wurde mittels längs der zylindererzeugenden angebrachten Leisten 4*4 bzw. von mit Klebeband aufgeklebten Drähten $\varnothing 2,5$ sowie mit Hilfe von Leit-einrichtungen modelliert.

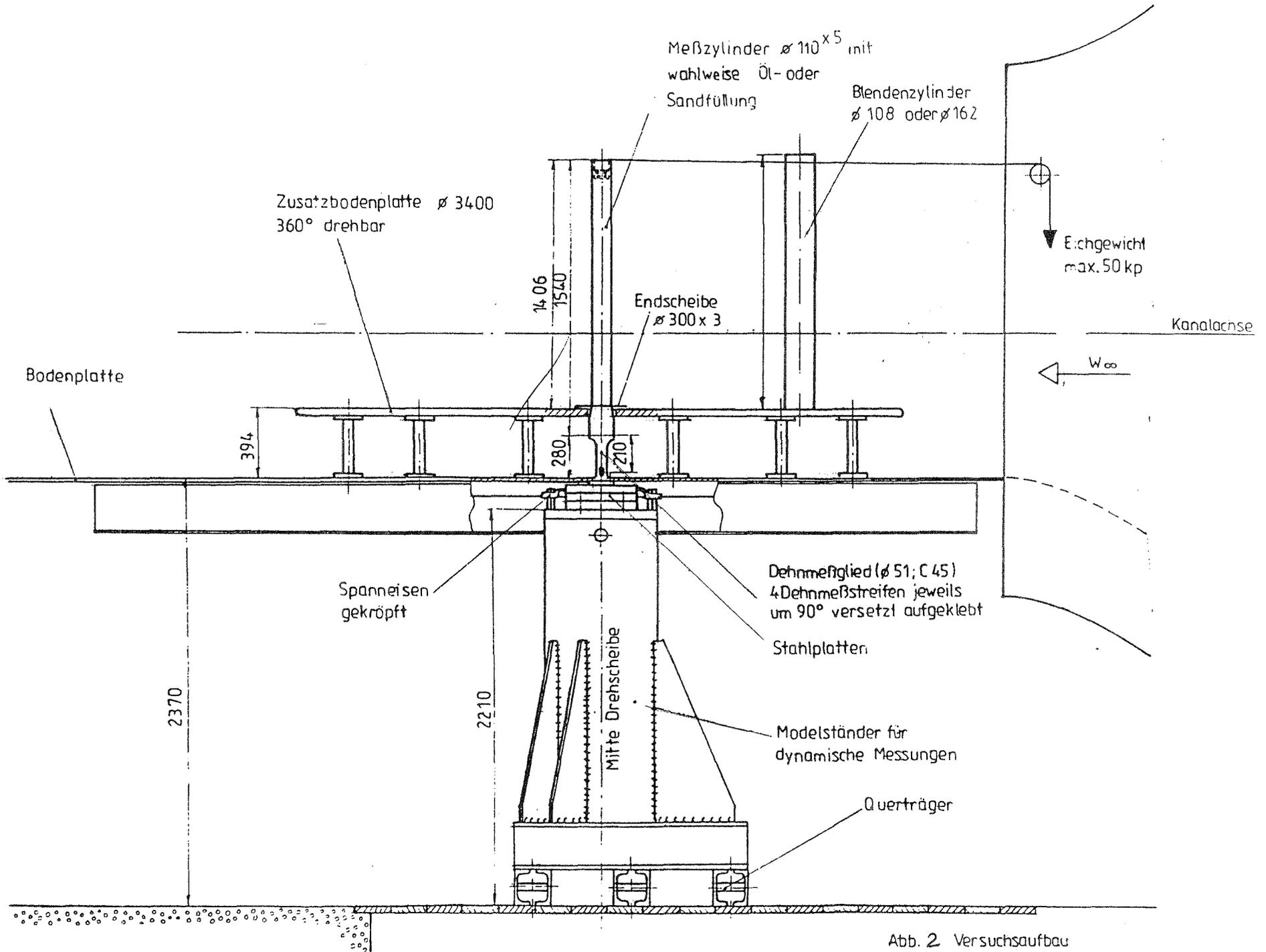


Abb. 2 Versuchsaufbau

Meßverfahren

Die Beanspruchungsmessung der Quer- und Längskraft wurde mit demselben Meßaufbau, der im mittleren Windkanal für die Doppelmodelle verwendet wurde, durchgeführt. Zusätzlich wurden mit dem Hitzdrahtanemometer Hidra 83 die Längsgeschwindigkeitsschwankungen im Zylindernachlauf gemessen. Die spektrale Dichte der Längsgeschwindigkeitsschwankungen wurde mit dem Schmalbandanalysator 11163 des Schwingungsmeßgerätes SM 231 und zur Zeitmittelung mit dem Meßcomputer 1305 ermittelt.

2.4 Versuchsumfang

Die Versuche bestanden aus folgenden Arbeitsschritten:

- statische Eichung der Beanspruchung in und normal zur Strömungsrichtung,
- Ermittlung des logarithmischen Dekrements der Dämpfung aus der Aufzeichnung der Impulsantwort auf dem Meßcomputer,
- Ermittlung des statischen Widerstands- und Querkraftbeiwertes $\overline{c_w}$, $\overline{c_Q}$,
- Ermittlung der dynamischen Querkraftbeanspruchung reduziert auf das freie Zylinderende,
- Ermittlung der spektralen Dichte der Längsgeschwindigkeitsschwankungen im Zylindernachlauf.

Eine Übersicht über die untersuchten Modellvarianten und die Meßgrößen gibt die nachstehende Tabelle

Variante	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3
Zylinder	*	*	*	*	*	*	*
Endscheibe Alu		*		*			
Holz			*		*	*	*
Zusatzdämpfung				*			
Störkörper Leiste 4*4					*		
Draht $\phi 2,5$						*	
Leiteinrichtung							*
Meßgrößen							
log. Dämpf.dekr.	*	*	*	*	*	*	*
Widerstandskraft (Mittelw.)		*			*	*	*
Querkraftbean. (Mittelw.)		*					
Querkraftbean. (Effektivw.)	*	*	*	*	*	*	*
Querkraftbean. im Resonanzzustand		*		*	*	*	*
Spektrale Dichte		*			*	*	*

2.5. Versuchsergebnisse und Auswertung

2.5.1 Widerstands- und statischer Querkraftbeiwert

Zur Messung der Widerstandsbeiwerte wurde der Modellzylinder zusätzlich gedämpft.

Die Widerstandsbeiwerte des glatten Zylinders mit Endscheibe zeigen den bekannten Abfall über der Reynoldszahl ab $Re \sim 2 \cdot 10^5$ der durch die Ausbildung einer turbulenten Grenzschicht nach einem gewissen laminaren Anlauf verursacht wird.

Die statischen Querkraftbeiwerte im kritischen Gebiet sind auf

eine unsymmetrische Ausbildung der Grenzschicht zurückzuführen. Die Messungen von Schewe [2] im Göttinger Überdruckkanal, zeigen einen ähnlichen Verlauf.

Das Anbringen von Störkörpern (Leisten 4*4 oder mit Klebeband aufgebrachter Draht \varnothing 2,5 bzw. Leiteinrichtungen nach Abb. 3) führt zu einem Grenzschichtumschlag bei kleineren Reynoldszahlen. Die Widerstandsbeiwerte bei den größten vermessenen Reynoldszahlen liegen bei $0,45 < \bar{c}_w < 0,55$ in guter Übereinstimmung mit dem von Schewe [2] im transkritischen Gebiet gemessenen Wert von $\bar{c}_w = 0,53$.

Durch die Störungen an der Modelloberfläche wird eine kräftige turbulente Grenzschicht erzeugt, die offenbar der im transkritischen Reynoldszahlgebiet entspricht.

Man kann davon ausgehen, daß Körper mit definierten Ablösekannten der Strömung (oder sehr hohen Reynoldszahlen) geometrisch und kinematisch ähnliche Nachläufe haben. Der Widerstandsbeiwert ist der Nachlaufbreite proportional.

Das Gleiche gilt für aus Druckverteilungsmessungen ermittelte dynamische Querkraftbeiwerte. In dieser Hinsicht sind auch an prismatischen Körpern ermittelte Widerstands- und Querkraftbeiwerte von Interesse, weil dort kein kritischer Reynoldszahlbereich wie beim Kreiszyylinder auftritt.

Das Verhältnis von Widerstandsbeiwert zu (aus Druckverteilungsmessungen bei vergleichbarer Körperstreckung ermittelt) dynamischem Querkraftbeiwert müßte bei solchen Körpern etwa konstant sein. Die Größe einfach zu messender Widerstandsbeiwerte sollte gewisse Rückschlüsse auf den dynamischen Querkraftbeiwert zulassen.

2.5.2 Dynamische Querkräfte

Für die Modelle mit Grenzschichtstörung sind die Querkräfte in Abhängigkeit vom Staudruck erwartungsgemäß viel kleiner als ohne Störung. Die Störung mit Draht ergibt größere Kräfte als

die Störung mit Leisten und Leiteinrichtungen.

Von besonderem Interesse ist die Querkraftbeiwertkomponente in Abhängigkeit von der Strouhalzahl.

Man erhält gegenüber dem ungestörten unterkritischen Fall wesentlich kleinere Beiwerte und größere Resonanz-Strouhalzahlen. Die mit eingetragenen Strouhalzahlen der Maxima der spektralen Dichten der Längsgeschwindigkeitsschwankungen liegen vergleichbar. Der Vergleich mit den von Schewe [2] im Göttinger Überdruckwindkanal gemessenen Beiwerten und Strouhalzahlen zeigt, daß die Modellierung schon recht gut ist. (Abb. 4). Zum Nachweis der Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches fehlt noch der Nachweis der schmalbandigen Erregung.

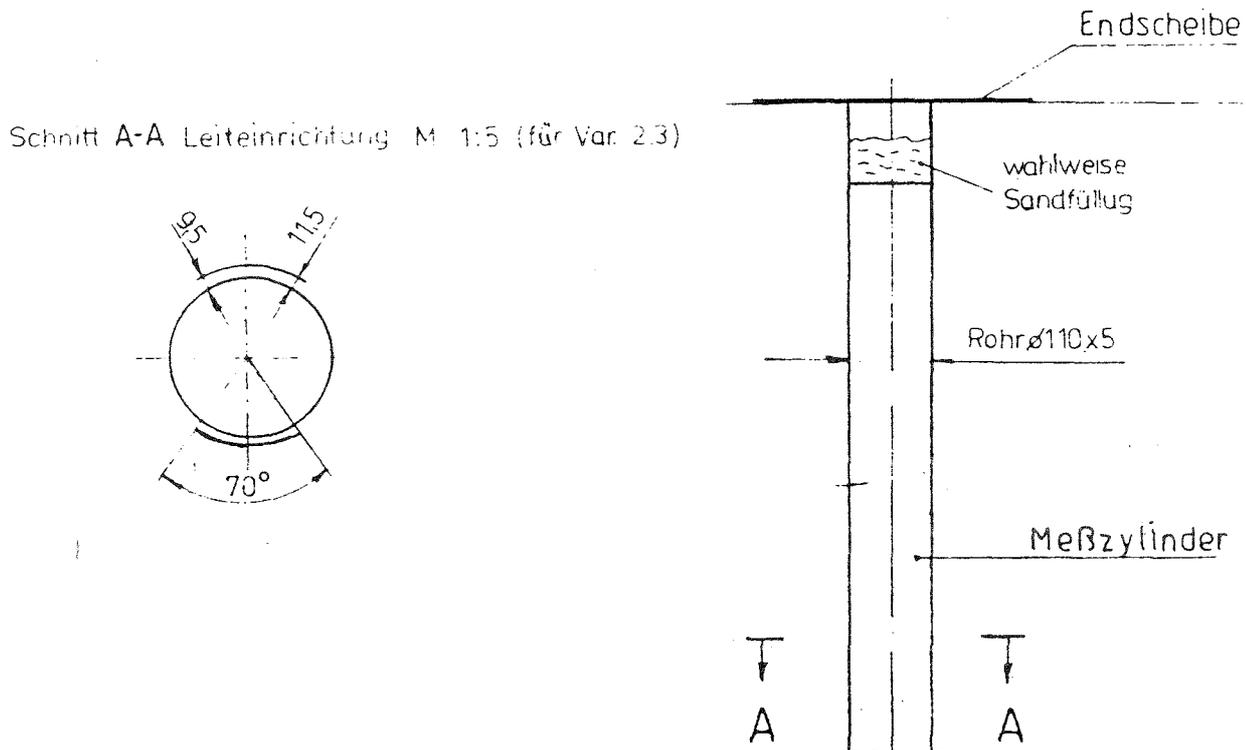


Abb.3: Meßzylinder mit Zusatzdämpfung und Leiteinrichtung

Symb	Var	f_0 [Hz]	$\int \Gamma_0$	\mathcal{D}	Bemerkungen
o	2.1	24,5	0,26	0,01	Leisten 4*4
Δ	2.2	24,5	0,25	0,01	Draht ϕ 2,5
σ	2.3	24,2	0,23	0,0135	Leiteinr.

mit Endscheibe Holz

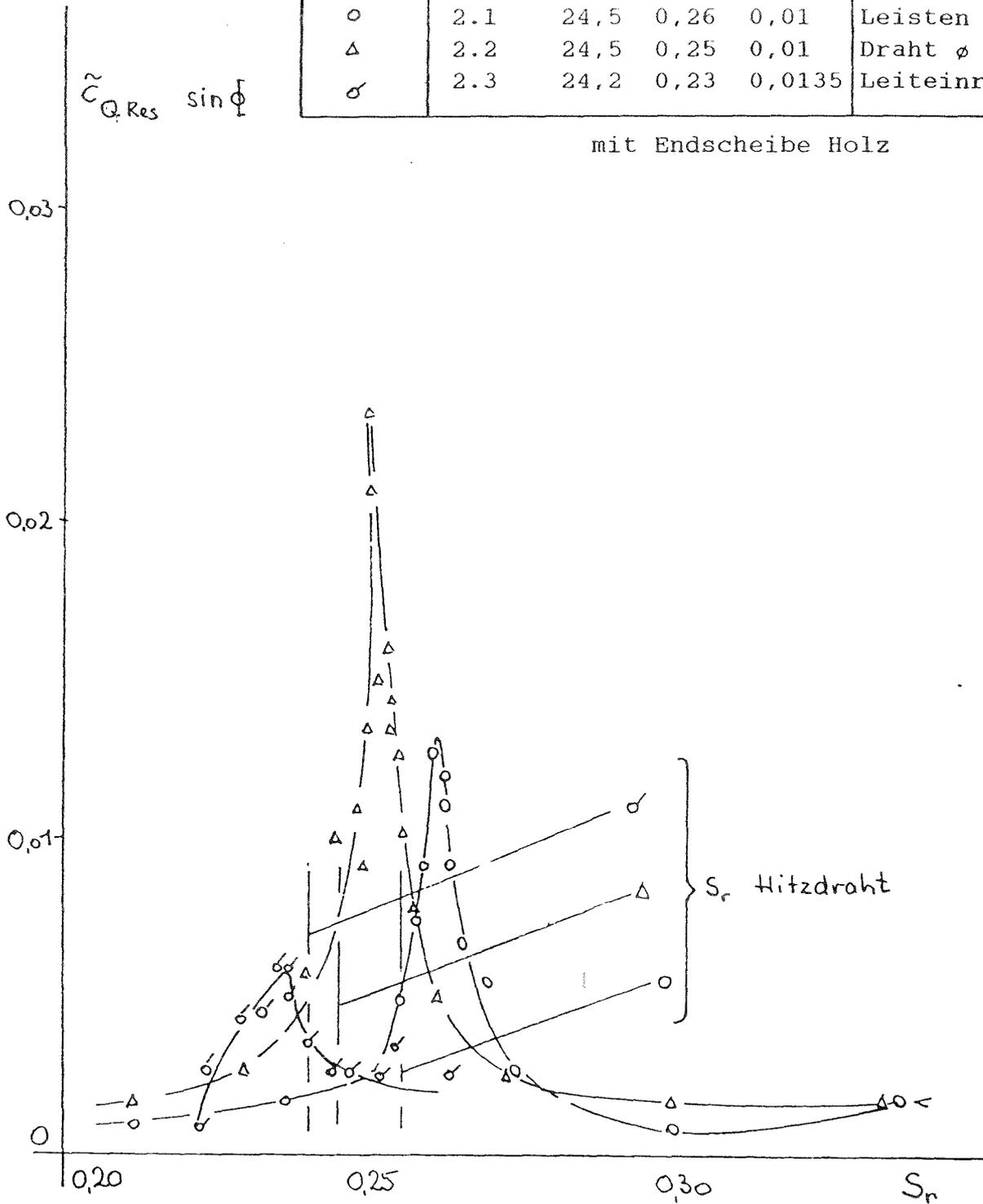
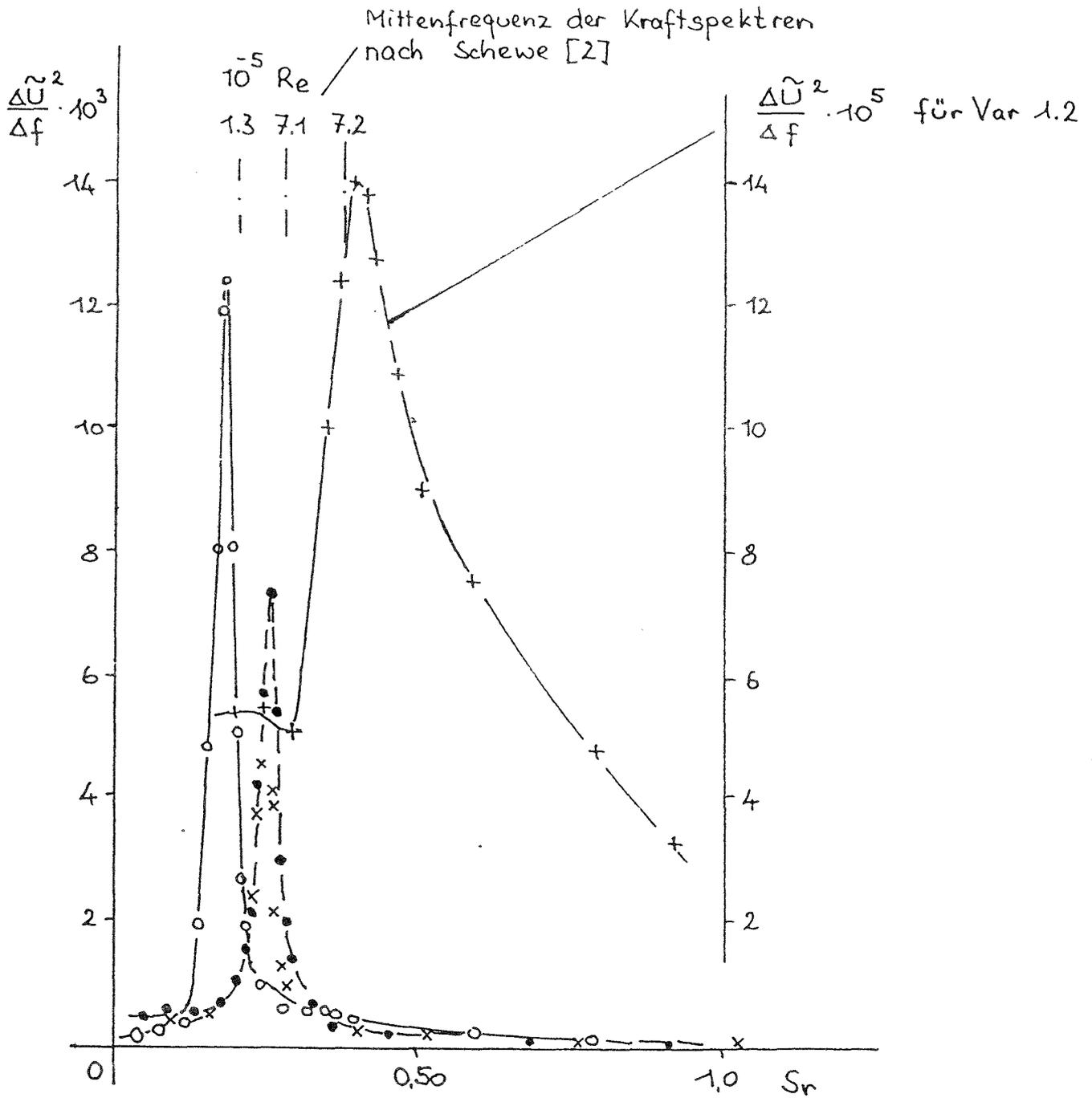
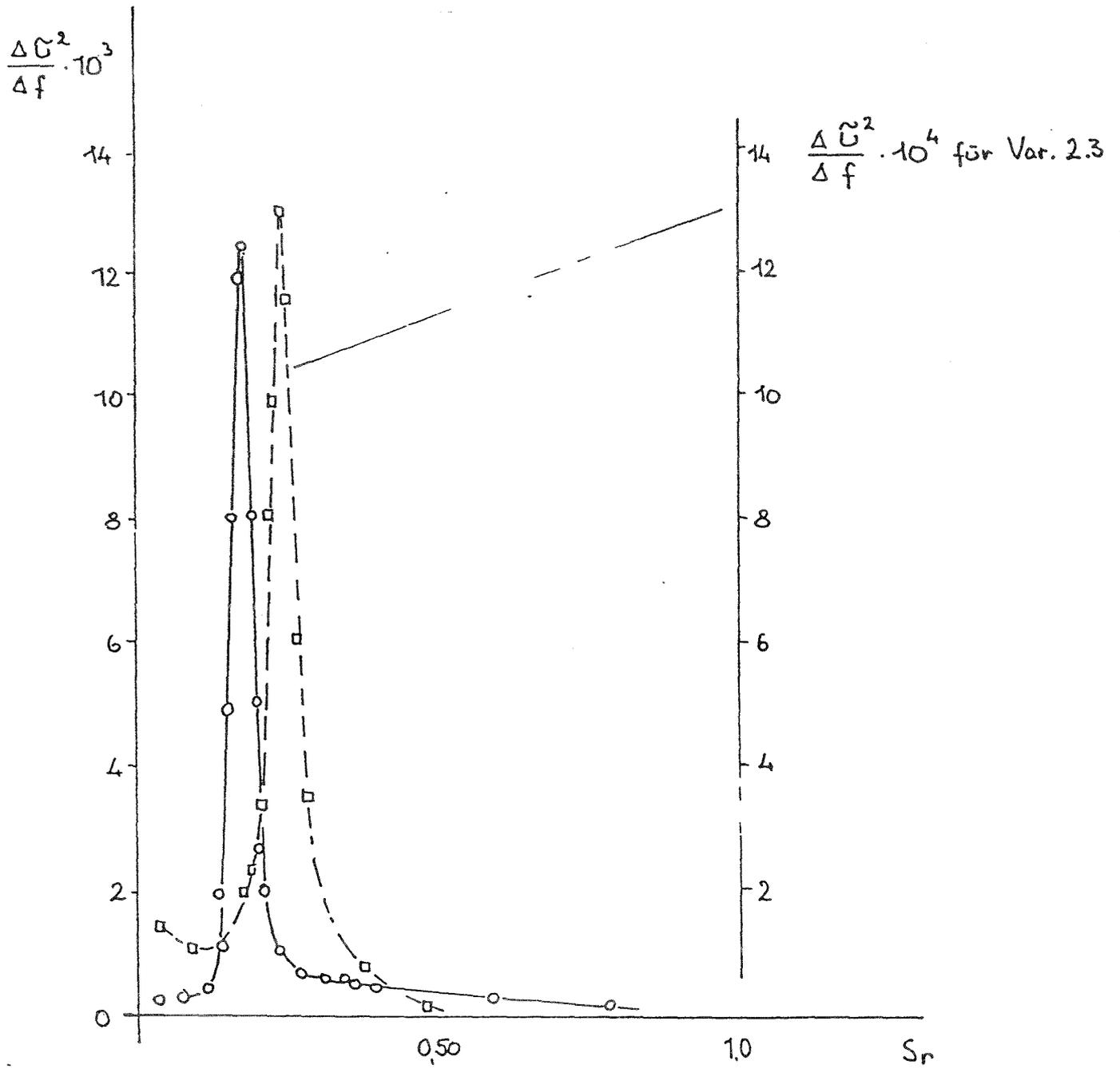


Abb.4: Beiwertkomponenten



Variante	Symb.	x/d	y/d	Tu	10 ⁵ * Re	Bemerkung
1.2	○	-4,5	0,64	0,285	1,06	-
2.1	●	-4,5	0,50	0,212	0,92	mit Leist. 4*4
2.2	x	-4,5	0,50	0,197	0,82	mit Draht ø2,5
1.2	+	-4,5	0,45	0,184	4,31	-

Abb.5: Spektrale Dichten bei Nachlaufbeeinflussung



Variante	Symb.	x/d	y/d	Tu	10 ⁵ * Re	Bemerkung
1.2	○	-4,5	0,64	0,285	1,06	-
2.3	□	-4,5	0,50	0,13	0,87	mit Leitbl.

Abb.6: Spektrale Dichten bei Nachlaufbeeinflussung

2.5.3 Spektrale Dichten der Längsgeschwindigkeitsschwankungen

Die spektralen Dichten der Längsgeschwindigkeitsschwankungen für den unter- und überkritischen Reynoldszahlbereich sind auf Abb. 5 dargestellt. Sie zeigen das bekannte Ergebnis:

$Re < Re_{krit}$ schmalbandige spektrale Dichte

$Re > Re_{krit}$ breitbandige spektrale Dichte und Verschiebung der Spitze zu wesentlich höheren Strouhalzahlen
 $Sr \approx 0,40$

in Übereinstimmung mit den Messungen von Schewe [2]. Die spektralen Dichten der Modelle mit Störungen bzw. Leiteinrichtung sind nun schmalbandig wie im transkritischen Reynoldzahlbereich und liegen bei vergleichbaren Strouhalzahlen (Abb. 5 und 6) wie bei Schewe [2].

Damit ist die Möglichkeit der Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches durch Oberflächenstörungen nachgewiesen. Bevorzugt wird hier die Störung "Draht 2,5 ϕ mit Klebeband befestigt", weil damit die größten Querkraftbeiwerte erreicht wurden. Die im Vergleich zu Schewe [2] noch zu kleinen Querkraftbeiwerte der Modellierung dürften auf die im Vergleich zu Schewe größere Modellstreckung und auf die nachlaufzerstörende Wirkung der Oberflächenstörung (starke turbulente Störung) zurückzuführen sein.

2.6 Einschätzung der Ergebnisse

Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Meßergebnisse an Mehrfachzylinderanordnungen vom unterkritischen in den transkritischen Bereich sind gesicherte Ergebnisse am Einzelzylinder. Hierzu sind zwar eine Reihe von Ergebnissen (zum Teil auch aus Originalmessungen [3]) bekannt, aber der Stand der Erkenntnisse ist nach wie vor unbefriedigend [4].

Das betrifft insbesondere den Zusammenhang $\tilde{c}_Q = f(Sr, Re, \tilde{\eta})$,

wo der Einfluß der Auslenkung unsicher ist. Im transkritischen Reynoldszahlgebiet sind außerdem die Einflüsse der Oberflächenrauigkeit, der Windgrenzschicht und der Temperaturschichtung unbekannt.

Zunächst sollen bekannte Ergebnisse am Einzelkreiszylinder (unterkritisch, transkritisch) mit Ergebnissen am Quadratzyylinder (diese sind Re -unabhängig!) mit eigenen Messungen verglichen werden.

2.6.1 Vergleich von Einzelzylindermessungen

Auf Tabelle 3 sind die zu vergleichenden Meßergebnisse an

Kreiszylinder - unterkritisch
 Kreiszylinder - transkritisch
 Quadratzyylinder - Re -unabhängig

zusammengestellt.

Verglichen werden

- Widerstandsbeiwert	$\overline{C_w}$
- effektiver Kraftbeiwert	\tilde{C}_Q
- Strouhalzahl	S_r

Im idealen Fall (es wird angenommen, daß die Nachläufe geometrisch und kinematisch ähnlich sind) gilt:

$$S_r \sim 1/\overline{C_w} \quad \tilde{C}_Q \text{ Druckwert} \sim \overline{C_w}$$

Für reale Nachläufe gelten diese Beziehungen nur grob. Es muß unterschieden werden zwischen dem aus Druckverteilungsmessungen ermittelten örtlichen Querkraftbeiwert und dem aus der Beanspruchung ermittelten. Wegen der Phaseneinflüsse ist der letztere in der Regel kleiner. Er nimmt mit der Auslenkung des Zylinders zu.

Grundlage: Annahme geometrisch und kinematisch ähnliche Nachläufe, dann gilt (wenigstens in der Tendenz)		
$S_r \sim 1/c_w$	$C_Q, \text{ Druckv.} \sim C_w$	
Kreiszylinder unterkritisch	Kreiszylinder transkritisch	Quadratzyylinder (Re -unabhängig)
Nachlauf u.a. aus laminarer Grenzschicht	Nachlauf u.a. aus turbulenter Grenzschicht	Ablösung an Vorderkante
Steckung $l/d \rightarrow \infty$; Auslenkung y/d		
$c_w \approx 1,2$ Chen [4]	$c_w \approx 0,70$ Chen [4] $\approx 0,55$ Schewe [2]	$c_w \approx 2,3^*$ Bearman [5]
$\tilde{C}_Q \approx 0,6^*$ Chen [4]	$\tilde{C}_Q \approx 0,05 \dots 0,20^+$ Ruscheweyh [3]	$\tilde{C}_Q \approx 1,20^*$ Bearman
$S_r = 0,19$ Chen [4]	$S_r = 0,27$ Chen [4]	$S_r = 0,13$ Bearman
Streckung $l/d \approx 15$ Korrelationslänge $\approx 3*d$		
$\tilde{C}_Q \approx 0,7 * 0,2 = 0,14$ $S_r \approx 0,16$ King [9]	effekt. Streckung > 15 $\tilde{C}_Q \approx 0,2 * 0,2 = 0,4$ gemessen: $\tilde{C}_Q \approx 0,05$ Schewe [2] $S_r \approx 0,28$ $l/d=10$ $c_w = 0,55$ eigene $\tilde{C}_Q = 0,024$ Messungen $S_r = 0,25$ $l/d=13$	

* aus Druckverteilungsmessungen

+ nicht nur aus Druckverteilungsmessungen, Auslenkung $\neq 0$

Weitere Einflüsse: Rauigkeit, Windgrenzschicht, Temperaturschichtung, große Auslenkungen wirken beiwertvergrößernd

Tab.3: Umrechnung unter- zum transkritischen Reynoldszahlgeb. Einzelkreiszyylinder

Die Querkraftbeiwerte unterkritisch (Kreiszyylinder) und des Quadratzyinders betragen etwa 50% des Widerstandsbeiwertes. Im transkritischen Fall sind sie kleiner, wobei zu beachten ist, daß der Widerstandsbeiwert nach Chen [3] sehr groß erscheint. Für die Strouhalzahlen gilt die Beziehung $St \sim 1/\sqrt{C_w}$ wenigstens in der Tendenz.

Für Kragzyylinder mit einer geometrischen Streckung $l/d=15$ gibt Ruscheweyh eine Korrelationslänge von $3d$ für kleine Auslenkungen an. Für den unterkritischen Fall erhält man dann $\tilde{C}_Q \approx 0,14$ in guter Übereinstimmung mit unseren Messungen. Im transkritischen Fall ist die effektive Streckung, wegen schmalen Nachlaufes an und für sich größer. Man erhält $\tilde{C}_Q \approx 0,04$, in guter Übereinstimmung mit Schewe [2].

Bei unserer Modellierung des transkritischen Gebietes erhalten wir einen kleineren Wert $\tilde{C}_Q \approx 0,024$ und eine Vergrößerung der Strouhalzahl. Der zu kleine Querkraftbeiwert ist sicher auf die kräftige Grenzschichtstörung zurückzuführen.

Es sei darauf hingewiesen, daß die hier ermittelten recht kleinen Querkraftbeiwerte für kleine Auslenkungen zutreffen. Bei größeren Auslenkungen ist mit größeren Querkraftbeiwerten zu rechnen.

Insbesondere im Hinblick auf die Untersuchungen von Doppelzyylinderanordnungen wird die hier untersuchte Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches als wesentlich angesehen.

2.6.2 Zur Übertragung der Meßergebnisse von Mehrfachanordnungen in den transkritischen Reynoldszahlbereich

Die bisherigen Ergebnisse der Mehrfach-Kreiszyylinder-Anordnungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich sind summarisch:

- Verkleinerung der Strouhalzahl bei bestimmten geometrischen Konfigurationen,
- der maximale Querkraftbeiwert des Einzelkreiszyinders (er-

mittelt aus Druckverteilungsmessungen) wird nicht überschritten.

Ohne Untersuchungen im oder ohne Simulation des transkritischen Reynoldszahlbereiches würde man für Mehrfachanordnungen im transkritischen Bereich die Querkraftbeiwerte des transkritischen Bereiches des Einzelzylinders übernehmen und die unterkritisch gemessenen Strouhalzahlen etwas vergrößern.

Die realen Strömungsverhältnisse im transkritischen Strömungsbereich unterscheiden sich aber vor allem durch die Breite der Strömungsnachläufe, die am Nachstromzylinder doch zu geänderten Auswirkungen führen können.

Es werden deshalb besondere Untersuchungen an ausgewählten Zweiergruppen im großen Windkanal im simulierten transkritischen Reynoldszahlbereich durchgeführt. Die Modellierbarkeit des transkritischen Bereiches durch Anbringen von Grenzschichtstörungen am Einzelzylinder ist nachgewiesen. Der Vergleich der gemessenen

- Widerstandbeiwerte
- Strouhalzahlen
- Querkraftbeiwerte
- spektralen Dichten

mit den Ergebnissen von Schewe [2] im transkritischen Reynoldszahlgebiet ist zufriedenstellend.

Bei der Auswertung der Ergebnisse von Mehrfachanordnungen muß die Problematik der unsymmetrisch umströmten Gruppenanordnung beachtet werden.

3. Strömungsnachlaufuntersuchungen in der Fließrinne

In der Wasserfließrinne wurden die Strömungsfelder um den Kreiszyylinder (einzeln und in Gruppenanordnung) aufgenommen. Es wurden Kreiszyylinder $d=95$ mm und 42 mm verwendet. Zur Sichtbarmachung der Strömung wurde auf die Wasseroberfläche Grieß auf-

gestreut. Fotografiert wurde mit ruhender und mit bewegter Kamera. Die Wirbelablösefrequenzen wurden an den mit einer Stoppuhr aufgenommenen Schwingungszeiten ermittelt.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die unterkritische Kreiszyylinderumströmung. Auf Abb.8, mit bewegter Kamera aufgenommen, ist sehr schön die Karmansche Wirbelstraße zu sehen.

Die ausgewählten Gruppenanordnungen mit unterschiedlichen Zylinderdurchmessern, quer, längs und unter 25° zur Reihung angeströmt, zeigen die Abb. 9 bis 14 wiederum mit fester bzw. mit bewegter Kamera aufgenommen.

- Queranordnung:

Es bildet sich hinter jedem Zylinder eine Wirbelstraße aus

$$Sr, d=95 \approx 0,20 \quad Sr, d=42 \approx 0,21$$

Die Wirbel beeinflussen sich gegenseitig. Wahrscheinlich ist ihre Lage nicht stabil.

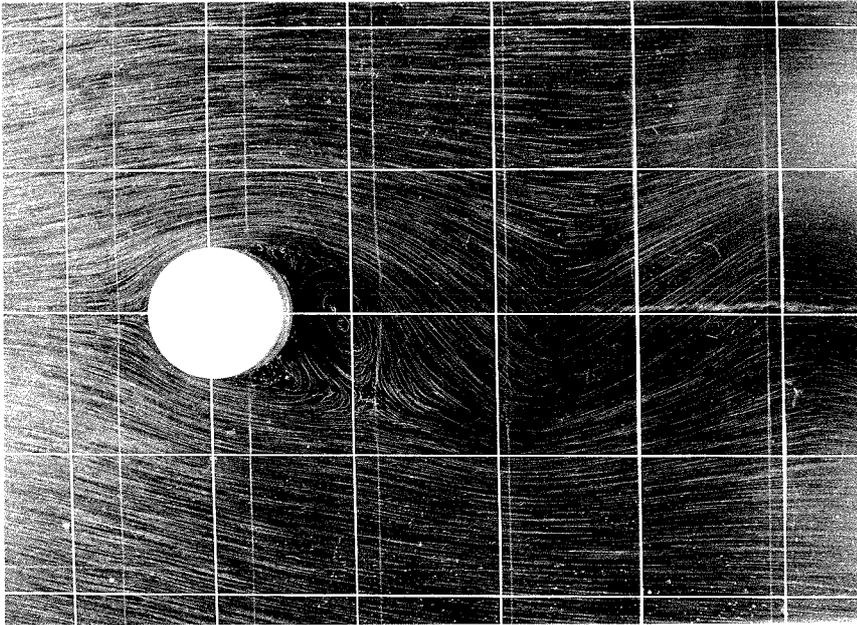
- Längsanordnung:

Die Strömung löst am großen Zylinder ab. ($Sr=0,17$)

-unter 25° angeströmt:

Am vordern Zylinder bildet sich etwa eine Wirbelstraße wie am Einzelzylinder aus ($Sr=0,15$). Das Gebiet zwischen dem großen und dem hinteren Zylinder wird zunächst laminar durchströmt. Dieser Strahl rollt sich zu Wirbeln auf, einmal in den relativ stabilen Nachlauf des großen Zylinders und zum anderen in die relativ breite Wirbelstraße des hinteren Zylinders. Die zugehörige Strouhalzahl beträgt nur $Sr \approx 0,08$. Resonanzschwingungen werden also bei höheren Windgeschwindigkeiten auftreten, sofern der Wind genügend laminar ist.

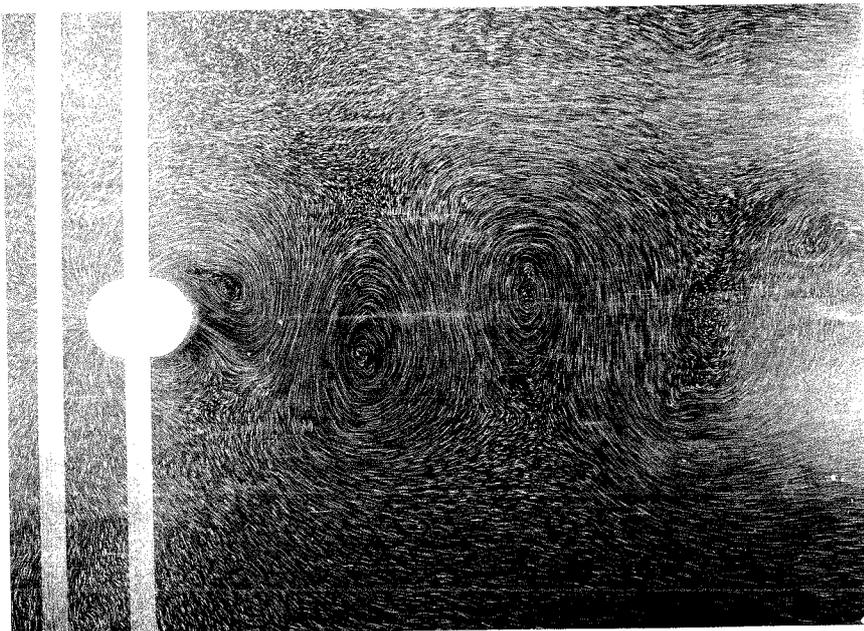
Umströmung: Kreiszyylinder



$$Re = 6\,720$$

$$Sr = 0,194$$

Abb. 7



$$Re = 11\,285$$

$$Sr = 0,194$$

$$h/l \approx 0,26$$

Abb. 8 mit bewegter Kamera

Umströmung: Kreiszyylinder in Gruppenanordnung
(quer)

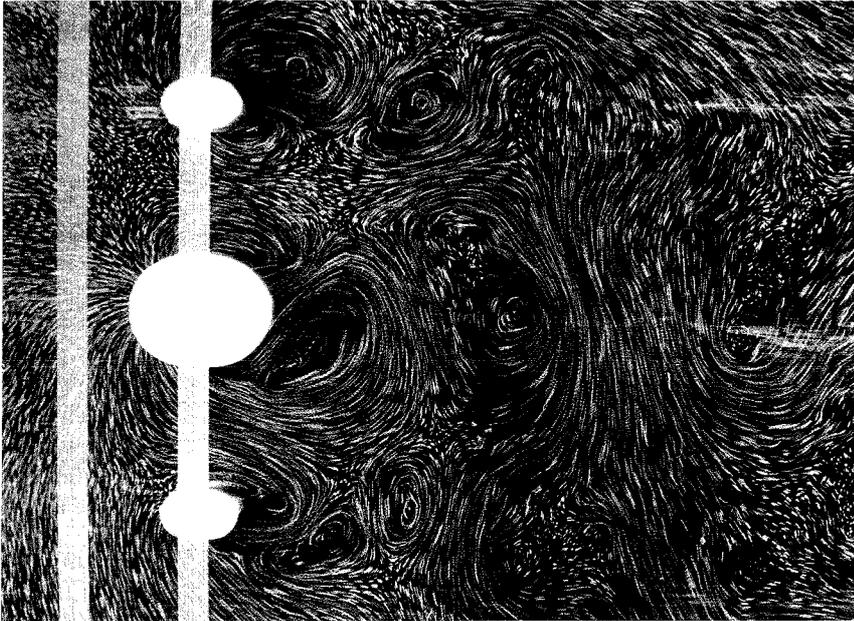


Abb. 9

$$Re = 9655$$

$$Sr, d=klein = 0,21$$

$$Sr, d=gro\beta = 0,20$$

$$d_1 = 95 \text{ mm}$$

$$d_2 = 42 \text{ mm}$$

$$a = 176 \text{ mm}$$

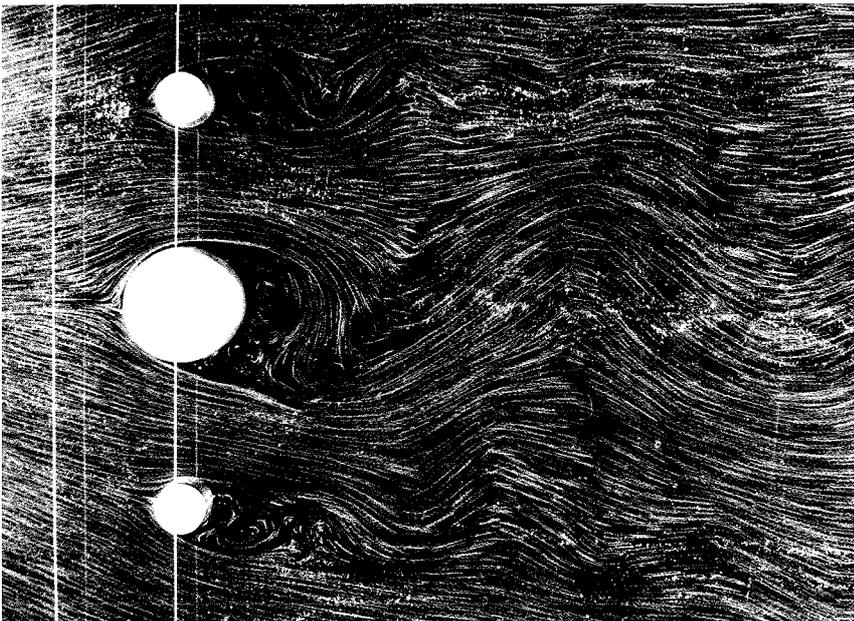
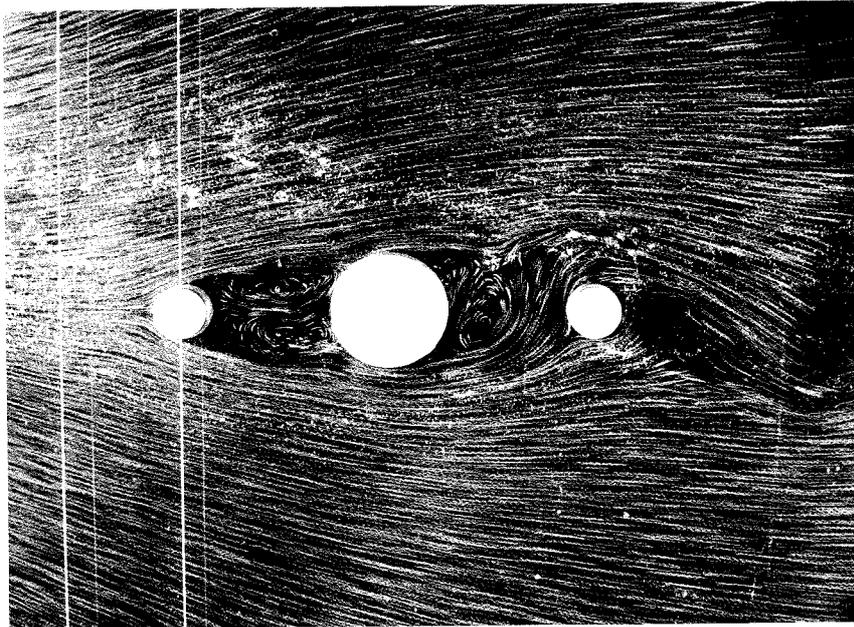


Abb. 10 mit bewegter Kamera

Umströmung: Kreiszyylinder in Gruppenanordnung
(längs)



$$Re = 9170$$

$$Sr, d = \text{gro\ss} = 0,17$$

$$d_1 = 95 \text{ mm}$$

$$d_2 = 42 \text{ mm}$$

$$a = 176 \text{ mm}$$

Abb. 11

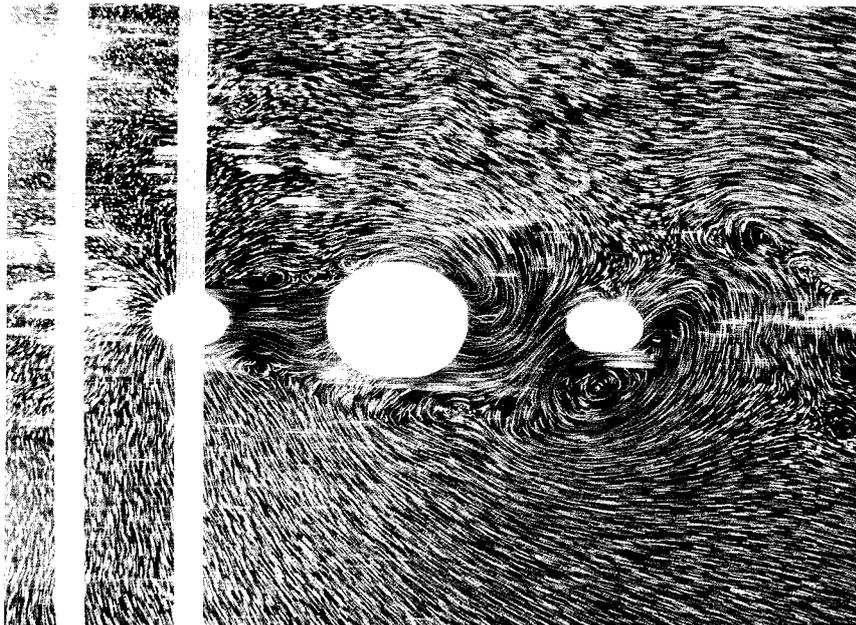
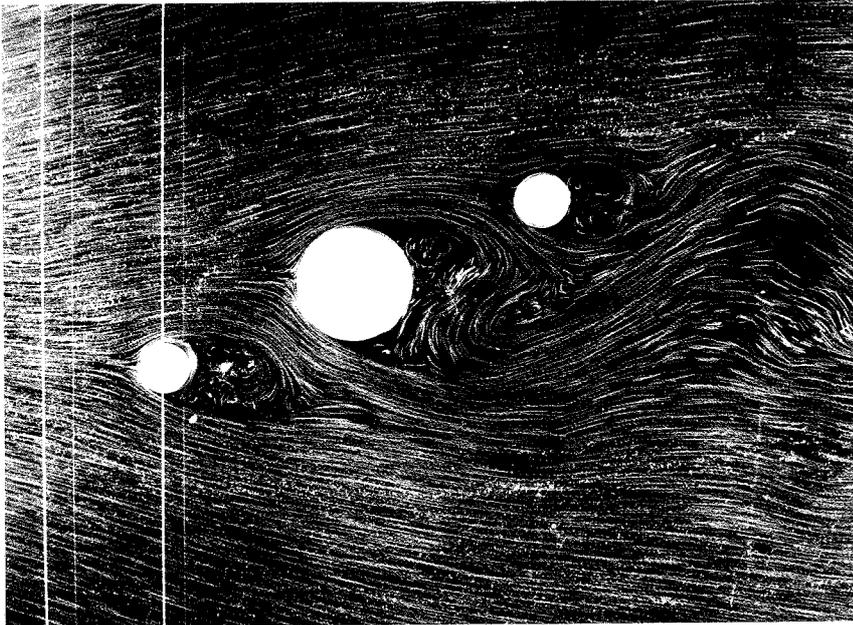


Abb. 12 mit bewegter Kamera

Umströmung: Kreiszyylinder in Gruppenanordnung
(unter $\beta = 25^\circ$ angeströmt)



$$Re = 9395$$

$$Sr_{, 1.-2. \text{ zyl }} \approx 0,15$$

$$Sr_{, 3. \text{ zyl }} \approx 0,08$$

$$d_1 = 95 \text{ mm}$$

$$d_2 = 42 \text{ mm}$$

$$a = 176 \text{ mm}$$

$$\alpha = 25^\circ$$

Abb. 13

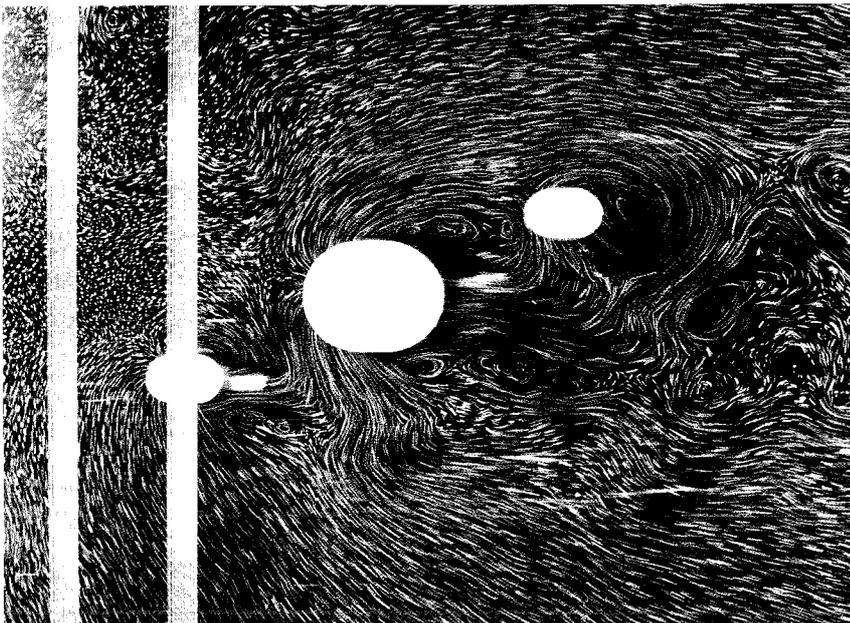


Abb. 14 mit bewegter Kamera

4. Windkanaluntersuchungen mit Zweiergruppen (Massedämpfungsparameter $m_{\text{D}} \approx 26$) im mittleren Windkanal im unterkritischen Reynoldszahlbereich

Der vorliegende Abschnitt enthält Ergebnisse zu systematischen Messungen der Strouhalzahlen und der dynamischen Beiwerte in Resonanz für die Nachlaufwirbelerregung von Kreiszyylinder-Doppelanordnungen mit Massendämpfungsparametern $m_{\text{D}} \approx 26$. Es erfolgte eine Variation des Durchmesser- und Höhenverhältnisses, des Abstandsverhältnisses und Anströmwinkels zur Reihung der Zweieranordnung.

In der Abb. 15 ist der Versuchsaufbau gezeigt. Die folgende Tabelle enthält die Modellabmessungen und die Variantenübersicht.

Folgende Parameter wurden variiert:

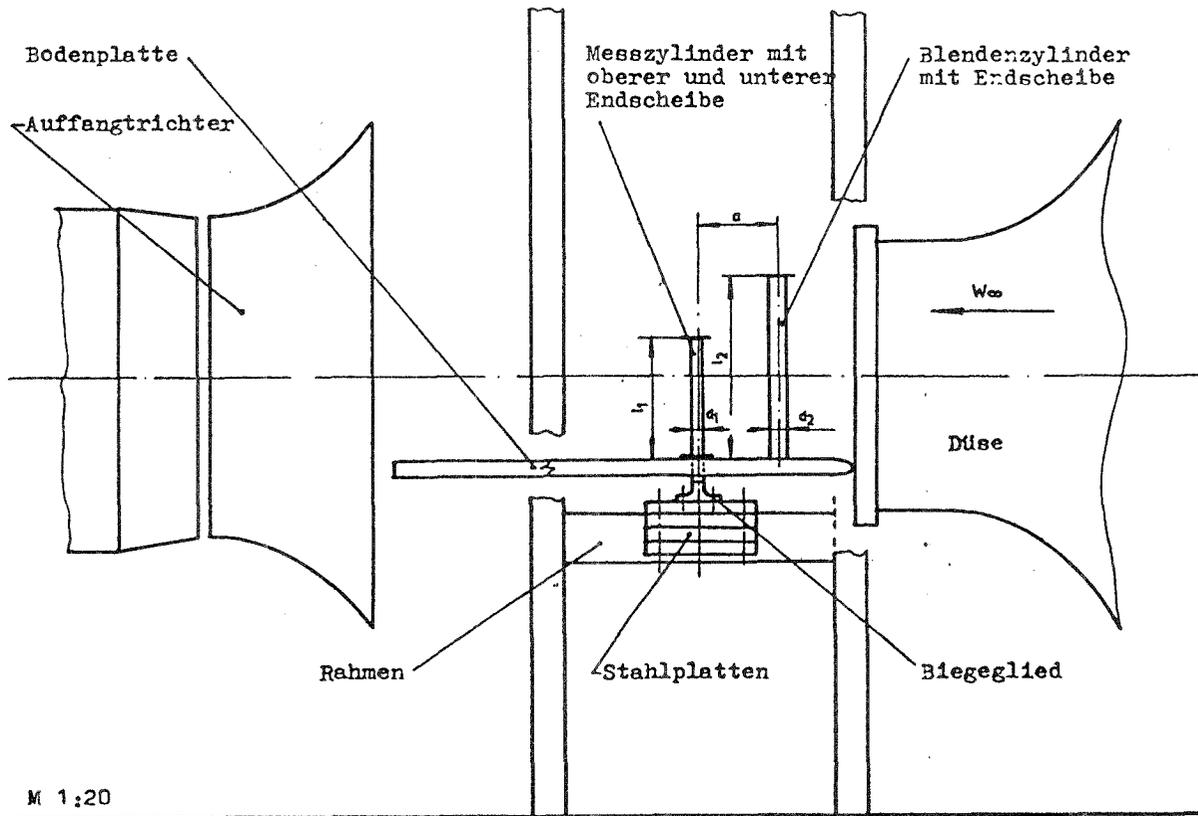
- Blendenabmessungen d_2/d_1 und l_2/l_1
- Abstandsverhältnis a/d_1
- Anströmwinkel β zur Reihenachse

Der Meßzylinder hatte einen Massendämpfungsparameter $m_{\text{D}} \approx 26$. Er war auf ein zylindrisches Biegeglied aufgeschraubt. Das Biegeglied wurde auf der oberen von vier schweren Stahlplatten, welche in einen Stahlrahmen eingelegt und verschraubt waren, mit Schrauben befestigt. Der Rahmen war am Gerüst der Dehnmeßwaage des NK II befestigt. Oberhalb des Biegegliedes war eine den Erdboden simulierende Bodenplatte angeordnet. Vor der Luftströmung wurde das Biegeglied mit einer Blende geschützt.

Der Unterbau mußte sehr steif und schwer ausgeführt werden. Die Weichheit des Modellschornsteines lag im Biegeglied.

In der Doppelanordnung wurden Blendenmodelle mit verschiedenen Abmessungen aus Stahl fest mit der Bodenplatte verschraubt um den halbelastischen Meßzylinder angeordnet. Es ließen sich Abstandsverhältnisse a/d_1 von 3,25; 4; 6,8 und 10 sowie Anströmwinkel zur Reihenachse von $\beta=0^\circ$; 5° ; 10° ; 15° ; 20° ; 25° ausführen.

Die Zylinder wurden zur Realisierung einer größeren effektiven



Messzylinder : $d_1 = 30 \text{ mm}$
 $l_1 = 450 \text{ mm}$
 Wandstärke 1,5 mm
 aus Glasfaser-Laminat
 Eigenfrequenz
 $f_0 = 66,5 \text{ Hz}$ } mit oberer
 logarithmisches } und untere
 Dämpfungsdekrement } Endscheibe
 $\delta = 0,05$ } ermittelt

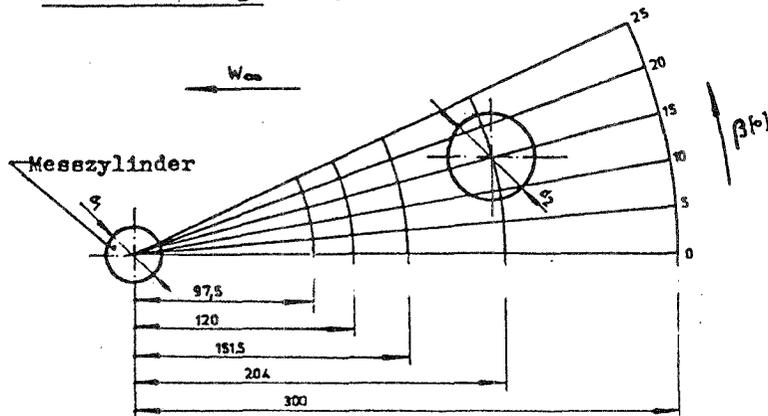
Blendenzylinder: $d_2 = 20; 30; 45 \text{ mm}$
 $l_2 = 225; 340; 450; 675; 900 \text{ mm}$
 aus Stahl ($\phi 20; 30$) bzw.
 Stahlrohr ($\phi 45$).

Endscheiben $\phi 90 \times 1,2$ aus Pappe

Biegeglied aus 42 CrMo4

M 1:20

Modellanordnung: M 1:3



M 1:2

4 DMS jeweils
 um 90° ver-
 setzt auf-
 geklebt

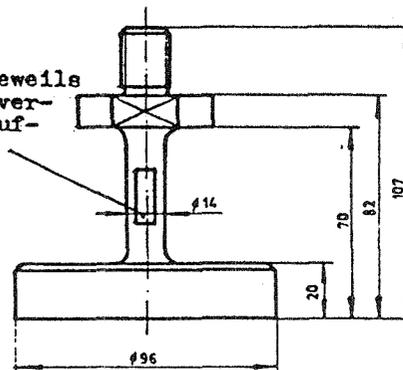


Abb.15: Versuchsaufbau und Abmessungen

4.1 Versuchsergebnisse

Die Bestimmung der Querkraftbeiwerte ist empfindlich abhängig von der Dämpfung. Aus diesem Grunde wurde wiederholt und verteilt über den Untersuchungszeitraum die Dämpfung ermittelt.

Außerdem wurden wiederholt über den Untersuchungszeitraum die resultierenden Beiwerte des Einzelzylinders bestimmt.

Es wurden für den ganzen Versuchszeitraum $\alpha=0,050$ angesetzt. Die aus den Wiederholungsmessungen ermittelten resultierenden Beiwerte sind auf Abb. 16 angegeben. Sie fallen zu Beginn des Versuchszeitraumes, sind aber dann nahezu konstant ($\tilde{c}_R \approx 0,15$). Beiwerte aus der Beanspruchung im Bereich $0,15 < \tilde{c}_Q < 0,20$ sind für vorliegende Verhältnisse (Kragbalken, Dämpfung, Massenparameter und Streckung) wiederholt gemessen worden (z.B. Wootton [11], Fung [7], Försching [6]).

Der örtlich wirkende Querkraftbeiwert aus Druckverteilungsmessungen ermittelt [8] liegt bei $\tilde{c}_Q \approx 0,59$. Nach Ruschweyh [9] ist die Korrelationslänge für kleine Amplituden $\approx 3 \cdot d$, so daß man für den Querkraftbeiwert aus der Beanspruchung für eine abgeminderte Zylinderlänge von $12 \cdot d$ den von uns gemessenen Querkraftbeiwert $\tilde{c}_Q \approx 0,15$ erhält.

Die Korrelationslänge ist nun offenbar keine feste Größe. Sie hängt von der Auslenkung, aber sicher auch von der Dämpfung und eventuell auch von der Temperaturschichtung der Strömung sowie von anderweitig der Bewegung zugeführten Energie ab. Dem anfangs gemessenen Querkraftbeiwert $\tilde{c}_Q \approx 0,45$ ist also eine starke Vergrößerung der Korrelationslänge zuzuordnen.

Von Staubli [10] wurden Querkräfte und Phasenlagen für einen zwangsbewegten Zylinder gemessen. Für die dafür berechnete freie Zylinderbewegung ergaben sich ebenfalls bei bestimmten Parametern zweiwertige Lösungen in vergleichbaren Größenordnungen.

Für den vorliegenden unterkritischen Fall dürften im Mittel die kleinere Beiwerte am Einzelzylinder auftreten. Größere Beiwerte unterhalb der aus der Druckverteilung ermittelten kön-

nen aber nicht ausgeschlossen werden. Dieses Verhalten muß nicht notwendigerweise auch bei Doppelanordnungen auftreten, weil bei den dort vergleichsweise größeren Zylinderauslenkungen die Korrelationslängen schon viel größer sein werden als beim Einzelzylinder.

Im folgenden werden immer die resultierenden Beiwerte aus der Quer- und Längsbewegung angegeben. Die Längsbewegung ist meist im Mittel in Phase mit der Querbewegung und viel kleiner als die letztere. Die Längsbewegung tritt auf, wenn die Hauptträgheitsachsen nicht genau in und normal zur Strömrichtung liegen.

Die Strouhalzahlen der Wiederholungsmessungen lagen in der bekannten Größenordnung ($0,17 < Sr_0 < 0,18$).

4.1.1 Strouhalzahlen der Doppelanordnung

Der Meßzylinder schwingt in der Umgebung der Resonanz (bezogen auf die Wirbelablösfrequenz des ruhenden Zylinders) mit der Eigenfrequenz der Grundschwingung. Die Wirbelablösefrequenz wird durch die Zylinderbewegung gesteuert.

Es wurde jeweils die Geschwindigkeit eingestellt, bei der sich etwa maximale Querkräfte ergaben. Das war wegen der meist großen Querkraftschwankungen nur ungefähr möglich. Es sei hervorgehoben, daß die der Beanspruchung zugehörige Querkraft wesentlich von der Strouhalzahl abhängig ist.

$$F_Q \sim 1/Sr^2$$

Wegen der in Abhängigkeit von der geometrischen Anordnung der Schornstein-Doppelanordnung auftretenden Verkleinerung der Strouhalzahlen treten größere Beanspruchungen auf. Die Resonanz tritt bei höheren Windstaudrücken auf.

Mit dieser Geschwindigkeit und der Eigenfrequenz des Zylinders wurden die Strouhalzahlen gebildet. Das Maximum der Querkraft liegt bei Strouhalzahlen die kleiner sind als die der Wirbelablösung am starren Zylinder.

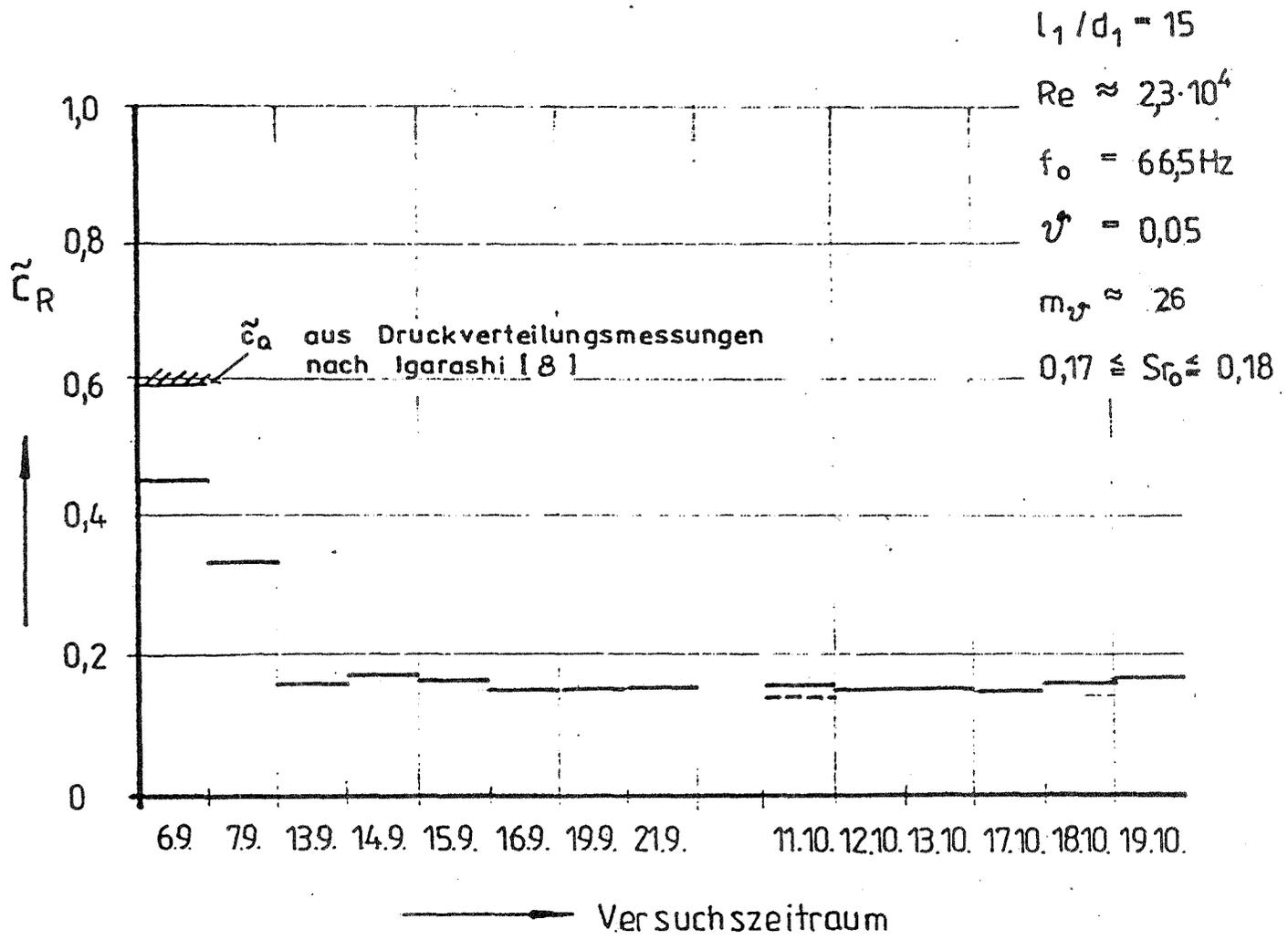


Abb. 16: Wiederholungsmessungen am Einzelzylinder
Resultierender Kraftbeiwert

Zur Dokumentation der Strouhalzahlen wurde für jedes Durchmesser- und Längenverhältnis der 100-fache Wert der Strouhalzahl am Ort des Meßzylinders eingetragen. Im Gegensatz zu den Versuchen wird hier der Meßzylinder um den festgehaltenen Anströmzylinder gedreht dargestellt (Abb. 17 bis 23). Es ist möglich, die Nachlaufgrenzen des ungestörten Einzelzylinders ungefähr anzugeben, was hilfreich für die Interpretation der Versuchsergebnisse ist.

Abb. 24 zeigt die Strouhalzahlen aller Varianten bei $\beta=0^\circ$ (Anströmung zur Reihung) aufgetragen über dem Zylinderabstand bezogen auf den Durchmesser des Nachstromzylinders. Der Vergleich mit den Messungen von Igarashi [8, 12] bei $d_2/d_1=1,0$ und $d_2/d_1=1,49$ ist insbesondere bei dem letzteren recht gut. Bei $d_2/d_1=1,0$ und $a/d_1=3,0$ deutet sich eine sprunghafte Änderung im Nachstromfeld an. Dort treten nach Chen [4] bistabile Wirbelablösungen auf.

Es ist zweckmäßiger, die Auftragung über dem Abstand bezogen auf den Durchmesser des Anströmzylinders vorzunehmen, weil dann, bezogen auf den ungestörten Nachlauf des Anströmzylinders gleiche Anströmverhältnisse für den Anströmzylinder vorliegen würden. Das ist natürlich wegen der endlichen Zylinderabmessungen nicht exakt der Fall. Immerhin fallen die Meßpunkte enger zusammen (Abb. 25).

Für gleiche Durchmesser zeigt sich nicht der erwartete kontinuierliche Abfall der Strouhalzahlen über abnehmenden Abstand. Bei Igarashi [8] tritt dieser auch erst für $a/d_1 < 5$ auf. Bei $a/d_1=3$ tritt ein plötzlicher Abfall ein (Abb. 24).

Auch für kleinere Anströmdurchmesser ist die Tendenz etwa konstanter Strouhalzahlen für $a/d_1 > 4$ vorhanden. Erst bei $a/d_1 \approx 3$ tritt ein Abfall auf (Abb. 24). Wird vor dem Nachströmzylinder ein niedriger Zylinder kleineren Durchmessers angeordnet, verhält der erstere sich wie ein Einzelzylinder (der obere Teil des Zylinders bringt die wesentliche Erregung. Siehe auch [9]). Bei Vergrößerung der Höhe des Anströmzylinders kleineren Durchmessers tritt für den Nachstromzylinder ebenfalls eine Verkleinerung der Strouhalzahlen auf. Bei Beibehaltung der Querkraftbeiwert-Größenordnung ist also eine Vergrößerung der Beanspruchung die Folge.

Die Meßpunkte des Nachstromzylinders kleineren Durchmessers fallen für alle Längen mit abnehmenden Abstand recht gut zusammen. Die gemessenen Strouhalzahlen sind durchaus realistisch, weil die Nachströmgeschwindigkeit in Zylindernähe bei 50% der ungestörten Anströmgeschwindigkeit liegt und mit zunehmenden Abstand ansteigt.

Für $d_2/d_1=0,67$ ist das Nachlaufgebiet vergleichsweise schmal. Außerhalb des Nachlaufgebietes tendieren die Strouhalzahlen des Nachstromzylinders zu der des Einzelzylinders.

Für $d_2/d_1=1,0$ fällt der Vergleich mit Kiya [13] für $3 < a/d_1 < 5$ recht gut aus. Auch hier tritt der starke Strouhalzahlabfall erst für $a/d_1 < 5$ auf. Im Nachstromgebiet (Nachlauf) ändern sich die Strouhalzahlen mit der Anströmrichtung wenig.

Für $d_2/d_1=1,5$ gilt das Gleiche. Bemerkenswert ist, daß in der Umgebung der Nachlaufgrenze zwei Spitzen gemessen wurden.

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 0,67 \quad \frac{l_2}{l_1} = 0,5$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

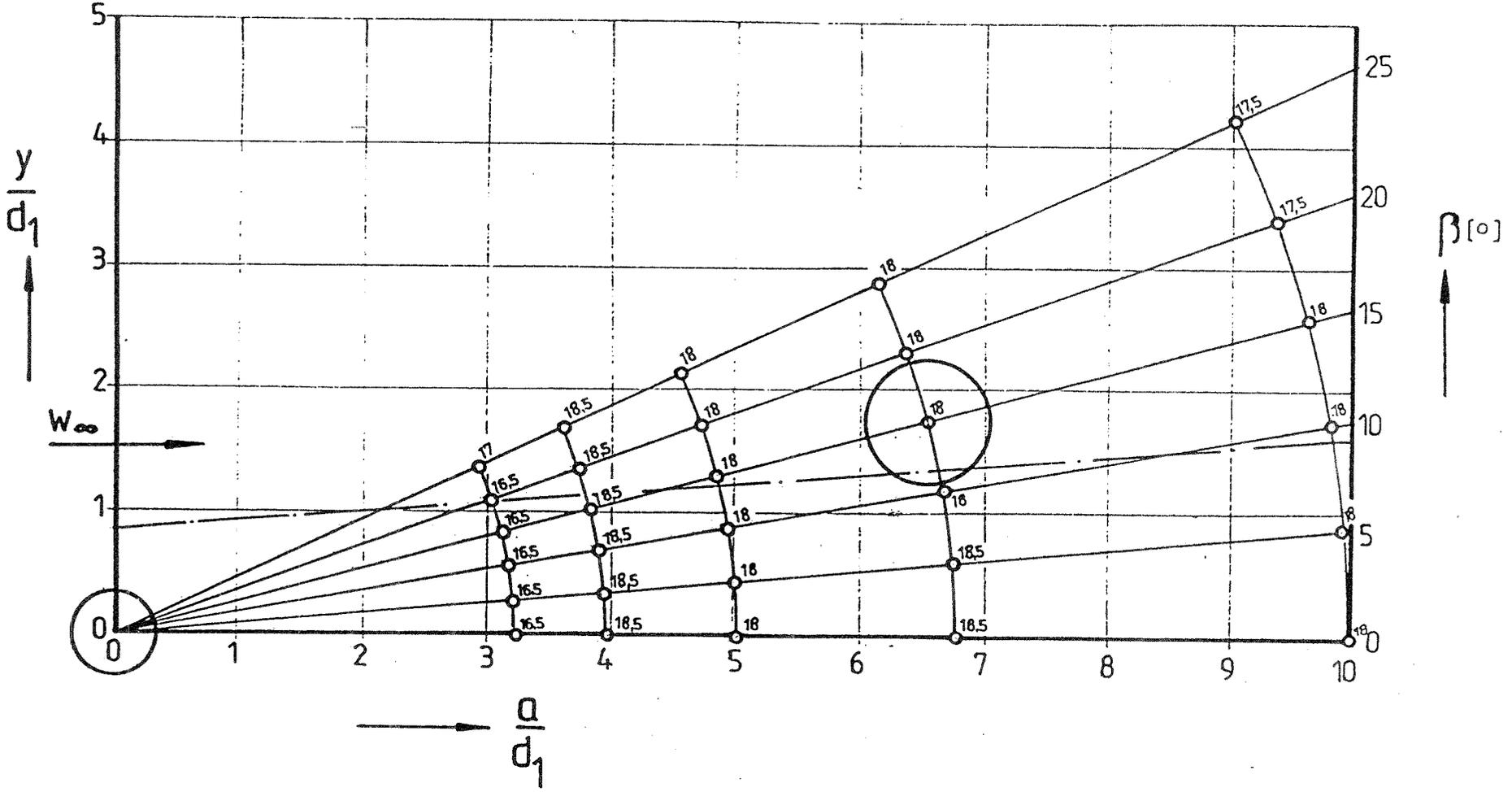


Abb. 17: Strouhalzahlen ($\times 100$) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 0,67 \quad \frac{l_2}{l_1} = 0,75$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

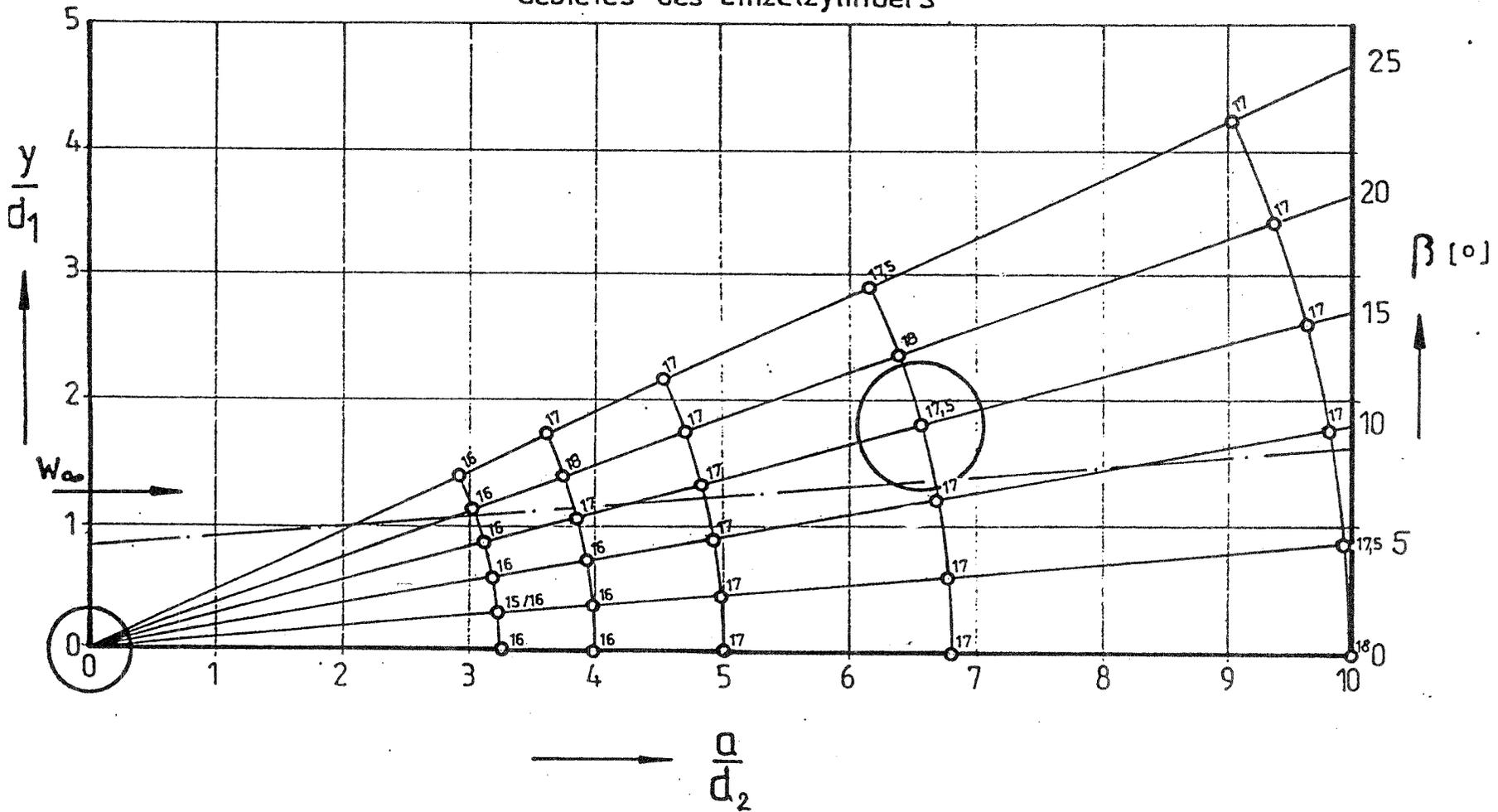
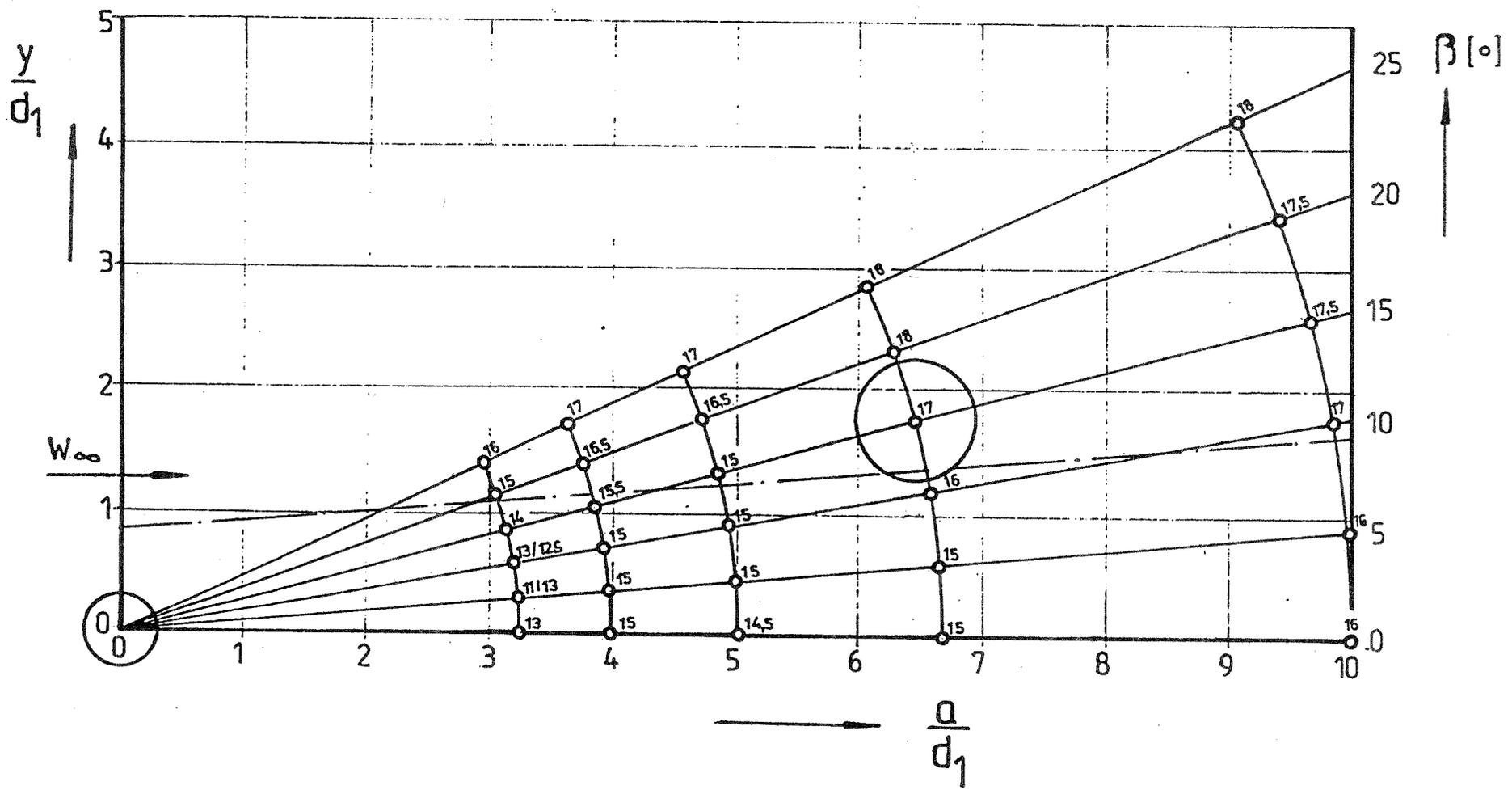


Abb. 19: Strouhalzahlen (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 0,67 \quad \frac{l_2}{l_1} = 1,0$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders



$\frac{l_1}{d_1} = 15$ $\frac{d_2}{d_1} = 10$ $\frac{l_2}{l_1} = 10$ — nach Chen [4]
 (Modell im geschlossenen Kanal $l/d_{\text{eff.}} \rightarrow \infty$)
 $St_{\text{Einzel}} = 0,17$
 — — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

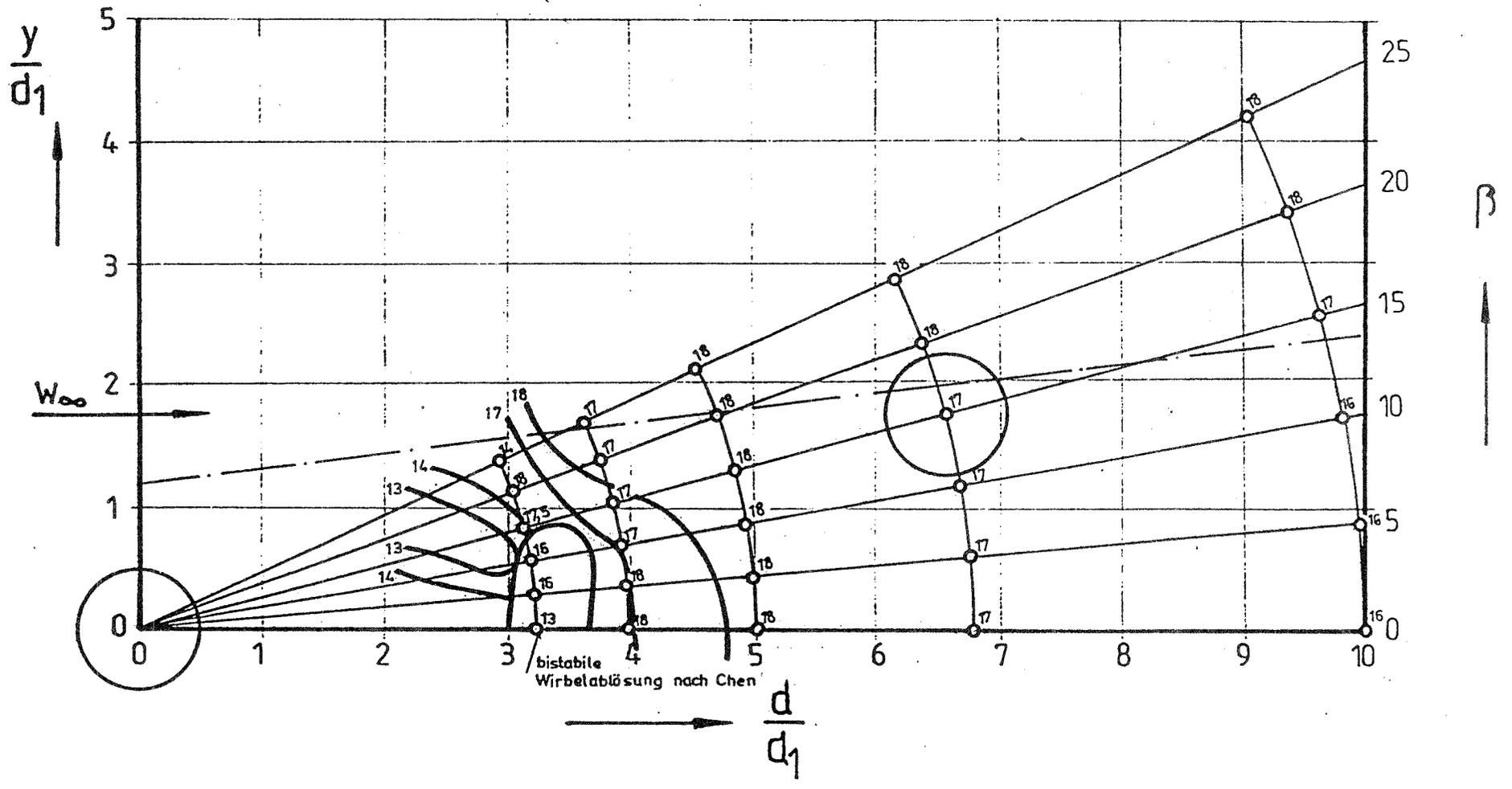


Abb. 21: Strouhalzahlen (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 1,0$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— — — — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

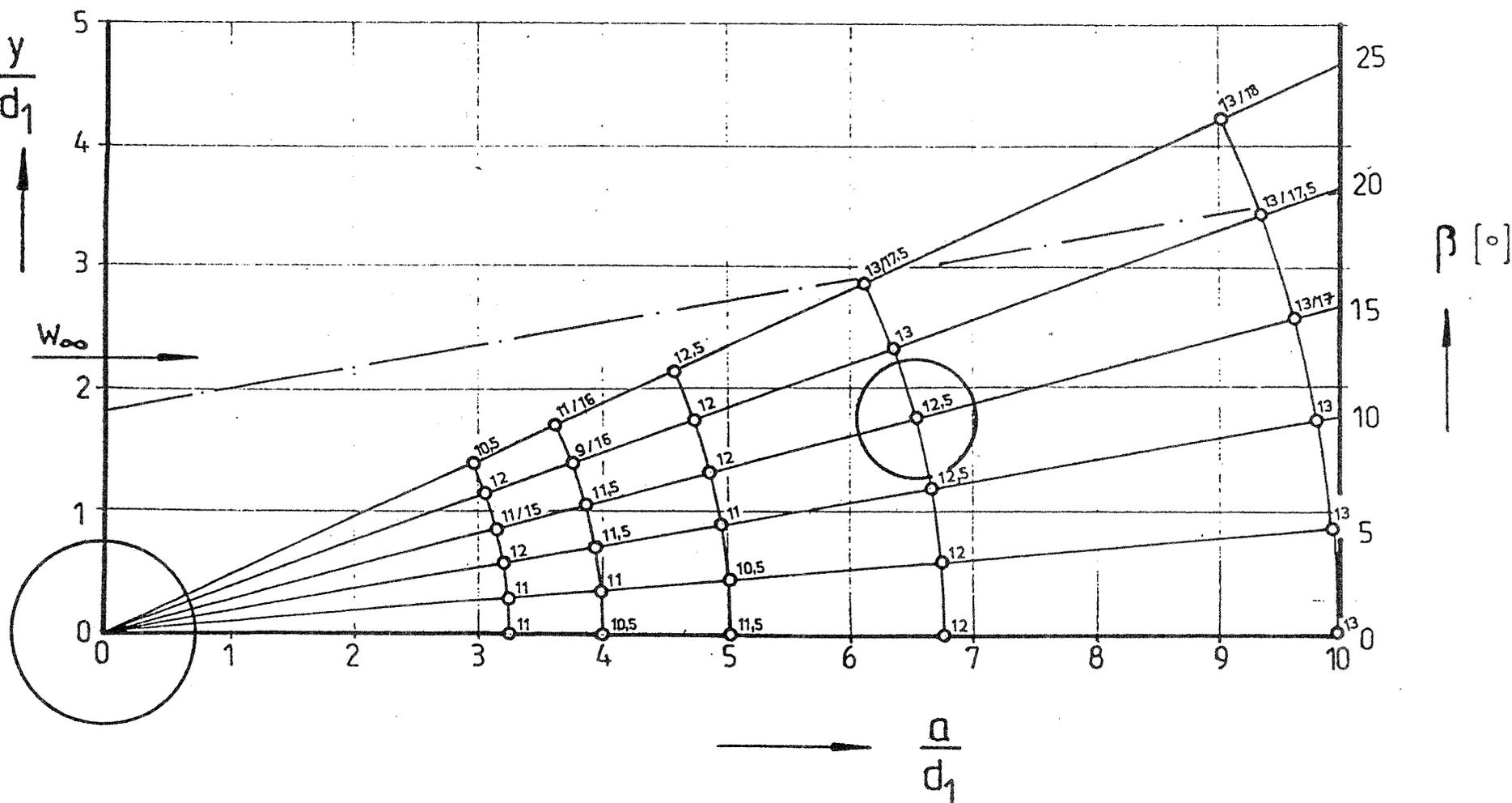


Abb. 22: Strahlzahlen (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 1,5$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— — — — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

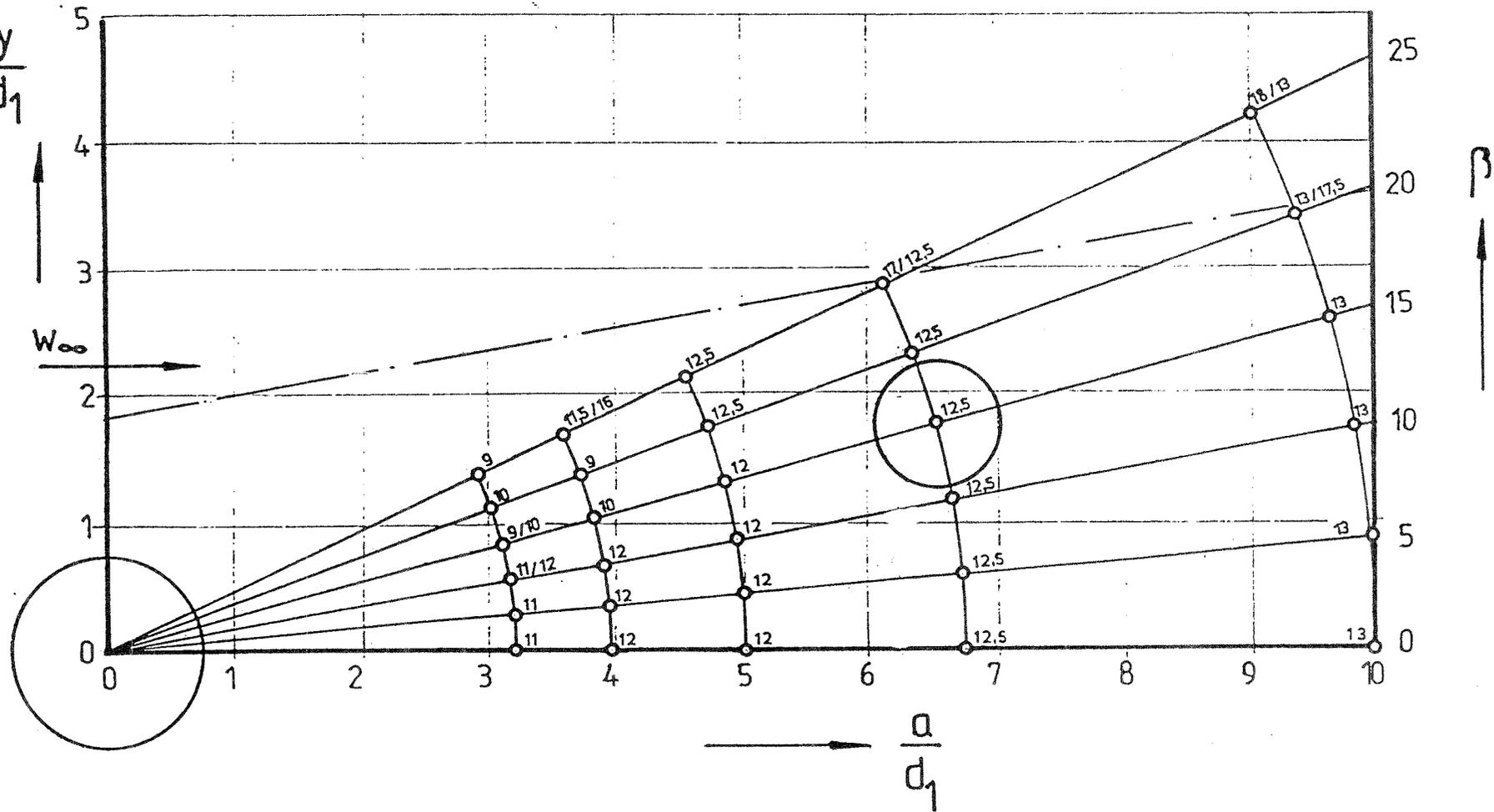


Abb. 23: Strouhalzahlen (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 2$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

— — — — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

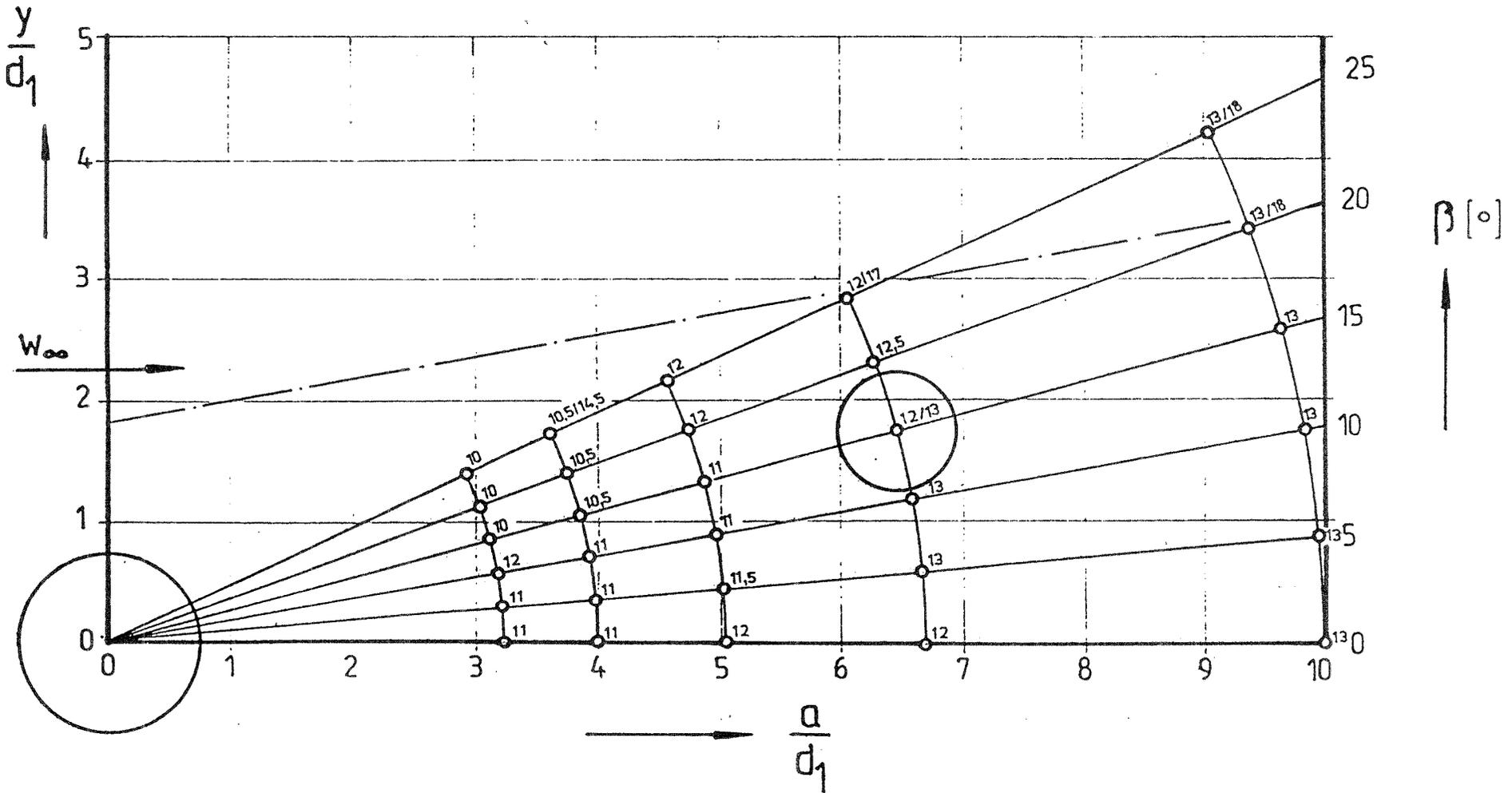


Abb. 24: Strouhalzahlen der Doppelanordnung bei $\beta = 0^\circ$

Fließrinne
 \star } $Sr_{\text{Einzel}} = 0,19$
 \square }

l_2/d_1	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
0,67	○	○	○ ○ ○		
1,0			□ □		
1,5			●	●	●

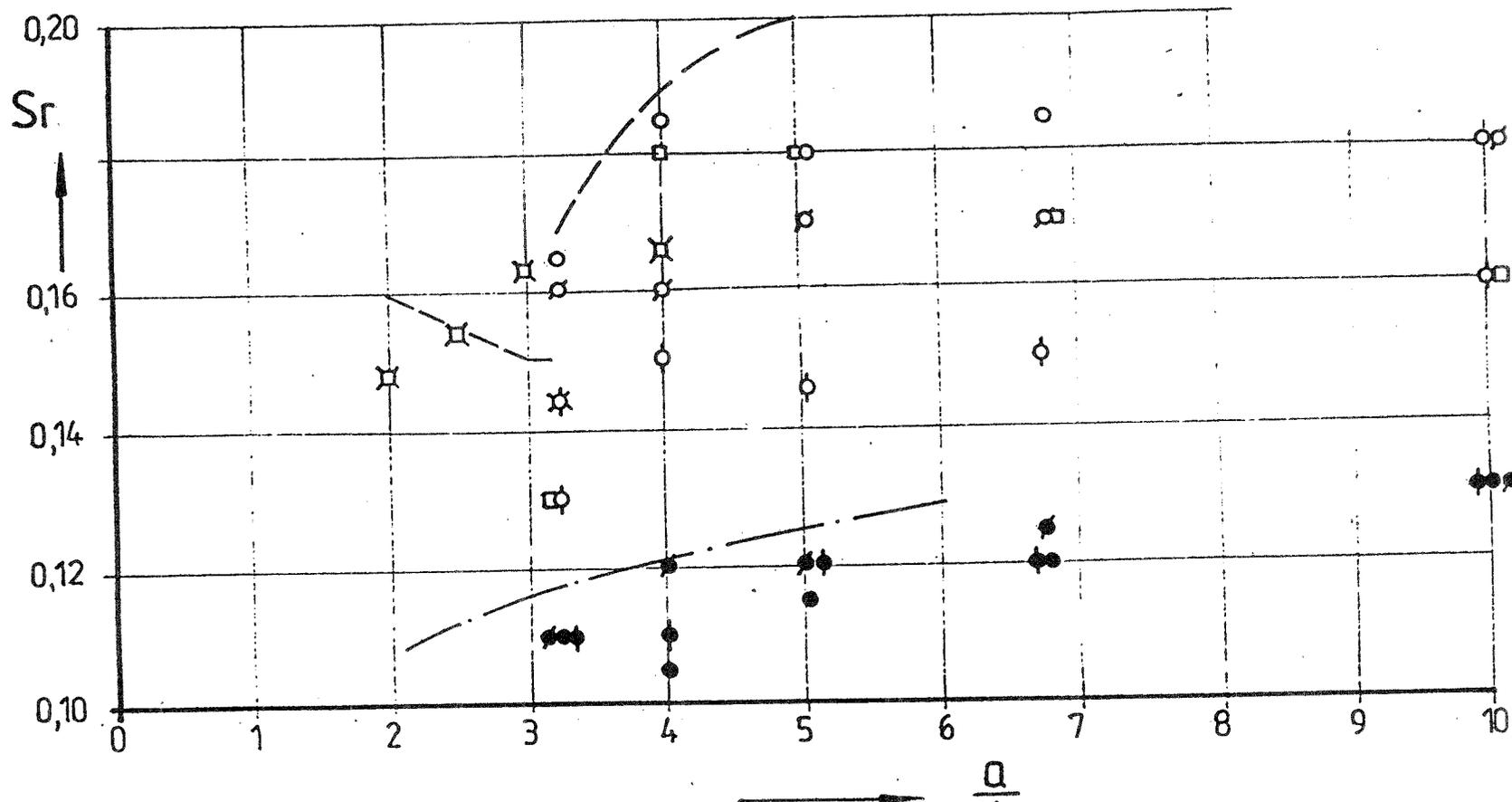
$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad m_{\nu} = 26 \quad \nu = 0,05$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,17$$

$$\text{--- Igarashi [8]} \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,0$$

$$Sr_{\text{Einzel}} = 0,205 \text{ (Druckverteilung)}$$

$$\text{--- Igarashi [12]} \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,49 \text{ (Druckverteilung)}$$



$\frac{l_1}{d_1} = 15$ $m_{\rho} = 26$ $\nu = 0,05$
 $S_{r\text{Einzel}} = 0,17$

$\frac{b_1}{d_1} \backslash \frac{d_2}{d_1}$	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
0,67	○	◊	◇		
1,0			□		
1,5			●	●	●

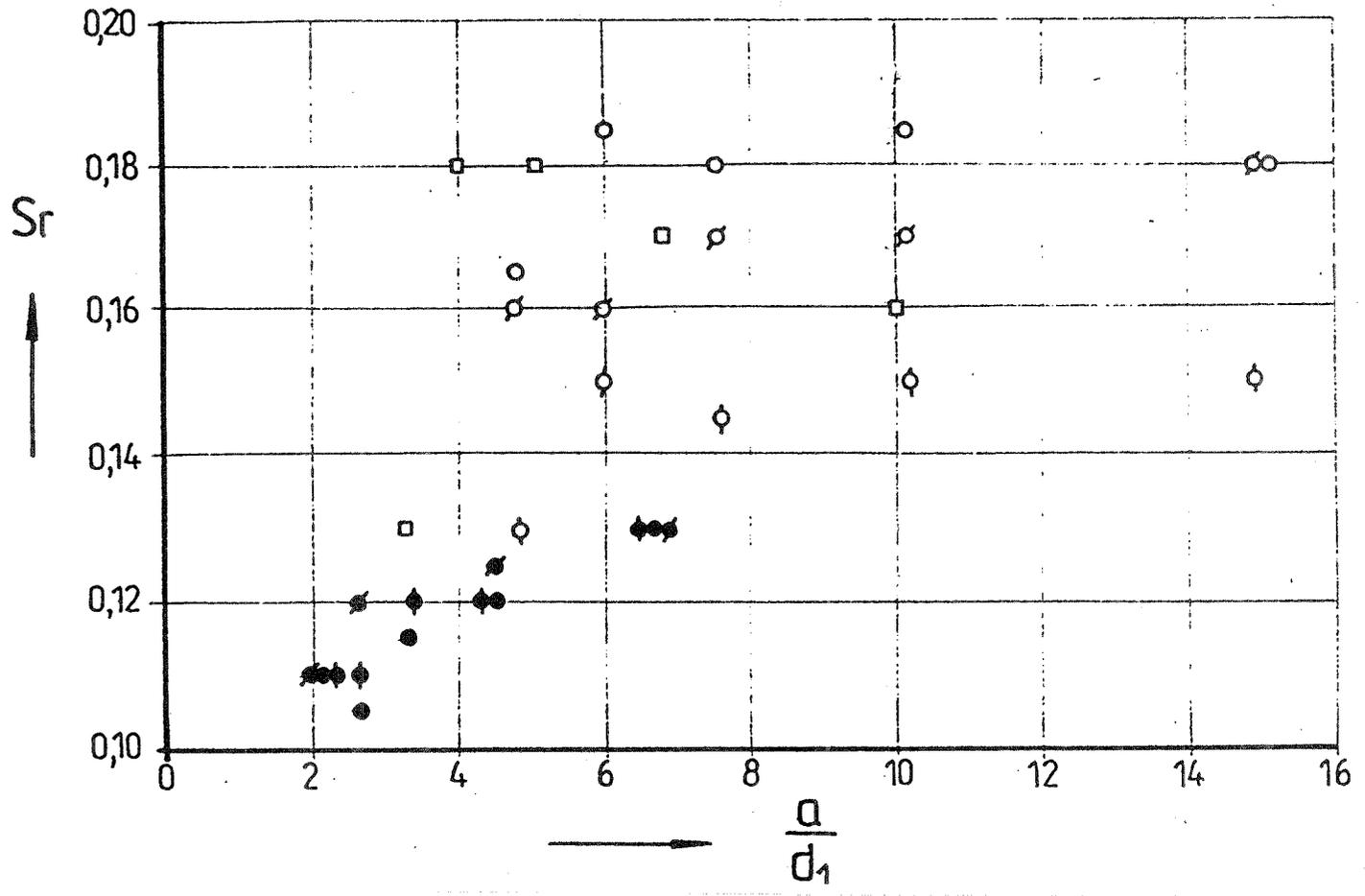


Abb. 25: Strouhalzahlen der Doppelanordnung bei $\beta = 0^\circ$

4.1.2 Kraftbeiwerte der Doppelanordnungen

Die maximal sich einstellenden Kraftbeiwerte streuen stark. Das ist physikalisch bedingt. Je kleiner die Beiwerte sind, um so stärker sind auch ihre zeitlichen Schwankungen.

Im Gegensatz zu den Strouhalzahlen ist eine Zuordnung der Beiwerte zu geometrischen Anordnungen viel schwieriger.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=1,0$ Abb. 26

Die Beiwerte sind im Mittel im ganzen Nachlaufgebiet größer als beim Einzelzylinder. Der maximale Wert $\tilde{c}_R=0,51$ bei $\beta=25^\circ$ und $a/d_1=3,25$ liegt in der Größenordnung des aus Druckverteilungen am Einzelzylinder ermittelten Wertes.

Zum Vergleich sind Querkraftbeiwerte nach Chen [4], wohl aus Druckverteilungsmessungen ermittelt (bei $\beta=0^\circ$), mit eingetragen. Ruschweyh [9] gibt für Doppelanordnungen an elastischen Kragzylindern ähnliche Werte an. Zu beachten ist allerdings, daß er kleinere Massendämpfungsparameter untersucht hat.

Es werden etwa die am Einzelzylinder maximal möglichen Beiwerte erreicht.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=0,67$ Abb. 27 bis 28

Für $l_2/l_1=0,5$ erhält man für große Abstände die niedrigeren Werte des Einzelzylinders. Bei $a/d_1 \approx 3,25$ nehmen sie merklich zu. Für kleinere Höhen treten vergleichsweise auch größere Beiwerte auf. Insbesondere ist das bei kleinen Abständen der Fall. Der maximale Beiwert $\tilde{c}_R \approx 0,60$ liegt wiederum in der Größenordnung des am Einzelzylinder maximal möglichen Wertes.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=1,5$ Abb. 30 bis 32

Bei kleiner Modellhöhe liegen die Beiwerte in der Größenordnung von denen des Einzelzylinders. Mit zunehmender Höhe nehmen die Beiwerte zu. Der maximale Beiwert $\tilde{c}_R \approx 0,75$ tritt bei dem kleinsten Abstand auf. An der Nachlaufgrenze treten zum Teil zwei Maximalwerte auf.

Weil eine Zuordnung zum Anströmwinkel kaum möglich ist, wurden die maximalen Beiwerte über dem Abstand aufgetragen und mit aus der Literatur entnommenen Werten verglichen (Abb. 33).

Für $a/d \geq 4,0$ lagen die Beiwerte bei $\tilde{c}_R < 0,40$. Für $a/d_2 < 4,0$ wird $\tilde{c}_R = 0,75$ erreicht. Die offenbar aus Druckverteilungen ermittelten Werte von Chen [4] liegen bei $\tilde{c}_Q < 0,60$. Igarashi [8,12] liegt in der gleichen Größenordnung. Der von Ruscheweyh [9] ermittelte Wert von $\tilde{c}_Q \approx 0,40$ am elastischen Kragzylinder ist einem kleineren Massendämpfungsparameter zuzuordnen.

Im Vergleich zu unseren Einzelzylindermessungen (kleinere Werte) liegen die Doppelzylinder durchweg höher, am höchsten für $a/d_1 < 4,0$. Ein kontinuierliches Ansteigen mit abnehmendem Abstand scheint nicht gegeben.

Die aus der Druckverteilung am Einzelzylinder ermittelten Werte werden an der Doppelanordnung kaum überschritten.

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,0 \quad \frac{l_2}{l_1} = 1,0$$

$$m_{\text{sp}} = 26 \quad \nu = 0,05$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders
 φ nach Chen [4]

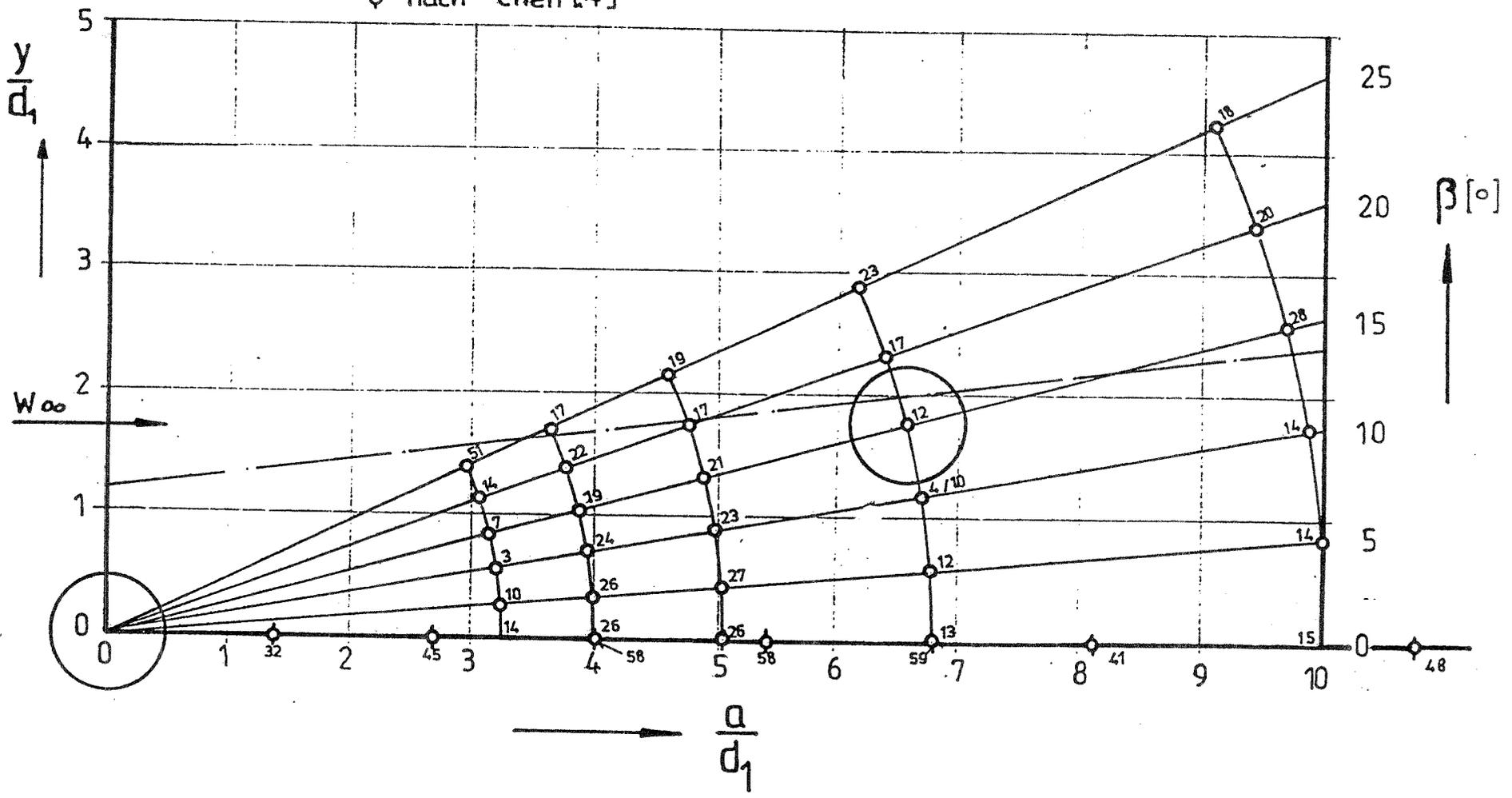
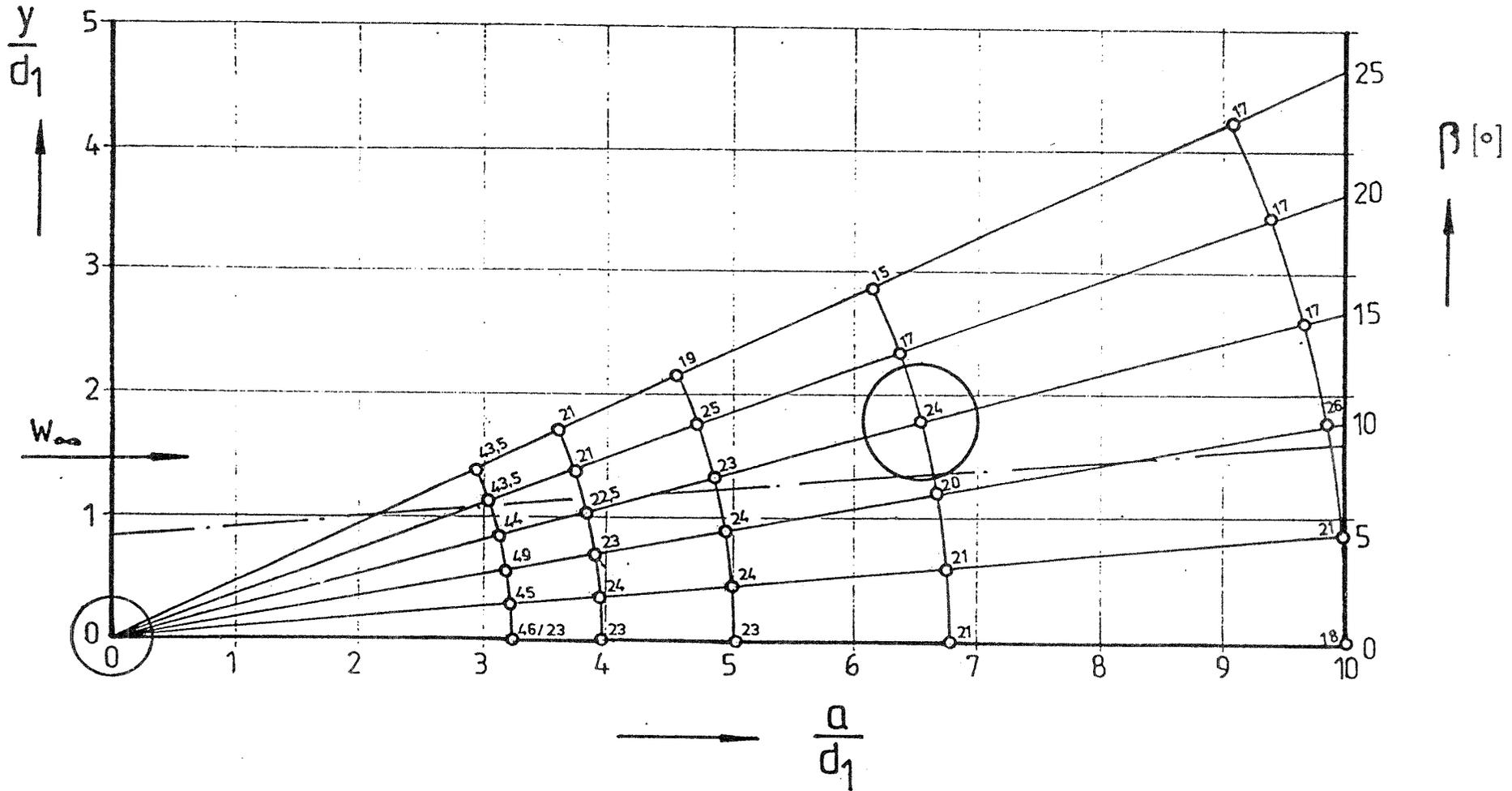


Abb. 26: Querkraftbeiwerte (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 0,67 \quad \frac{l_2}{l_1} = 0,5$$

$$m_{\gamma} = 26 \quad \nu^0 = 0,05$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders



$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 0,67 \quad \frac{l_2}{l_1} = 0,75$$

$$m_{\nu} = 26 \quad \nu = 0,05$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

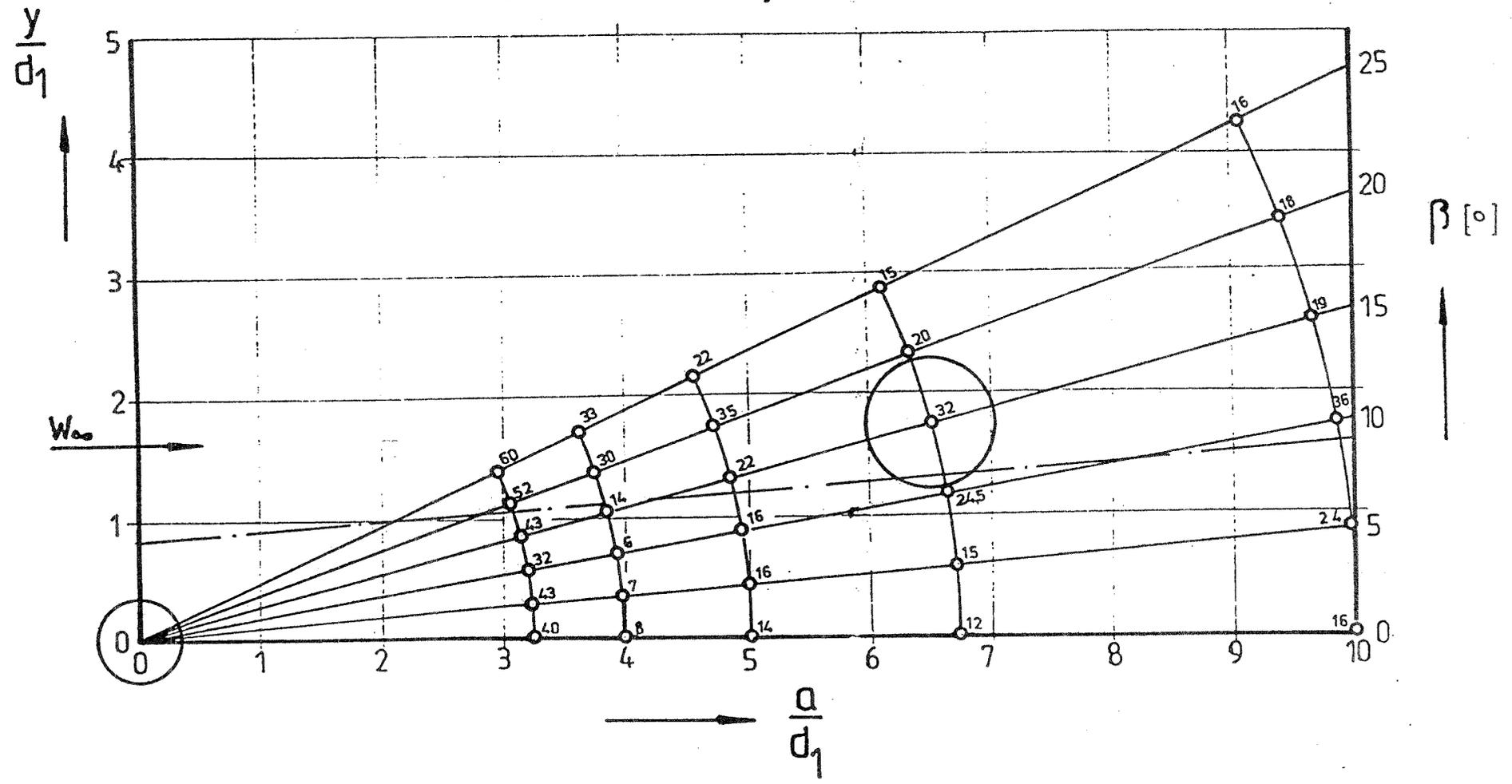


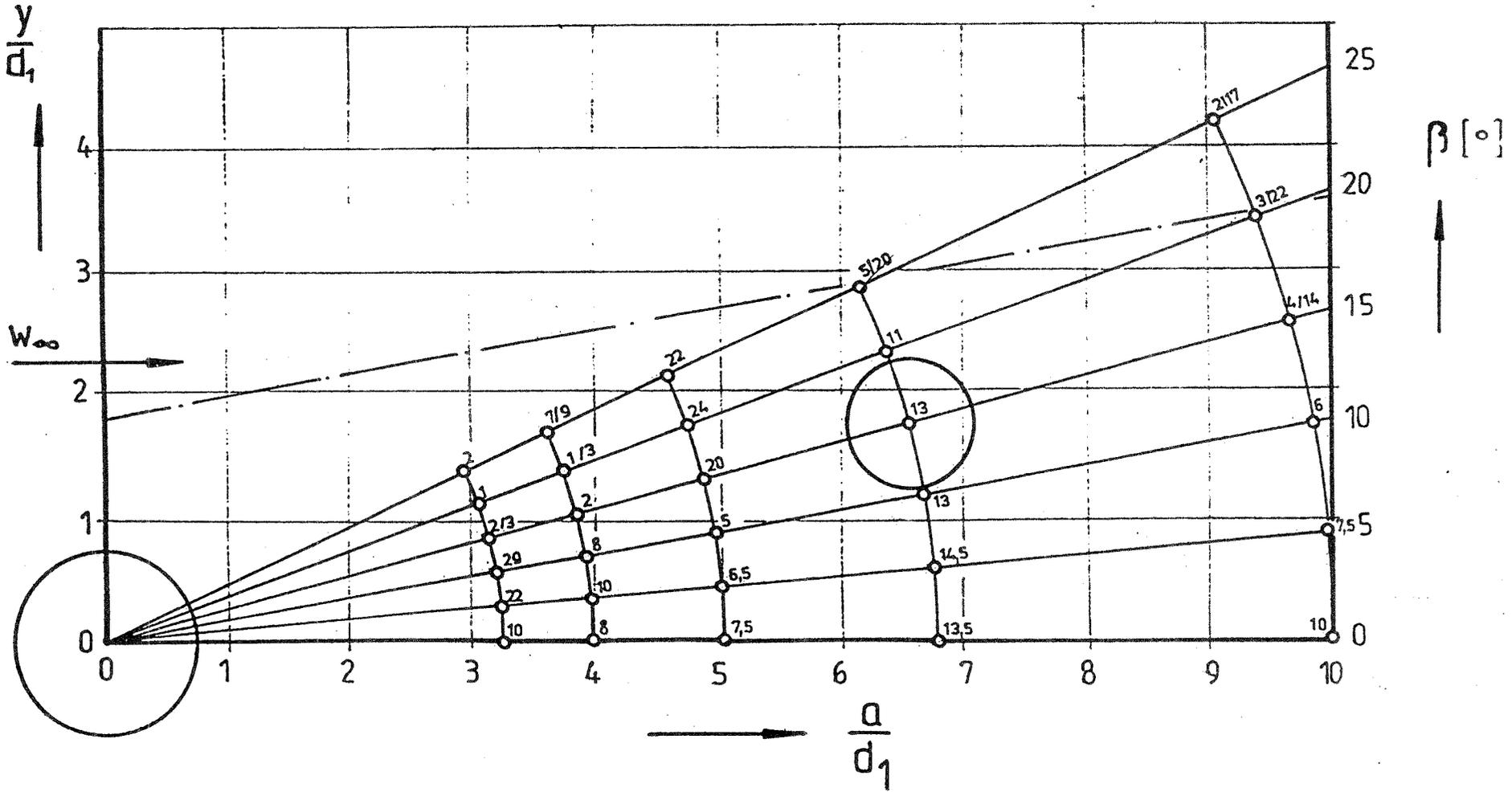
Abb. 28: Querkraftbeiwerte (*100) der Doppelanordnung

Abb. 30: Querkraftbeiwerte (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 10$$

$$m_{\nu} = 26 \quad \nu = 0,05$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders



$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 1,5$$

$$m_{\beta} = 26 \quad \nu = 0,05$$

— — — ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders

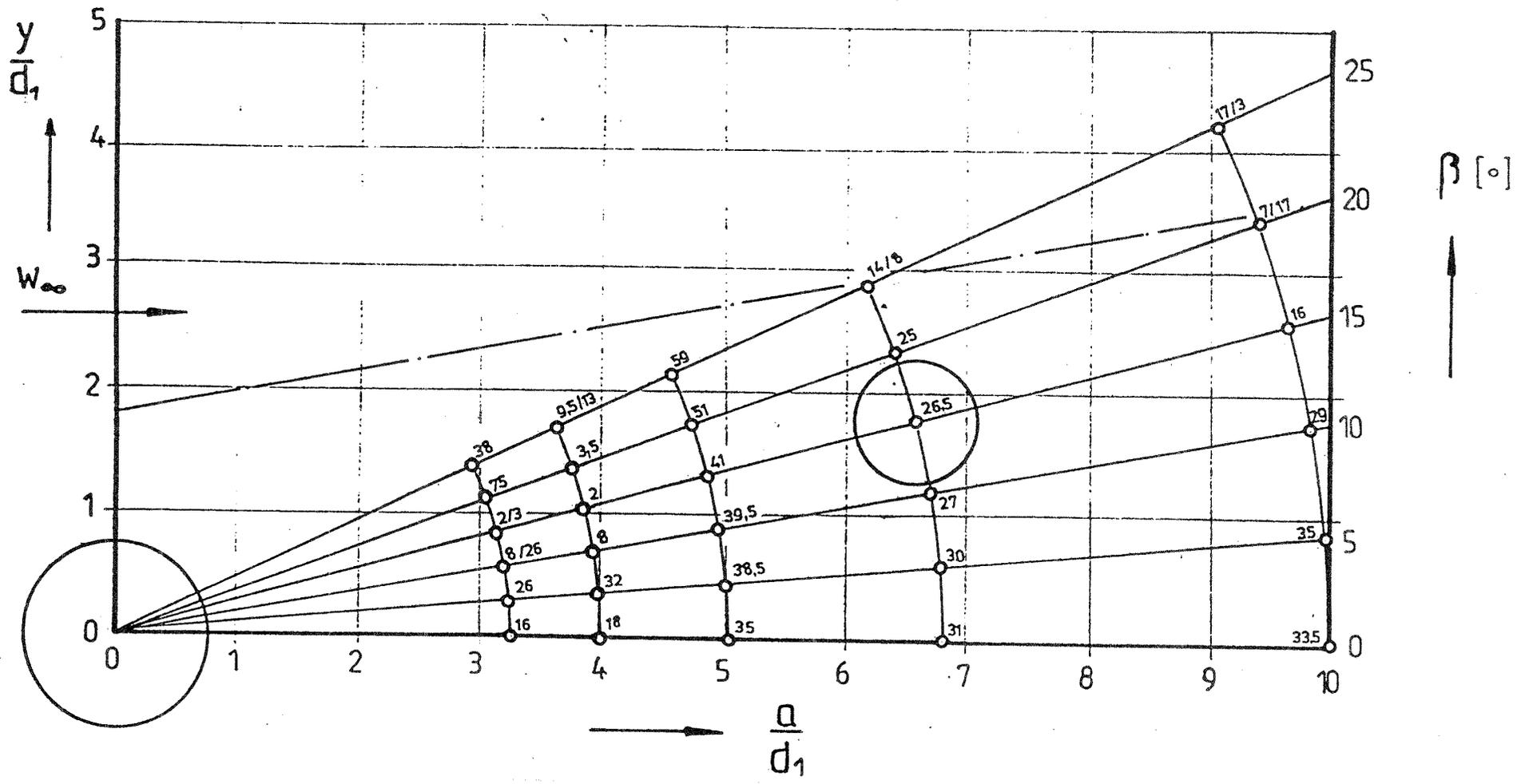


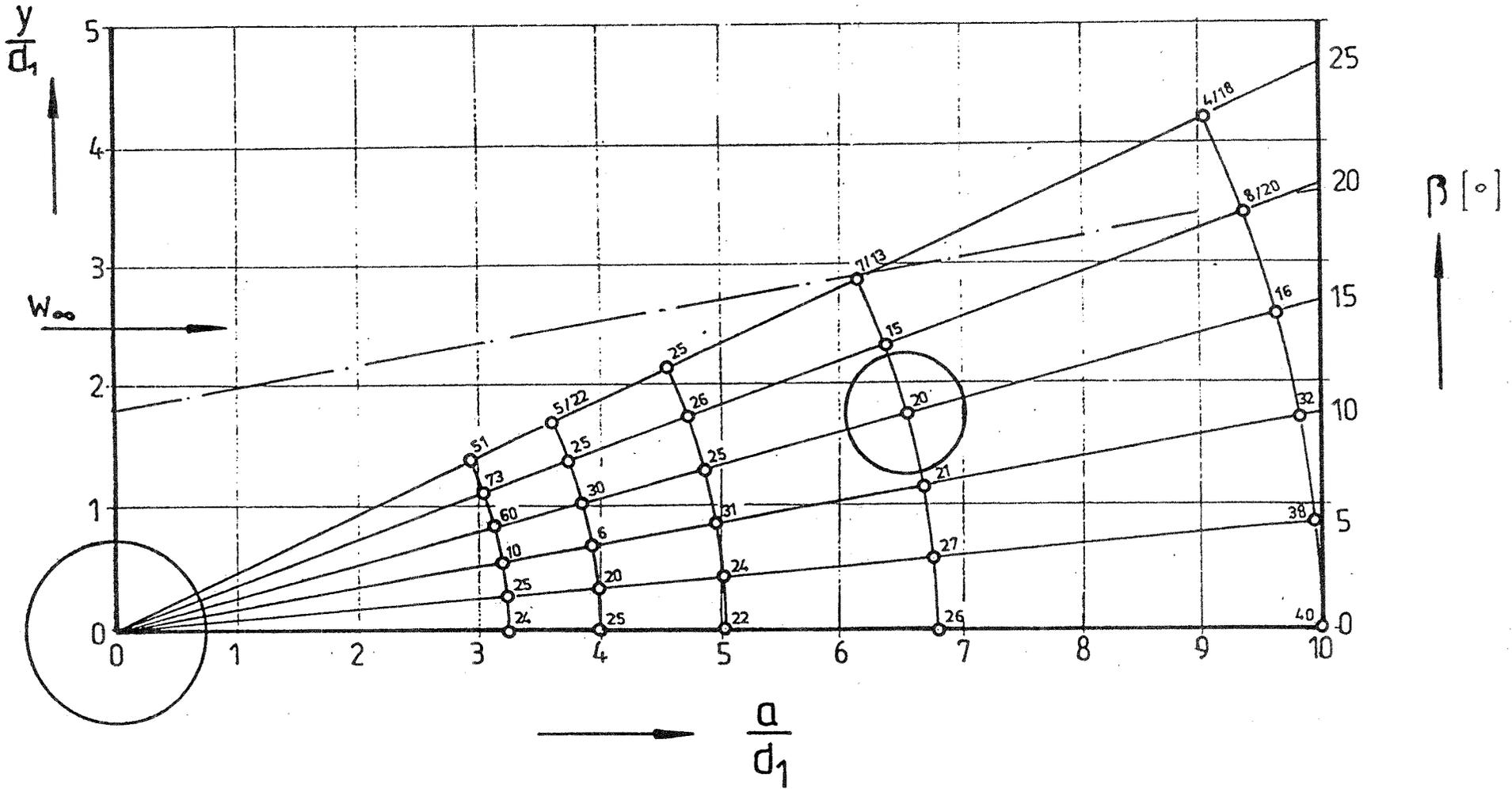
Abb. 31: Querkraftbeiwerte (*100) der Doppelanordnung

Abb. 32: Querkraftbeiwerte (*100) der Doppelanordnung

$$\frac{l_1}{d_1} = 15 \quad \frac{d_2}{d_1} = 1,5 \quad \frac{l_2}{l_1} = 2$$

$$m_{\beta} = 26 \quad \nu = 0,05$$

— ungefähre Grenze des ungestörten Gebietes des Einzelzylinders



$\frac{l_1/d_1}{d_2/d_1}$	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
0,67	○	⊙	⊕		
1,0			□		
1,5			●	⦿	⦿

$\frac{l_1}{d_1} = 15, \quad m_{\gamma} = 26, \quad \nu = 0,05$

$\Delta \frac{d_2}{d_1} = 1 \quad \text{Ruscheweyh [9]}$

$\nabla \frac{d_2}{d_1} = 1 \quad \text{Chen [4]}$

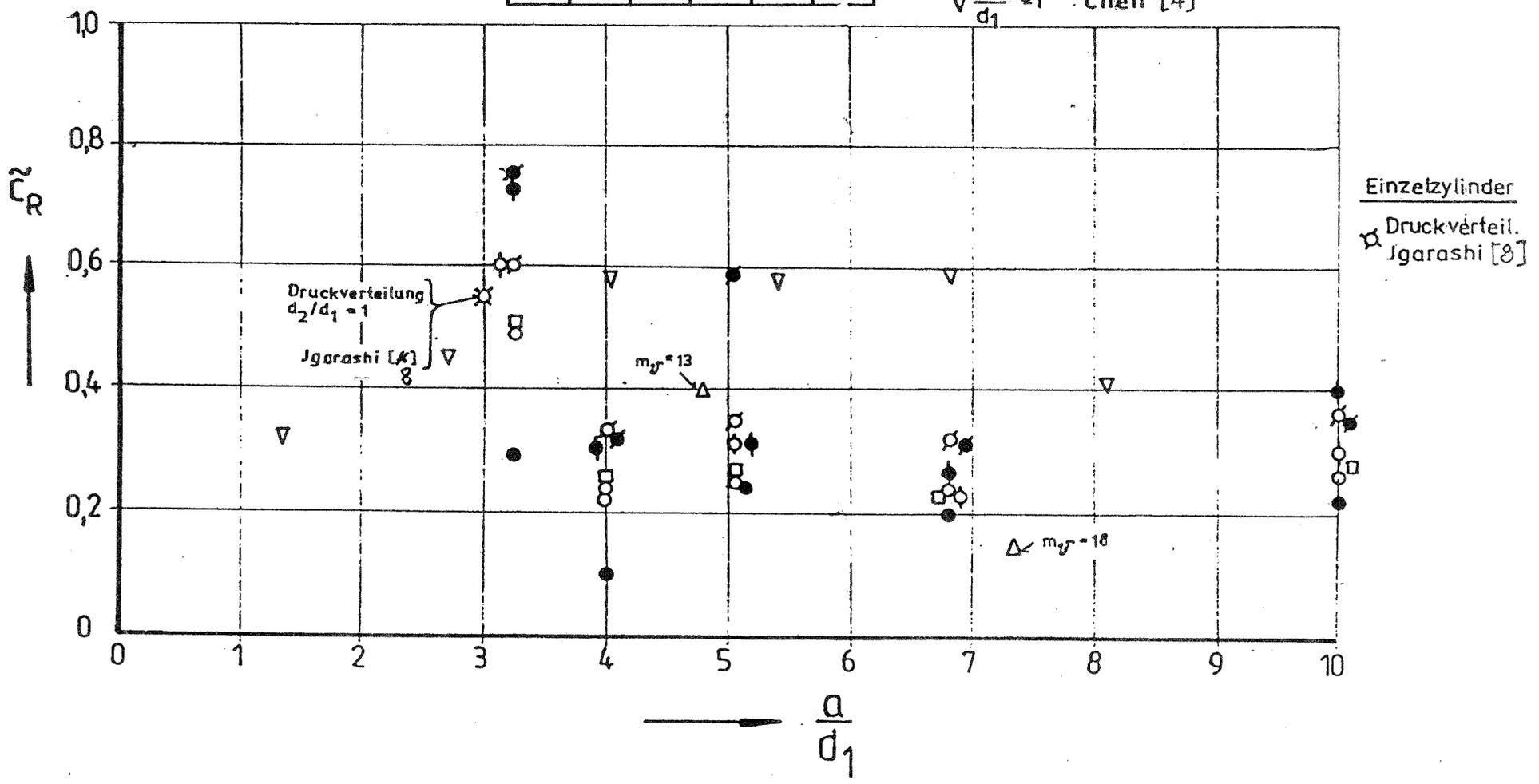


Abb. 33: Maximale resultierende Beiwerte für $0^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$

4.1.3 Modellauslenkungen

Aus den gemessenen Beanspruchungen und der Federkonstante des Modells erhält man die Effektivwerte der Auslenkungen. Die Beiwerte wurden über den bezogenen Auslenkungen aufgetragen. Als Bezugsgröße wurde die durchschnittliche Auslenkung des Einzelzylinders verwendet. Dabei gilt entsprechend dem zugrundegelegten Berechnungsmodell folgender Zusammenhang:

$$\tilde{\eta} \sim \frac{\tilde{c}_0}{m_g * S_r^2}$$

Weil der Massendämpfungsparameter konstant war, liegen die Beiwerte bei konstanter Strouhalzahl auf Geraden durch den Ursprung. Diese Auswertung ist für den Vergleich der Beanspruchungen geeignet. Zu diesem Zweck wurden die durchschnittlichen und maximalen Werte des Einzelzylinders eingetragen.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=1$ (Abb. 34)

Die durchschnittlichen Werte des Einzelzylinders werden unter- aber auch überschritten. Nur bei kleinen Zylinderabständen werden die maximalen Beanspruchungen des Einzelzylinders überschritten.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=0,67$ (Abb. 35 bis 37)

Hier gilt ähnliches wie oben. Allerdings ist das Überschreiten des maximalen Wertes des Einzelschornsteines bei kleinen Abständen der Doppelanordnung ausgeprägter. Beim Hinzufügen eines Schornsteines kleineren Durchmessers zu einem vorhandenen ist bei kleinen Abständen mit einer Vergrößerung der Lastannahmen für den bereits stehenden Schornstein zu rechnen.

Durchmesser Verhältnis $d_2/d_1=1,5$ (Abb. 38 bis 40)

Wegen der durchweg kleineren Strouhalzahl werden die mittleren Werte des Einzelschornsteines durchweg wesentlich überschritten.

Längenverhältnis $l_2/l_1 = 1,0$ (Abb. 38)

Die Auslenkungen liegen noch in der Größenordnung der maximalen Werte des Einzelschornsteins.

Längenverhältnis $l_2/l_1 = 1,5$ und $2,0$ (Abb. 39, 40)

Hier muß man damit rechnen, daß auch bei großen Abständen die maximalen Werte des Einzelschornsteins überschritten werden. Bei kleinen Abständen treten bis zu 5-fach größere Auslenkungen der maximalen Werte des Einzelschornsteines auf.

Eine Verkleinerung der unterkritisch gemessenen Beiwerte bei der Übertragung in den transkritischen Reynoldszahlbereich ist physikalisch begründbar.

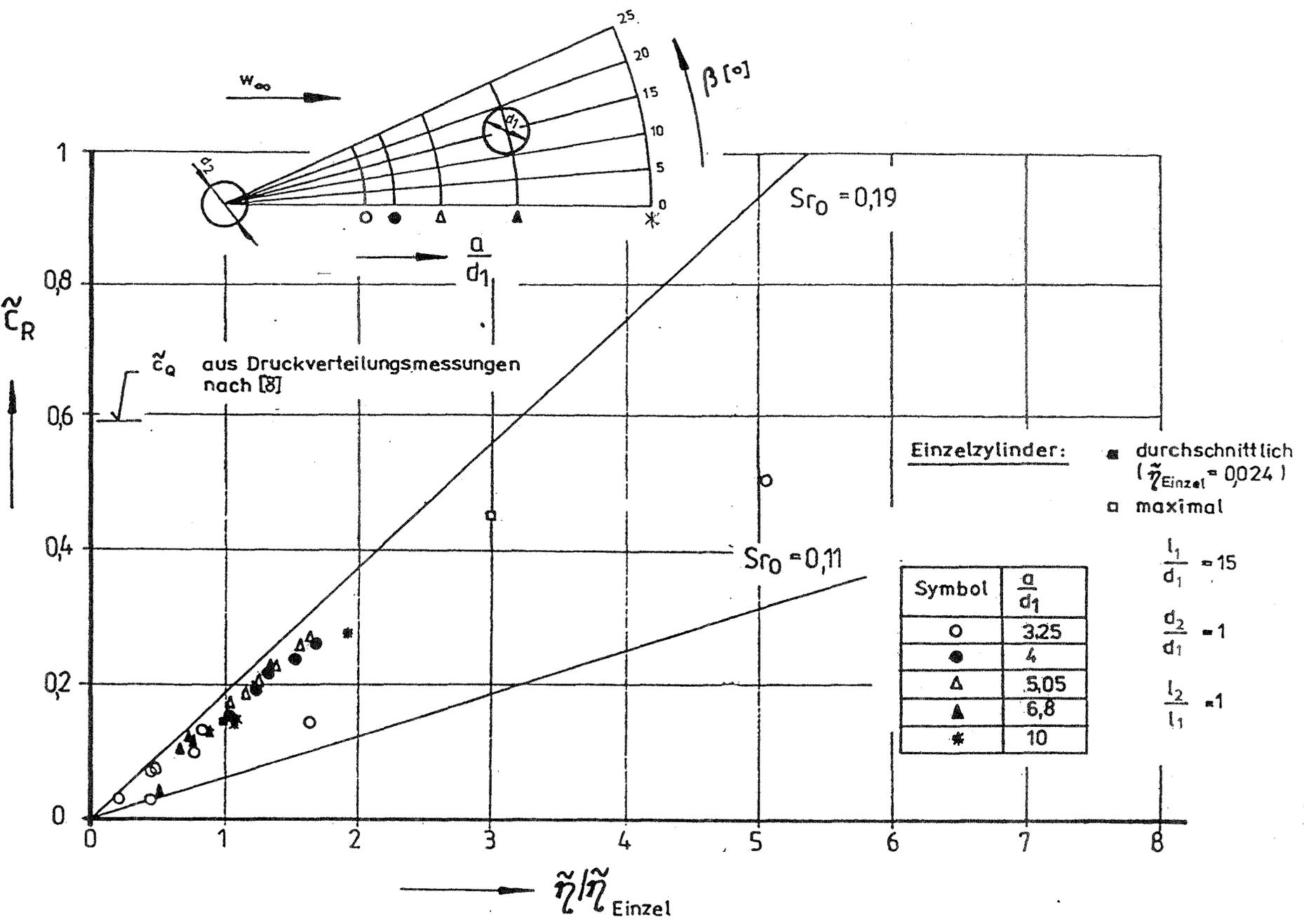


Abb. 34: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

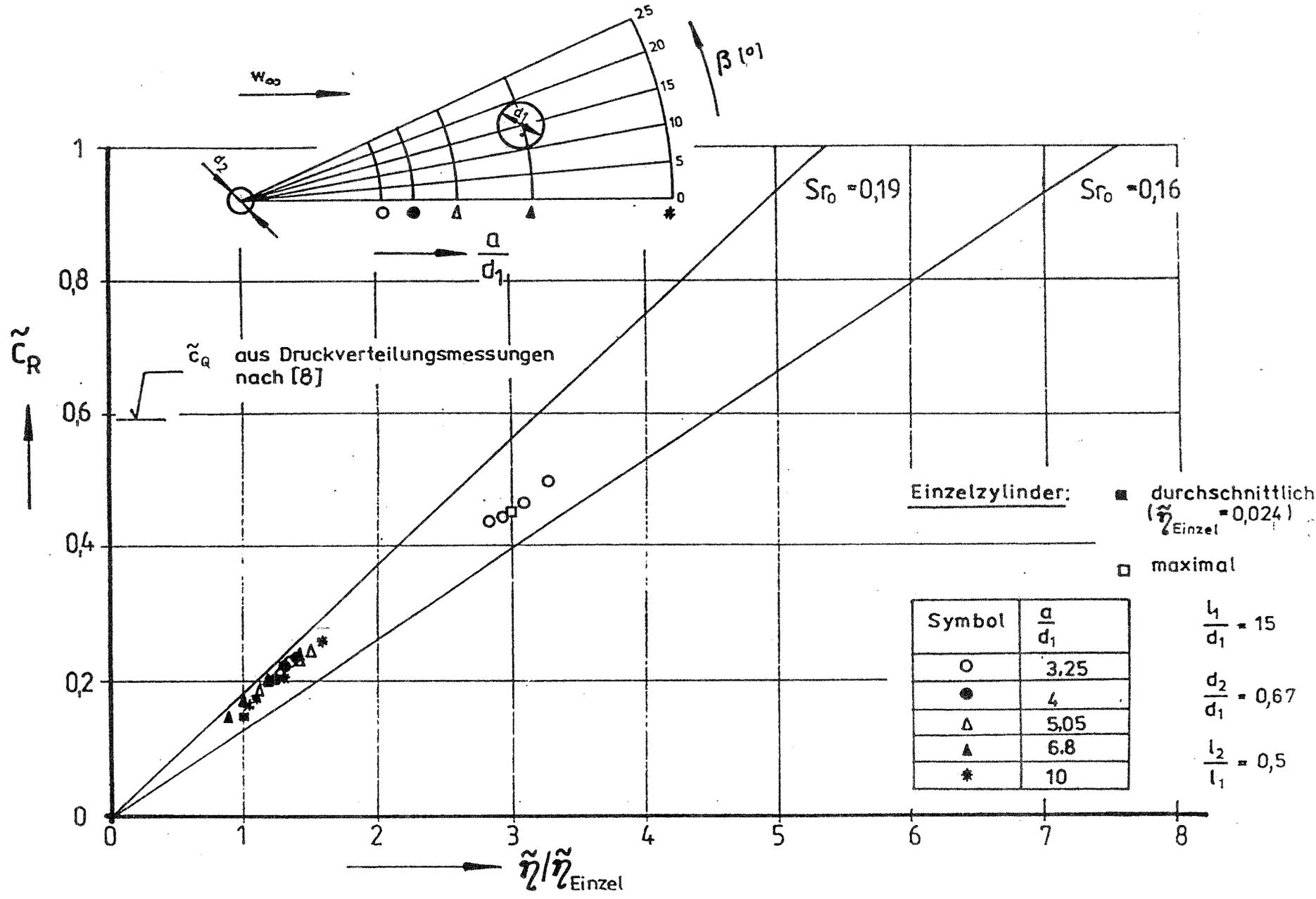


Abb.35: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

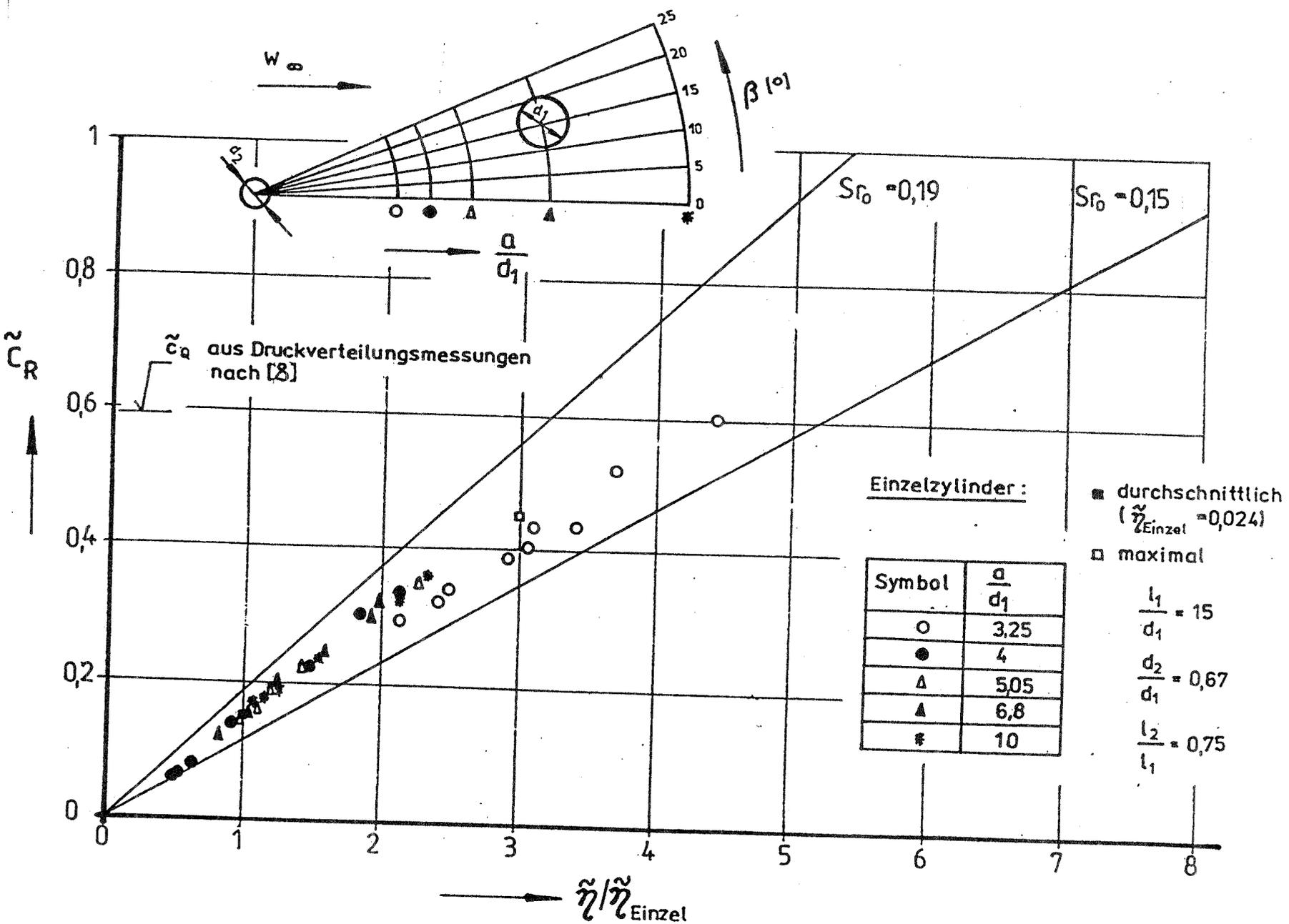


Abb. 36: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

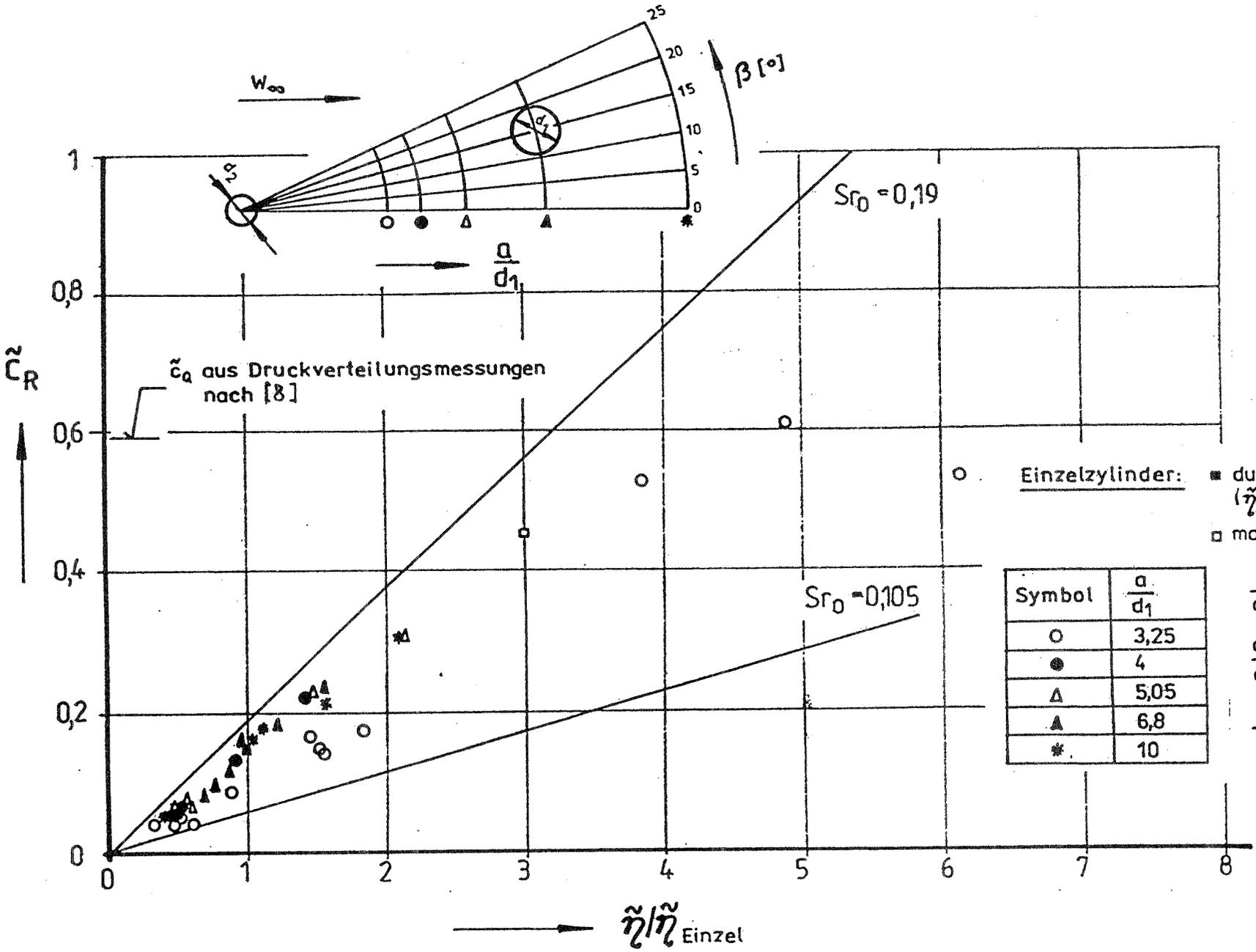


Abb. 37: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

Abb.38: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

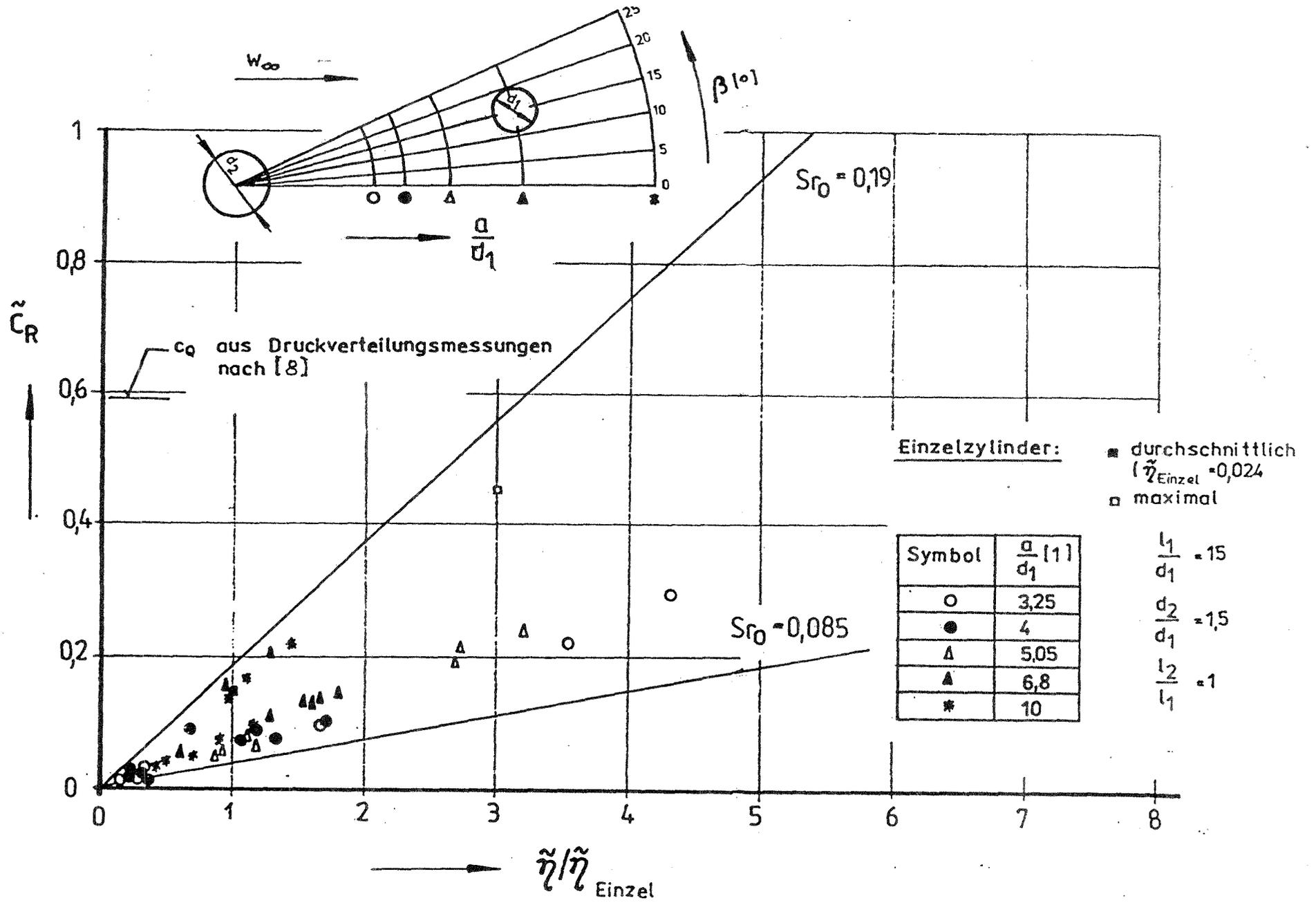
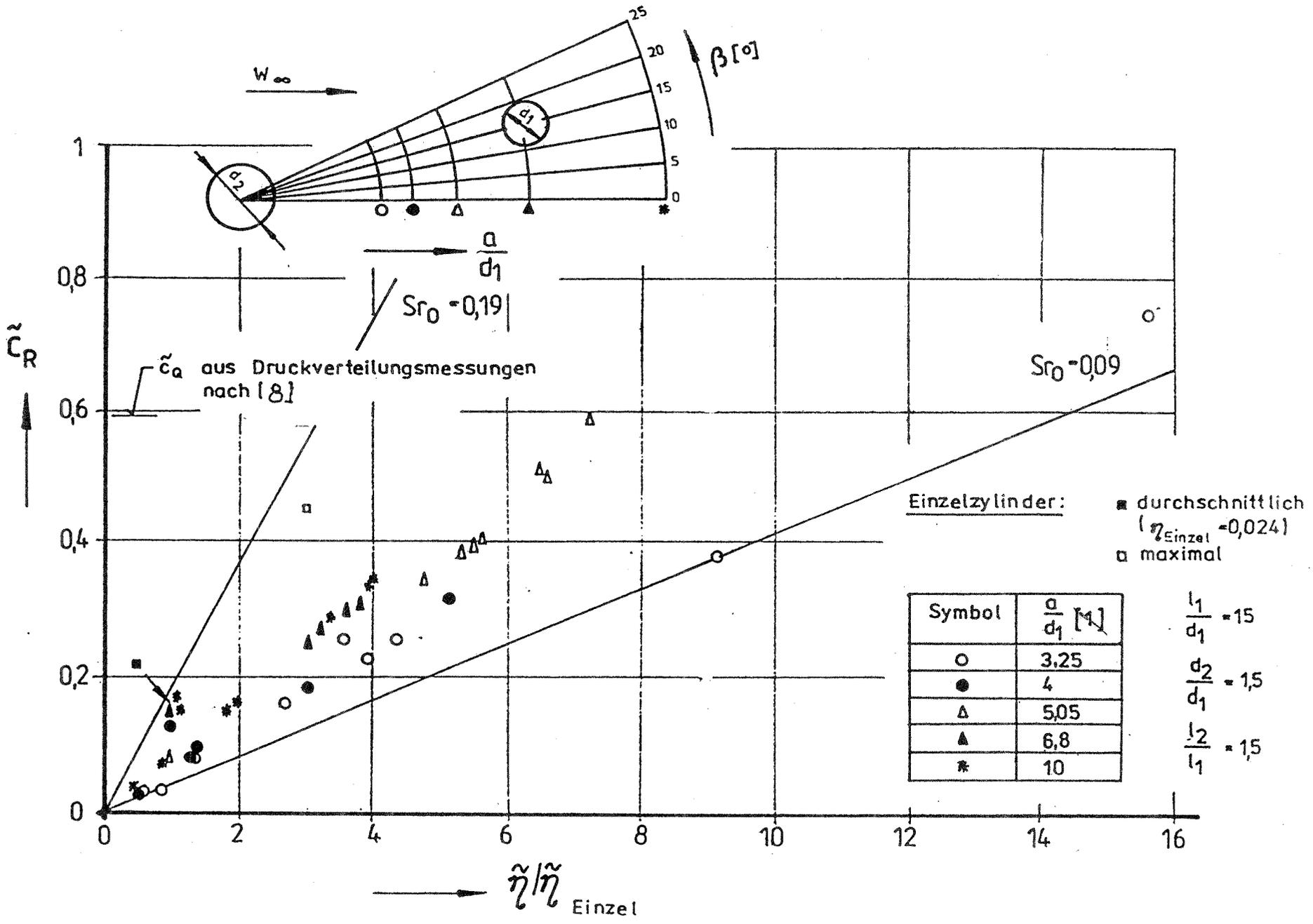


Abb. 39: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude



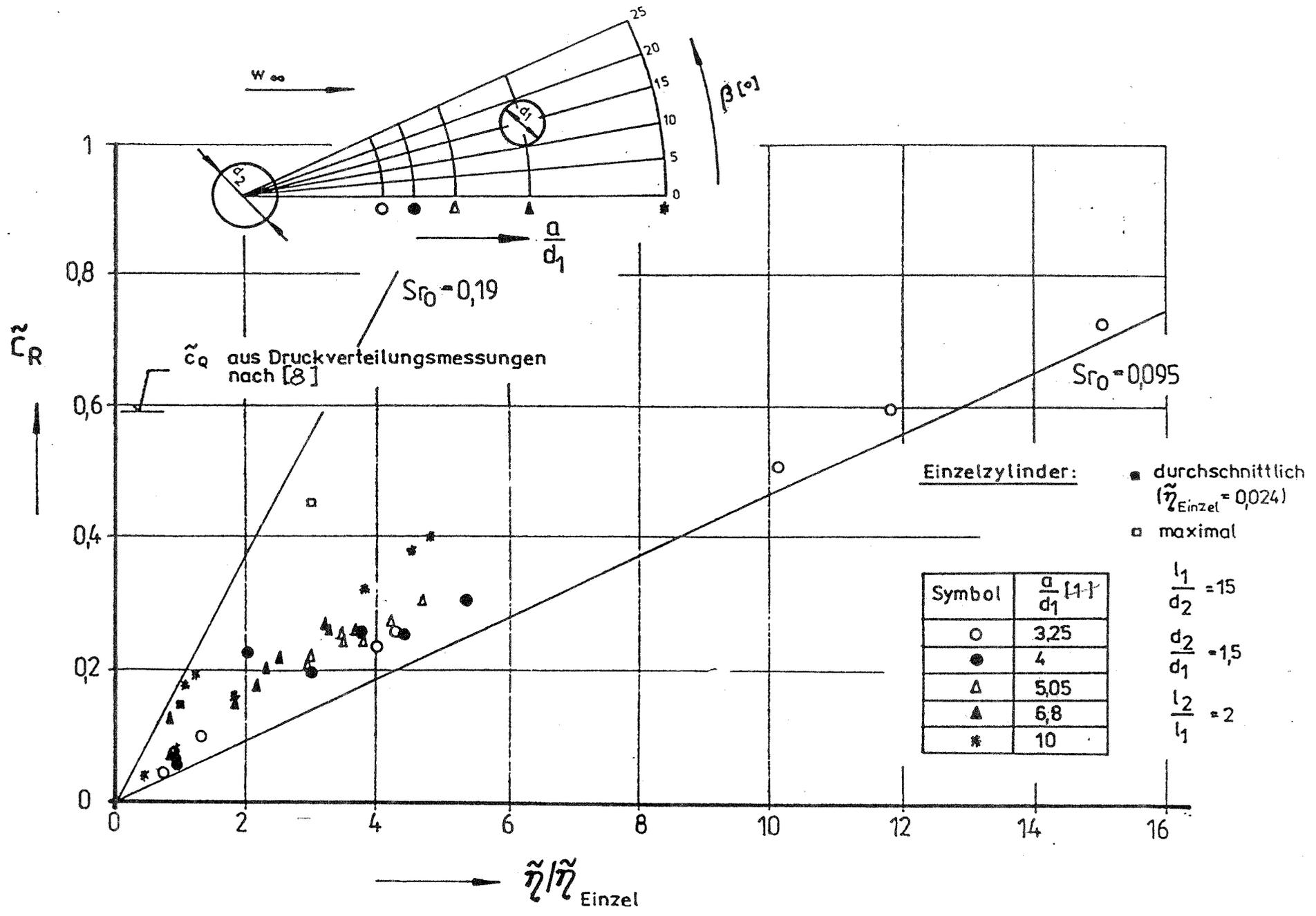


Abb. 40: Resultierende Kraftbeiwerte der Doppelanordnung in Abhängigkeit von der bezogenen Amplitude

4.2 Ergänzende Fließrinnenuntersuchungen

Zur Stützung und qualitativen Deutung der Windkanaluntersuchungen wurden Fließrinnenuntersuchungen durchgeführt. Die hier gemessenen Strouhalzahlen sind nur grobquantitativ übertragbar. Die Reynoldszahl ist mit $Re \approx 2 \cdot 10^4$ mit den Windkanaluntersuchungen vergleichbar. Im Windkanal wurden Modelle endlicher Streckung untersucht. In der Fließrinne ist die Streckung unendlich (oder nur idealisiert - Bodeneinfluß). Die Ergebnisse größerer Zylinderabstände sind wegen des zunehmenden Bodengrenzschichteneinflusses in der Fließrinne nicht übertragbar.

Die Strouhalzahl des Einzelzylinders ist $Sr_{\text{einzel}} \approx 0,19$

Doppelanordnung: $d_2/d_1=1, \beta=0^\circ$

Ausgeprägt ist die Tendenz, daß die Wirbelablösung am stromaufwärts liegenden Zylinder die Wirbelablösung am stromabwärts liegenden Zylinder steuert, daß die Frequenzen also übereinstimmen.

Für Abstände $a/d_1 > 4$ ist die Wirbelstraße hinter dem stromab liegenden Zylinder vergleichsweise wenig ausgeprägt. Wie ein Vergleich mit den Druckverteilungsmessungen von Igarashi [8] zeigt (große dynamische Drücke im vorderen Bereich des im schwankenden Nachstrom liegenden Zylinders), ist die schwankende Anströmung des im Nachstrom liegenden Zylinders für die Belastung verantwortlich.

Im Bereich $2,5 < a/d_1 < 3,5$ ändert sich, wie auch in der Literatur beschrieben [8], die Strömung qualitativ. Für $a/d_1 > 3,5$ bilden sich hinter beiden Zylindern Wirbelstraßen aus. Das Ablösegebiet ist hier breiter als der Nachstromzylinder. Im Intervall $2,5 < a/d_1 < 3,5$ legt sich die am ersten Zylinder ablösende Strömung am zweiten Zylinder an.

Doppelanordnung: $d_2/d_1=1, \beta \neq 0^\circ$

Die Ergebnisse sind in der Tabelle dargestellt

a/d ₁	β [°]	S _r	Bemerkungen
3,0	3,0	0,195	Wirbelabgang alternierend
3,0	9,5	0,17	paarweiser Wirbelabgang
2,0	30	0,13	Wirbelabgang alternierend
2,0	14	0,13	Wirbelabgang alternierend

In diesem Abstandsbereich der Zylinder wird auch für $\beta = 0^\circ$ der sprunghafte Abfall der Strouhalzahl bestätigt. Für $\beta > 15^\circ$ tritt der in der Anströmung liegende Zylinder aus dem Nachlauf heraus. Der Zylinderzwischenraum wird hier laminar durchströmt. Nur hinter dem Nachstrom-Zylinder bildet sich eine kräftige Wirbelstraße mit kleiner Strouhalzahl aus (Abb.20).

Doppelanordnung: $d_2/d_1=0,67, \beta=0^\circ$

Wenn vor einem Zylinder ein solcher kleineren Durchmessers angeordnet wird, dann sinkt die Strouhalzahl des im Nachlauf stehenden Zylinders (Abb.24, vergleichbare Längen). Das wird auch in der Fließrinne bestätigt.

Für $a/d_1=3,0$ erhält man $S_r=0,144$, bei $S_{r, \text{einzel}}=0,19$

5. Winkanaluntersuchungen mit Zweiergruppen (Massendämpfungsparameter $m_{\beta} \approx 63$) im mittleren Windkanal im unterkritischen Reynoldszahlbereich

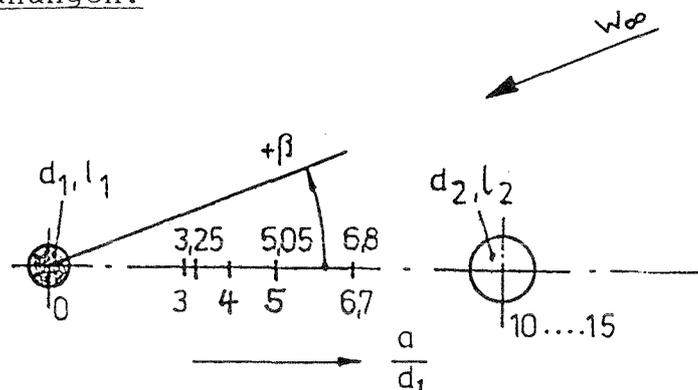
In diesem Abschnitt werden Windkanalmeßergebnisse von in Zweiergruppen angeordneten, unterkritisch umströmten Kreiszyklindern mit Massendämpfungsparametern $m_{\beta} \approx 63$ behandelt. Die meisten im Abschnitt 4 beschriebenen Varianten in Doppelanordnungen (Massendämpfungsparameter $m_{\beta} \approx 26$) wurden mit Massendämpfungsparametern $m_{\beta} \approx 63$ zusätzlich untersucht, so daß Aussagen über den Einfluß des Massendämpfungsparameters auf das Querschwingungsverhalten vorliegen.

Die Ergebnisse aller unterkritisch umströmten Kreiszylinder-Doppelanordnungen ($m_{\beta} = 26$ und 63) werden in Tabellenform dargestellt, und zwar:

- Strouhalzahl $Sr_0 = f_0 \cdot d_1 / w_{\infty}$ (ermittelt bei maximaler Kraft)
- Querkraftbeiwert \tilde{C}_Q (ermittelt aus dynamischer Beanspruchung, zugehörigem Resonanzstaudruck und Dämpfung)
- bezogene Auslenkung $\tilde{\eta}$ (ermittelt bei maximaler Kraft)

Nur die maximalen Auslenkungen werden in Diagrammform angegeben. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4 werden aus Gründen der Vergleichbarkeit nochmals wiedergegeben. Die nachstehende Abbildung zeigt die untersuchten Modellanordnungen.

Doppelanordnungen:



Die Abmessungen der Modelle und eine Übersicht über aller untersuchten Varianten der Doppelanordnungen enthalten die Tabellen 4 und 5.

Tabelle 4 Abmessungen

Meßzylinder: aus Glasfaserlaminat
Wandstärke 1,5 mm
 $d_1 = 30$ mm
 $l_1 = 450$ mm

Blendenzylinder:

d_2 [mm]	l_2 [mm]	Stahl	Stahlrohr	Holz
20	225	*		(*)
	337,5	*		(*)
	450	*		*
30	450	*		*
	675			*
45	450		*	(*)
	675		*	(*)
	900		*	*

Endscheiben: aus Sperrholz

für $d_{2,1} = 20, 30$ mm $\varnothing 90*1$ mm

für $d_2 = 45$ mm $\varnothing 120*1$ mm

Tabelle 5 Variantenübersicht "Doppelanordnungen"
(Varianten 1.1 bis 1.8)

Var.	$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{l_2}{l_1}$	f_0 [Hz]	\mathcal{D}	$m_{\mathcal{D}}$	$\frac{a}{d_1}$														
						3	3,25	4	5	5,05	6,7	6,8	10	12,5	15					
1.1	0,67	0,5	66,5	0,05	26		x	x	x		x	x								
1 1.2. 2	0,67	0,75	66,5 65,8	0,05 0,12	26 63		x	x	x		x	x								
1.3	0,67	1	66,5	0,05	26		x	x	x		x	x								
1 1.4. 2	1	1	66,5 65,8	0,05 0,12	26 63		x	x	x		x	x								
1.5	1	1,5	65,8	0,12	63		x	x	x											
1 1.6. 2	1,5	1	66,5 65,8	0,05 0,12	26 63			x	x	x		x	x							
1 1.7. 2	1,5	1,5	66,5 65,8	0,05 0,12	26 63			x	x	x		x	x							
1 1.8. 2	1,5	2	66,5 65,8	0,05 0,12	26 63			x	x	x		x	x							

5.1 Versuchsergebnisse der Doppelanordnungen

Die bereits im Abschnitt 4 enthaltenen Doppelanordnungen mit einem Massendämpfungsparameter $m_{\mathcal{D}} = 26$ werden in die folgende Auswertung insbesondere zum Vergleich der Anordnung mit dem höheren Massendämpfungsparameter $m_{\mathcal{D}} = 63$ mit aufgenommen.

5.1.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Doppelanordnungen

Variante 1.4.1 ($m_{\rho} = 26$) Abb. 45

$$d_2/d_1=1 \quad l_2/l_1=1 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen fast durchweg bei $0,16 < S_{r0} < 0,18$ wenig abweichend vom Einzelzylinder. Nur bei $a/d_1=3,25$ werden Werte von $S_{r0}=0,13; 0,14$ gemessen. In dieser Abstandsumgebung tritt eine qualitative Änderung des Strömungsnachlaufes auf. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,03 < \tilde{C}_Q < 0,28$. Nur bei $a/d_1=3,25$ tritt einmal bei $\beta=25^\circ$, $\tilde{C}_Q=0,51$ auf.

Variante 1.4.2 (wie oben, aber $m_{\rho} = 63$); Abb. 46 und 46a

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,16 < S_{r0} < 0,18$ wie oben. Bei $a/d_1=3$ tritt $S_{r0}=0,13; 0,14$ auf. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,02 < \tilde{C}_Q < 0,27$. Bei $a/d_1=3$ tritt $\tilde{C}_Q=0,41$ bei $\beta=35^\circ$ auf. Bei $\beta=90^\circ$ und 180° werden maximale Beanspruchungen nicht erreicht.

Die Beanspruchungen bei $a/d_1=12,5$ und $a/d_1=15$ liegen nur wenig unter denen von $a/d_1=10$ und entsprechen etwa denen am Einzelzylinder.

Variante 1.5 ($m_{\rho} = 63$); Abb. 47

$$d_2/d_1=1 \quad l_2/l_1=1,5 \quad 3 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,16 < S_{r0} < 0,19$ etwa wie oben. Bei $a/d_1=3$ tritt $S_{r0}=0,13 - 0,14$ auf. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,03 < \tilde{C}_Q < 0,57$.

Beachtenswert ist, daß die maximalen Werte hier in der Umgebung von $\beta=0^\circ$ auftreten. Der höchste Wert $\tilde{C}_Q=0,57$ wurde bei $\beta=0^\circ$ und $a/d_1=5$ ermittelt. Der in der Anströmung liegende höhere Zylinder verursacht größere Beanspruchungen am niedrigeren. In der Kopfumströmung ist der Wirbelabgang gestört. Den niedrigeren Zylinder treffen schon im oberen Bereich sich gleichmäßig ablösende Wirbel, die zu einer höheren Belastung führen.

Variante 1.3 ($m_{\text{g}} = 26$); Abb. 44

$$d_2/d_1 = 0,67 \quad l_2/l_1 = 1 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,11 < S_{r0} < 0,18$ zunehmend mit dem Zylinderabstand. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,04 < \tilde{c}_q < 0,60$, wobei die größeren Werte bei $a/d_1 = 3,25$ auftreten.

Variante 1.1 ($m_{\text{g}} = 26$); Abb. 41

$$d_2/d_1 = 0,67 \quad l_2/l_1 = 0,5 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,165 < S_{r0} < 0,185$ etwa wie beim Einzelzylinder. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,15 < \tilde{c}_q < 0,49$, wobei die größten Werte bei $a/d_1 = 3,25$ auftreten.

Variante 1.2.1 ($m_{\text{g}} = 0,26$); Abb. 42

$$d_2/d_1 = 0,67 \quad l_2/l_1 = 0,75 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,15 < S_{r0} < 0,18$ passend zur Höhentendenz. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,06 < \tilde{c}_q < 0,60$. Die größten Werte treten wieder bei $a/d_1 = 3,25$ und $\beta = 25^\circ$ auf. Bei $a/d_1 = 4$ gibt es die Tendenz zu kleinen Werten, sonst treten im gesamten Untersuchungsbereich auch bei $a/d_1 = 10$ recht hohe Werte auf.

Variante 1.2.2 (wie oben, aber $m_{\text{g}} = 63$); Abb. 43

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,17 < S_{r0} < 0,18$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,03 < \tilde{c}_q < 0,54$. Damit liegen die maximalen \tilde{c}_q/S_{r0}^2 -Werte im Bereich $4 < a/d_1 < 10$ hier höher als oben. Der Massendämpfungsparameter beeinflusst die Kennzahlen S_{r0} und \tilde{c}_q .

Variante 1.6.1 ($m_{\text{g}} = 26$); Abb. 48

$$d_2/d_1 = 1,5 \quad l_2/l_1 = 1 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen durchweg zwischen $0,105 < S_{r0} < 0,13$.

Der Zylinder kleineren Durchmessers liegt voll im Nachlauf mit vergleichsweise kleinerer Geschwindigkeit. Die Wirbelablösung am großen Zylinder steuert die schwankende Strömung am folgenden Zylinder. Es wäre sinnvoller, die Strouhalzahl auf d_2 zu beziehen, weil sie dann eher mit denen bei $d_1/d_2=1$ übereinstimmen. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,01 < \tilde{C}_Q < 0,29$ und sind relativ klein.

Variante 1.6.2 (wie oben, aber $m_{\Delta} = 63$); Abb. 49

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,10 < S_{r_0} < 0,12$. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,30$. Die Tendenz, daß die maximalen Beanspruchungen in der Umgebung der Anströmrichtung $\beta=0^\circ$ liegen, ist vorhanden.

Auch hier ist es sinnvoller, die Strouhalzahlen und die Zylinderabstände auf den größeren Durchmesser d_2 zu beziehen, weil Erregerfrequenzen und Nachlaufwirbelabmessungen von diesem bestimmt werden.

Variante 1.7.1 ($m_{\Delta} = 26$); Abb. 50

$$d_2/d_1 = 1,5 \quad l_2/l_1 = 1,5 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,09 < S_{r_0} < 0,13$. Erst wenn der im Nachstrom befindliche Zylinder aus dem Nachlauf austritt, steigen die Strouhalzahlen auf den Wert des Einzelzylinders an. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,02 < \tilde{C}_Q < 0,75$. Auffällig ist die Spitze bei $a/d_1=5$. Beachtenswert sind die mit der Höhe des Blendenzylinders zunehmenden Werte, was schon oben erläutert wurde.

Variante 1.7.2. (wie oben, aber mit $m_{\Delta} = 63$); Abb. 51

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,10 < S_{r_0} < 0,13$. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,08 < \tilde{C}_Q < 0,45$, wobei insbesondere bei $a/d_1=5$ über das gesamte Wirbelintervall hohe Beiwerte verteilt sind. Die Spitze bei dem Abstand $a/d_1=5$ ist weniger ausgeprägt als bei dem kleineren Massendämpfungsparameter.

Variante 1.8.1 ($m_{\text{eff}} = 26$); Abb. 52

$$d_2/d_1 = 1,5 \quad l_2/l_1 = 2 \quad 3,25 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 25^\circ$$

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,11 < S_{r0} < 0,13$. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,02 < \tilde{c}_q < 0,73$. Bei $a/d_1 = 5$ liegen relativ hohe Werte über den gesamten Winkelbereich, aber es tritt keine Spitze mehr auf.

Variante 1.8.2 (wie oben, aber $m_{\text{eff}} = 63$); Abb. 53

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,10 < S_{r0} < 0,13$. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,06 < \tilde{c}_q < 0,45$. Bei $a/d_1 = 5$ tritt keine Spitze mehr auf.

Das Durchmesser Verhältnis der beiden Zylinder bestimmt also die Strouhalzahl. Wenn die Zylinderhöhe $l_2 > l_1$ ist, wird der im Nachstrom stehende Zylinder von gleichmäßiger abgehenden Wirbeln getroffen, die nicht durch die Kopfströmung gestört werden. Die Wirbelablösung des im Nachlauf stehenden Zylinders wird zumindest für nicht zu kleine Zylinderabstände durch den vorderen Zylinder gesteuert. Die strömungsmechanisch ähnlichen Zylinderabstände werden bei $d_2 > d_1$ durch den Durchmesser des größeren im Anstrom befindlichen Zylinders bestimmt. Die bezogenen Zylinderabstände sind also vergleichsweise kleiner.

5.1.2 Modellauslenkungen

Für eine lineare Eigenform ergibt sich die bezogene Auslenkung des Zylinders zu:

$$\tilde{\eta} = \tilde{y}/d_1$$

Die Auslenkungen des Modellzylinders sind die Grundlage zur Festlegung der maximal möglichen Beanspruchungen ($\tilde{\eta} \sim \tilde{c}_q/S_{r0}^2$). In den Abb. 54 und 55 sind die bezogenen Auslenkungen $\tilde{\eta}$ für alle untersuchten Doppelanordnungen über dem Abstandsverhältnis a/d_1 aufgetragen.

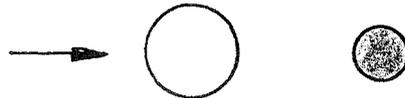
Maximale Beanspruchungen treten in der Regel nur auf, wenn sich der Meßzylinder im turbulenten Nachlauf des stromaufwärts liegenden Zylinders befindet oder wenn er in der Nähe des Nachlaufes angeordnet ist, wo seine Umströmung nicht stabil ist oder sein Nachlauf durch den Nachlauf der vor ihm stehenden Blende beeinflusst wird (seine Wirbelablösung wird gesteuert). Die Lage der maximalen Beanspruchung (kritische Windrichtung) wird auch durch den Massendämpfungsparameter beeinflusst. Auf Abb. 54 sind die maximalen bezogenen Auslenkungen der Doppelanordnungen aufgetragen.

$d_1 = d_2$ und $d_1 > d_2$



Der Einfluß des Massendämpfungsparameters ist zum Teil vorhanden. Eine höhere Blende bewirkt größere Beanspruchungen. Der Meßzylinder liegt nicht in der störenden Kopfumströmung der Blende.

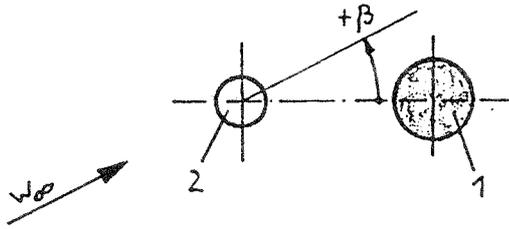
$d_1 < d_2$



Auch hier nimmt mit der Höhe der Blende die Beanspruchung zu. Der Einfluß des Massendämpfungsparameters m_0 ist ausgeprägt. Höhere Massendämpfungsparameter ergeben größere Querkraftbeiwerte. Die vergleichsweise großen Beanspruchungen resultieren aber nicht nur aus den größeren Höhen der Blendenzylinder, sondern vor allem aus dem unterschiedlichen Durchmesser Verhältnis. Es treten durchweg kleinere Strouhalzahlen auf, die durch kleinere Grundgeschwindigkeiten im Nachlauf und durch die kleinere Wirbelablösefrequenz am dickeren Zylinder verursacht werden.

Abb.41: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.1):

=====



Parameter:

$f_a = 66.5 \text{ Hz}$
$\nu = 0.05$
$m_{\nu} = 26$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 0.67$

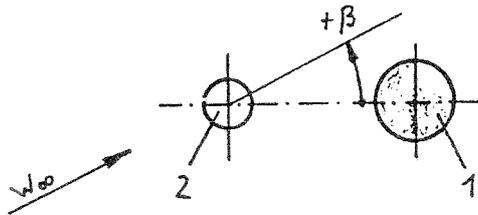
$l_2/l_1 = 0.5$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\alpha_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	α_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.166	0.46	0.074	0.078
	5	0.166	0.45	0.072	
	10	0.167	0.49	0.078	
	15	0.167	0.44	0.071	
	20	0.168	0.43	0.068	
	25	0.168	0.44	0.068	
4	0	0.183	0.23	0.032	0.033
	5	0.183	0.24	0.033	
	10	0.184	0.23	0.031	
	15	0.183	0.23	0.031	
	20	0.183	0.21	0.029	
	25	0.184	0.21	0.029	
5.05	0	0.179	0.23	0.033	0.036
	5	0.179	0.24	0.034	
	10	0.179	0.24	0.034	
	15	0.179	0.23	0.033	
	20	0.177	0.25	0.036	
	25	0.179	0.19	0.027	
6.8	0	0.183	0.21	0.029	0.034
	5	0.184	0.21	0.028	
	10	0.182	0.20	0.028	
	15	0.181	0.24	0.034	
	20	0.180	0.17	0.024	
	25	0.180	0.15	0.021	
10	0	0.178	0.18	0.026	0.038
	5	0.177	0.21	0.031	
	10	0.177	0.26	0.038	
	15	0.177	0.17	0.024	
	20	0.175	0.17	0.025	
	25	0.175	0.17	0.025	

Abb.42: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.2.1):

=====



Parameter:

$f_a = 66.5 \text{ Hz}$
$\nu = 0.05$
$m_\nu = 26$

$l_1/d_1 = 15$

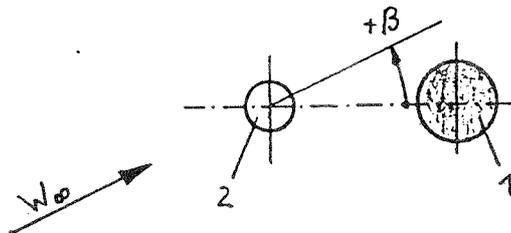
$d_2/d_1 = 0.67$

$l_2/l_1 = 0.75$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\xi_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.156	0.40	0.073	0.107
	5	0.154	0.43	0.082	
	10	0.156	0.32	0.058	
	15	0.160	0.43	0.075	
	20	0.161	0.52	0.089	
	25	0.158	0.60	0.107	
4	0	0.160	0.08	0.015	0.051
	5	0.159	0.07	0.012	
	10	0.156	0.06	0.012	
	15	0.171	0.14	0.022	
	20	0.177	0.30	0.044	
	25	0.173	0.33	0.051	
5.05	0	0.166	0.14	0.024	0.054
	5	0.168	0.16	0.026	
	10	0.169	0.16	0.026	
	15	0.172	0.22	0.034	
	20	0.172	0.35	0.054	
	25	0.172	0.22	0.035	
6.8	0	0.169	0.12	0.019	0.048
	5	0.170	0.16	0.025	
	10	0.173	0.24	0.038	
	15	0.176	0.32	0.048	
	20	0.178	0.20	0.030	
	25	0.175	0.15	0.023	
10	0	0.178	0.16	0.024	0.056
	5	0.174	0.24	0.037	
	10	0.174	0.36	0.056	
	15	0.172	0.19	0.029	
	20	0.172	0.18	0.028	
	25	0.172	0.16	0.026	

Abb.43: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.2.2):
=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
$\nu = 0.12$
$m_p = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 0.67$

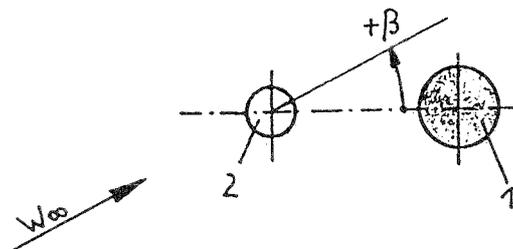
$l_2/l_1 = 0.75$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179$ $\xi_0 = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d ₁	β [°]	Sr_0	ξ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.169	0.03	0.002	0.020
	5-20	0.174	0.04	0.002	
	25	0.169	0.07	0.004	
	30	0.177	0.20	0.012	
	35	0.178	0.22	0.013	
	40	0.177	0.28	0.017	
	50	0.178	0.33	0.020	
	60	0.178	0.29	0.017	
	70	0.180	0.23	0.013	
	80	0.179	0.11	0.007	
	90	0.181	0.08	0.004	
180	0.169	0.13	0.009		
4	0	0.169	0.03	0.002	0.033
	5	0.165	0.03	0.002	
	10	0.164	0.04	0.003	
	15	0.180	0.07	0.004	
	20	0.174	0.25	0.015	
	25	0.176	0.54	0.033	
	30	0.181	0.15	0.009	
	90	0.187	0.09	0.005	
180	0.172	0.24	0.015		
5	0	0.171	0.04	0.003	0.033
	5	0.171	0.05	0.003	
	10	0.174	0.04	0.002	
	15	0.174	0.09	0.006	
	20	0.170	0.51	0.033	
	25	0.177	0.18	0.011	
	30	0.180	0.11	0.006	
	90	0.188	0.09	0.005	
180	0.176	0.18	0.011		
10	0	0.180	0.07	0.004	0.031
	5	0.178	0.10	0.006	
	10	0.171	0.48	0.031	
	15	0.179	0.13	0.008	
	20	0.181	0.09	0.005	
	25	0.183	0.09	0.005	
	90	0.187	0.09	0.005	
	180	0.183	0.12	0.007	

Abb. 44: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.3):

=====



Parameter:

$f_a = 66.5 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.05$
 $m_\nu = 26$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 0.67$

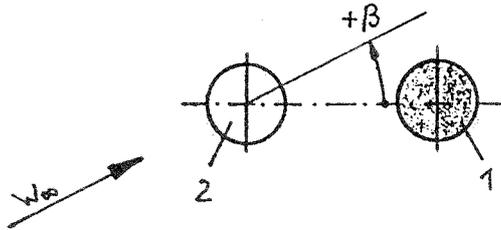
$l_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\xi_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.126	0.04	0.012	0.147
	0	0.147	0.04	0.008	
	5	0.109	0.04	0.015	
	5	0.133	0.05	0.012	
	10	0.126	0.53	0.147	
	15	0.138	0.17	0.044	
	20	0.152	0.16	0.035	
25	0.160	0.61	0.117		
4	0	0.151	0.05	0.010	0.035
	5	0.150	0.06	0.012	
	10	0.149	0.06	0.013	
	15	0.155	0.07	0.013	
	20	0.165	0.13	0.022	
	25	0.171	0.22	0.035	
5.05	0	0.145	0.06	0.014	0.052
	5	0.151	0.06	0.012	
	10	0.152	0.06	0.012	
	15	0.154	0.07	0.014	
	20	0.166	0.31	0.052	
	25	0.172	0.22	0.035	
6.8	0	0.153	0.09	0.019	0.037
	5	0.152	0.08	0.017	
	10	0.158	0.11	0.021	
	15	0.170	0.23	0.037	
	20	0.177	0.18	0.027	
	25	0.180	0.16	0.023	
10	0	0.163	0.05	0.010	0.051
	5	0.163	0.21	0.038	
	10	0.167	0.30	0.051	
	15	0.177	0.18	0.027	
	20	0.176	0.16	0.024	
	25	0.177	0.16	0.024	

Abb. 45: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.4.1):

=====



Parameter:

$$\begin{aligned} f_a &= 66.5 \text{ Hz} \\ \nu &= 0.05 \\ m_{\nu} &= 26 \end{aligned}$$

$$l_2/d_2 = 15$$

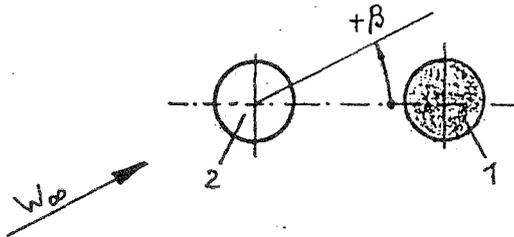
$$d_2/d_1 = 1$$

$$l_2/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $z_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	z_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{\max}$
3.25	0	0.134	0.14	0.039	0.122
	5	0.159	0.10	0.018	
	10	0.158	0.03	0.005	
	15	0.115	0.03	0.010	
	15	0.176	0.07	0.011	
	20	0.181	0.14	0.020	
	25	0.143	0.51	0.122	
4	0	0.172	0.26	0.040	0.040
	5	0.172	0.26	0.040	
	10	0.173	0.24	0.036	
	15	0.173	0.19	0.029	
	20	0.178	0.22	0.031	
	25	0.180	0.17	0.024	
5.05	0	0.178	0.26	0.037	0.039
	5	0.178	0.27	0.039	
	10	0.178	0.23	0.033	
	15	0.179	0.21	0.030	
	20	0.180	0.17	0.025	
	25	0.177	0.19	0.028	
6.8	0	0.170	0.13	0.021	0.033
	5	0.173	0.12	0.018	
	10	0.124	0.04	0.012	
	10	0.174	0.10	0.016	
	15	0.176	0.12	0.017	
	20	0.178	0.17	0.025	
	25	0.181	0.23	0.033	
10	0	0.165	0.14	0.026	0.047
	5	0.162	0.14	0.025	
	10	0.162	0.14	0.026	
	13	0.168	0.22	0.035	
	15	0.168	0.28	0.047	
	20	0.180	0.20	0.029	
	25	0.176	0.18	0.027	

Abb.46: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANDORDNUNG (Variante 1.4.2):
=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
$\nu = 0.12$
$m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1$

$l_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179$ $\zeta_0 = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

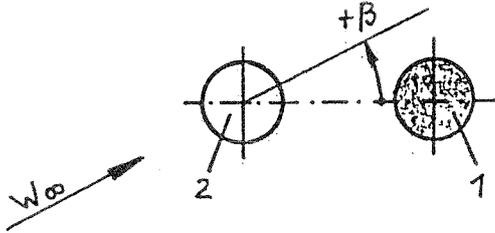
a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max.}$
3	0	0.132	0.26	0.028	0.037
	5	0.147	0.02	0.001	
	10	0.137	0.02	0.002	
	15	0.125	0.04	0.005	
	20	0.127	0.02	0.003	
	25	0.140	0.05	0.005	
	30	0.140	0.20	0.020	
	35	0.145	0.41	0.037	
	40	0.154	0.19	0.015	
	45	0.158	0.17	0.013	
	90	0.187	0.28	0.015	
180	0.137	0.03	0.003		
4	0	0.165	0.22	0.015	0.017
	5	0.170	0.27	0.017	
	10	0.168	0.23	0.015	
	15	0.173	0.21	0.013	
	20	0.177	0.20	0.012	
	25	0.180	0.15	0.009	
	30	0.164	0.25	0.017	
	30	0.183	0.12	0.007	
	90	0.194	0.10	0.005	
	180	0.165	0.25	0.017	
	5	0	0.177	0.22	
5		0.178	0.18	0.011	
10		0.180	0.15	0.009	
15		0.183	0.12	0.007	
20		0.155	0.19	0.015	
25		0.161	0.24	0.017	
30		0.172	0.17	0.011	
90		0.183	0.08	0.004	
180		0.174	0.12	0.007	

Fortsetzung Variante 1.4.2

a/d_1	β [°]	Sr_a	z_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
10	0	0.161	0.15	0.011	0.013
	5	0.166	0.12	0.008	
	10	0.159	0.12	0.009	
	15	0.168	0.20	0.013	
	20	0.180	0.13	0.007	
	25	0.185	0.10	0.005	
	90	0.179	0.08	0.005	
	180	0.176	0.09	0.006	
12.5	0	0.167	0.10	0.007	0.007
15	0	0.165	0.10	0.007	0.007
	90	0.178	0.09	0.005	

Abb. 47: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.5):

=====



Parameter:

$f_a = 65.8$ Hz
$\nu = 0.12$
$m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1$

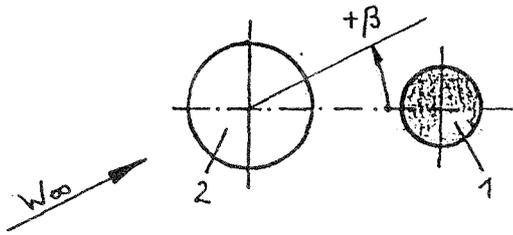
$l_2/l_1 = 1.5$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.179$ $\epsilon_a = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d ₁	β [°]	Sr_a	ϵ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.136	0.43	0.044	0.044
	5-10	-	-	0.001	
	15	0.137	0.03	0.003	
	25	0.137	0.04	0.003	
	30	0.134	0.03	0.003	
	35	0.140	0.05	0.004	
	40	0.143	0.05	0.004	
	90	0.188	0.21	0.011	
	180	0.143	0.04	0.004	
4	0	0.165	0.45	0.031	0.031
	5	0.166	0.32	0.022	
	10	0.173	0.35	0.022	
	15	0.177	0.36	0.022	
	20	0.179	0.19	0.011	
	25	0.179	0.07	0.004	
	90	0.195	0.13	0.007	
	180	0.169	0.13	0.009	
5	0	0.180	0.57	0.033	0.033
	5	0.181	0.57	0.033	
	10	0.181	0.38	0.022	
	15	0.185	0.32	0.017	
	20	0.187	0.20	0.011	
	25	0.187	0.13	0.007	
	90	0.181	0.08	0.004	
	180	0.164	0.10	0.007	
10	0	0.192	0.21	0.011	0.013
	5	0.192	0.17	0.009	
	10	0.194	0.09	0.004	
	15	0.173	0.14	0.009	
	20	0.184	0.24	0.013	
	25	0.188	0.12	0.007	
	90	0.188	0.12	0.007	
	180	0.187	0.10	0.005	

Abb.48: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.6.1):

=====



Parameter:

$f_a = 66.5 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.05$
 $m, \nu = 26$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

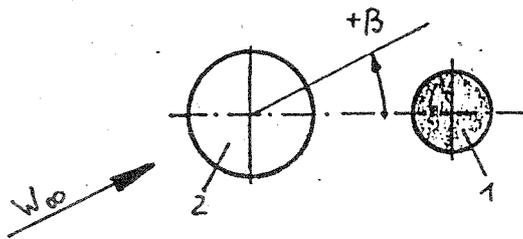
$l_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\xi_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.108	0.10	0.040	0.104
	5	0.113	0.22	0.085	
	10	0.117	0.29	0.104	
	15	0.111	0.02	0.007	
	15	0.146	0.03	0.008	
	20	0.117	0.01	0.003	
	25	0.105	0.02	0.007	
4	0	0.106	0.08	0.032	0.041
	5	0.106	0.10	0.041	
	10	0.116	0.08	0.029	
	15	0.112	0.02	0.007	
	20	0.087	0.01	0.008	
	20	0.156	0.03	0.005	
	25	0.114	0.07	0.026	
25	0.160	0.09	0.016		
5.05	0	0.116	0.08	0.026	0.077
	5	0.104	0.06	0.028	
	10	0.107	0.05	0.021	
	15	0.118	0.19	0.064	
	20	0.121	0.24	0.077	
	25	0.125	0.22	0.065	
6.8	0	0.124	0.14	0.040	0.043
	5	0.124	0.15	0.043	
	10	0.125	0.13	0.039	
	15	0.125	0.13	0.037	
	20	0.127	0.11	0.031	
	25	0.127	0.05	0.015	
	25	0.175	0.20	0.031	
10	0	0.130	0.10	0.028	0.035
	5	0.130	0.08	0.022	
	10	0.130	0.06	0.017	
	15	0.130	0.04	0.011	
	15	0.170	0.14	0.023	
	20	0.128	0.03	0.009	
	20	0.175	0.22	0.035	
	25	0.128	0.02	0.005	
	25	0.177	0.17	0.026	

Abb.49: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.6.2):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179$ $\xi_0 = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ξ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.104	0.21	0.037	0.052
	5	0.104	0.30	0.052	
	10	0.114	0.05	0.007	
	15-25	-	-	0.002	
	30	0.105	0.02	0.003	
	90	0.212	0.09	0.004	
	180	0.127	0.02	0.002	
4	0	0.102	0.23	0.041	0.048
	5	0.103	0.27	0.048	
	10	0.116	0.02	0.003	
	15	0.137	0.03	0.003	
	20	0.123	0.03	0.004	
	25	0.121	0.12	0.015	
	30	0.134	0.27	0.028	
	35	0.142	0.45	0.041	
	40	0.147	0.30	0.026	
	45	0.158	0.41	0.031	
	50	0.160	0.36	0.026	
	55	0.164	0.31	0.022	
	60	0.172	0.28	0.017	
	70	0.177	0.22	0.013	
	80	0.181	0.11	0.007	
90	0.194	0.10	0.005		
180	0.156	0.03	0.002		
5	0	0.112	0.25	0.037	0.037
	5	0.111	0.25	0.037	
	10	0.108	0.22	0.035	
	15	0.108	0.20	0.033	
	20	0.109	0.22	0.035	
	25	0.117	0.22	0.031	
	30	0.123	0.09	0.011	
	90	0.189	0.09	0.005	
	180	0.158	0.20	0.015	

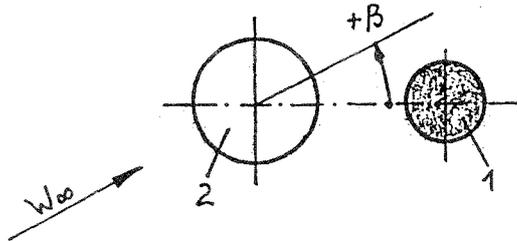
Fortsetzung Variante 1.6.2

a/d_1	β [°]	Sr_α	ζ_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{\max}$
10	0	0.117	0.29	0.039	0.039
	5	0.119	0.25	0.033	
	10	0.118	0.16	0.022	
	15	0.118	0.08	0.011	
	20	0.180	0.08	0.005	
	25	0.180	0.08	0.004	
	90	0.189	0.09	0.005	
	180	0.184	0.12	0.007	

12

Abb. 50: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.7.1):

=====



Parameter:

$f_0 = 66.5 \text{ Hz}$
 $\gamma = 0.05$
 $m\gamma = 26$

$l_2/d_2 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

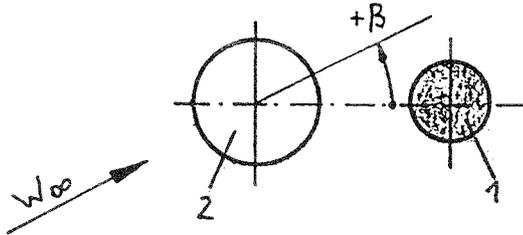
$l_2/l_1 = 1.5$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.176$ $z_0 = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d ₁	β [°]	Sr ₀	z ₀	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.109	0.16	0.065	0.374
	5	0.109	0.26	0.105	
	10	0.109	0.08	0.032	
	10	0.121	0.26	0.086	
	15	0.093	0.02	0.014	
	15	0.102	0.03	0.013	
	20	0.098	0.75	0.374	
	25	0.092	0.38	0.218	
4	0	0.107	0.18	0.072	0.122
	5	0.109	0.32	0.122	
	10	0.110	0.08	0.031	
	15	0.103	0.02	0.011	
	20	0.089	0.04	0.021	
	25	0.116	0.10	0.033	
	25	0.161	0.13	0.023	
	5.05	0	0.119	0.35	
5		0.119	0.38	0.128	
10		0.118	0.40	0.132	
15		0.119	0.41	0.135	
20		0.121	0.50	0.158	
20		0.124	0.51	0.155	
25		0.126	0.59	0.174	
6.8		0	0.124	0.31	0.091
	5	0.126	0.30	0.087	
	10	0.126	0.27	0.077	
	15	0.126	0.27	0.077	
	20	0.126	0.25	0.072	
	25	0.127	0.08	0.023	
	25	0.171	0.14	0.023	
	10	0	0.129	0.34	0.094
5		0.130	0.35	0.096	
10		0.130	0.29	0.080	
15		0.130	0.16	0.047	
20		0.131	0.07	0.020	
20		0.175	0.17	0.027	
25		0.130	0.03	0.009	
25		0.178	0.17	0.026	

Abb. 51: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.7.2):

=====



Parameter:

$f_a = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

$l_2/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

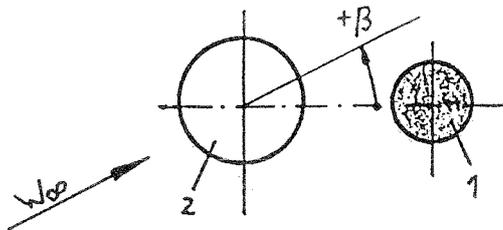
$l_2/l_1 = 1.5$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.179$ $\epsilon_a = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d ₁	β [°]	Sr_a	ϵ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.106	0.25	0.041	0.048
	5	0.115	0.34	0.048	
	10	0.113	0.25	0.037	
	15-30	-	-	0.002	
	90	0.223	0.13	0.005	
	180	0.112	0.03	0.004	
4	0	0.103	0.31	0.054	0.054
	5	0.104	0.31	0.054	
	10-15	-	-	0.002	
	20	0.156	0.03	0.003	
	25	0.158	0.06	0.005	
	30	0.147	0.07	0.006	
	90	0.197	0.12	0.006	
	180	0.130	0.04	0.004	
5	0	0.115	0.39	0.054	0.057
	5	0.115	0.38	0.054	
	10	0.113	0.35	0.052	
	15	0.116	0.41	0.057	
	20	0.120	0.43	0.057	
	25	0.124	0.45	0.054	
	30	0.129	0.25	0.028	
	35	0.134	0.13	0.013	
	90	0.189	0.09	0.005	
	180	0.138	0.09	0.009	
10	0	0.124	0.45	0.054	0.054
	5	0.123	0.40	0.050	
	10	0.123	0.34	0.041	
	15	0.124	0.23	0.028	
	20	0.187	0.08	0.004	
	25	0.189	0.10	0.005	
	90	0.198	0.09	0.004	
	180	0.160	0.06	0.004	

Abb.52: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.8.1):

=====



Parameter:

$f_a = 66.5$ Hz
$\nu = 0.05$
$m_{\nu} = 26$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

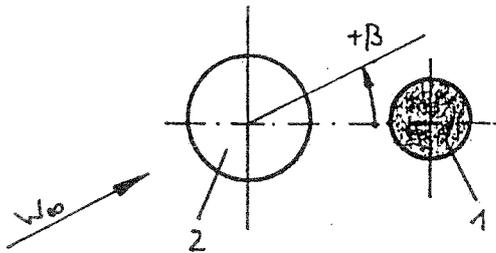
$l_2/l_1 = 2$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\xi_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.024$

a/d_1	β [°]	Sr_a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3.25	0	0.109	0.24	0.096	0.361
	5	0.108	0.25	0.104	
	10	0.108	0.04	0.019	
	10	0.121	0.10	0.033	
	15	0.100	0.60	0.284	
	20	0.098	0.73	0.361	
	25	0.101	0.51	0.243	
4	0	0.113	0.25	0.090	0.128
	5	0.112	0.20	0.071	
	10	0.112	0.06	0.022	
	15	0.104	0.30	0.128	
	20	0.104	0.25	0.106	
	25	0.106	0.05	0.022	
	25	0.145	0.22	0.049	
5.05	0	0.119	0.22	0.072	0.112
	5	0.113	0.31	0.112	
	10	0.112	0.27	0.100	
	15	0.113	0.25	0.091	
	20	0.118	0.26	0.087	
	25	0.118	0.25	0.083	
6.8	0	0.123	0.26	0.079	0.079
	5	0.126	0.26	0.077	
	10	0.127	0.22	0.061	
	15	0.128	0.20	0.056	
	20	0.124	0.15	0.044	
	25	0.124	0.07	0.020	
	25	0.171	0.12	0.020	
10	0	0.128	0.40	0.115	0.115
	5	0.128	0.38	0.108	
	10	0.129	0.32	0.091	
	15	0.130	0.16	0.044	
	20	0.129	0.08	0.022	
	20	0.176	0.19	0.029	
	25	0.128	0.04	0.011	
	25	0.178	0.18	0.026	

Abb.53: Versuchsergebnisse zur
DOPPELANORDNUNG (Variante 1.B.2):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 2$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179$ $\zeta_0 = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.103	0.33	0.059	0.059
	5	0.103	0.28	0.050	
	10	0.115	0.11	0.015	
	15-30	0.130	0.02	0.002	
	90	0.194	0.22	0.011	
	180	0.112	0.03	0.004	
4	0	0.107	0.39	0.063	0.063
	5	0.106	0.32	0.052	
	10	0.132	0.06	0.007	
	15	0.146	0.05	0.004	
	20	0.144	0.34	0.031	
	25	0.141	0.30	0.028	
	30	0.137	0.37	0.037	
	90	0.194	0.13	0.007	
	180	0.133	0.04	0.004	
5	0	0.110	0.39	0.061	0.061
	5	0.110	0.35	0.054	
	10	0.108	0.27	0.044	
	15	0.113	0.25	0.037	
	20	0.120	0.28	0.037	
	25	0.121	0.29	0.037	
	30	0.127	0.21	0.024	
	90	0.187	0.12	0.007	
	180	0.146	0.12	0.011	
10	0	0.120	0.45	0.059	0.059
	5	0.123	0.44	0.054	
	10	0.123	0.38	0.048	
	15	0.121	0.25	0.033	
	20	0.125	0.05	0.007	
	25	0.130	0.04	0.004	
	25	0.174	0.11	0.007	
	90	0.185	0.10	0.005	
	180	0.173	0.10	0.007	

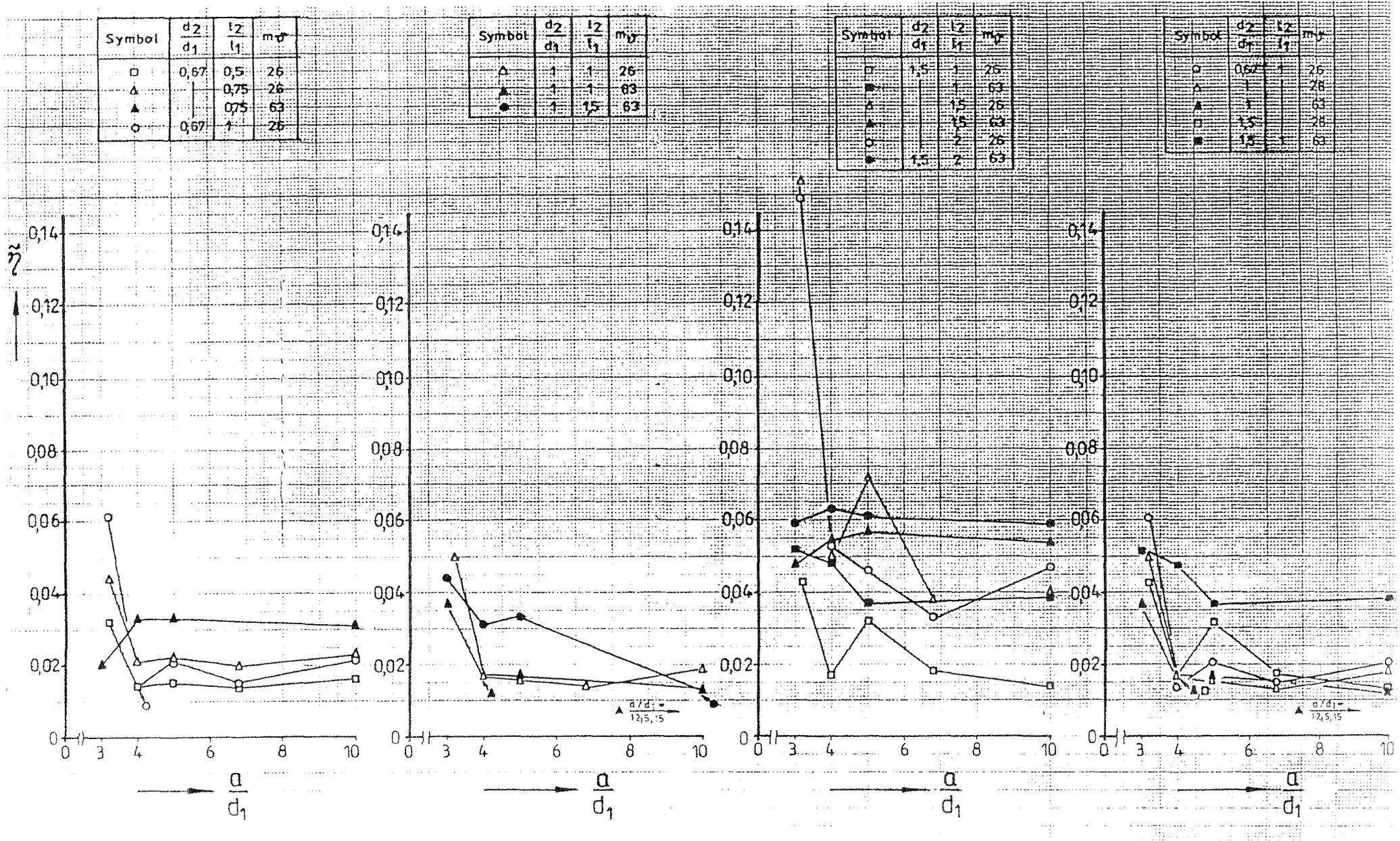


Abb.54: Maximale bezogene Auslenkungen der Doppelanordnungen

Symbol	d_2/d_1	l_2/l_1	n_{St}
Δ	1	1	26
\blacktriangle	1	1	63
\bullet	1	1,5	63
\square	1,5	1	26
\blacksquare	1,5	1	63
\blacklozenge	1,5	1,5	63

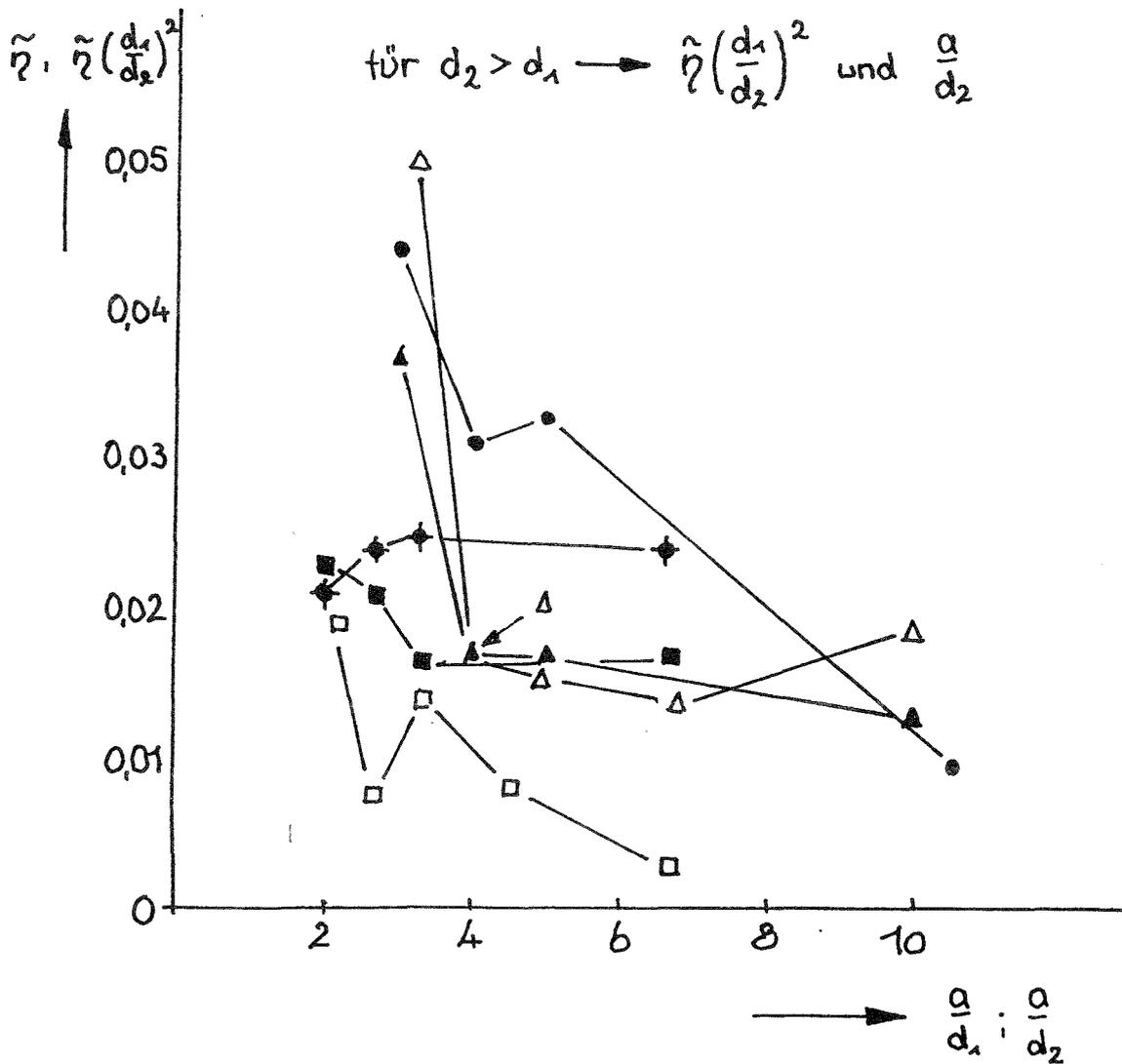


Abb.55: Maximale bezogene Auslenkungen der Doppelanordnungen

5.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Windkanalversuche an Zweiergruppen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

In den Abschnitten 4 und 5 wurde über systematisch durchgeführte Messungen dynamischer Beanspruchungen infolge Nachlaufwirbel^{er}erregung an Kreiszyylinder-Doppelanordnung berichtet.

Die meisten Zweiergruppen wurden für zwei Massendämpfungsparameter untersucht. Im Abschnitt 4 wurden Modelle mit Massendämpfungsparametern $m_{\lambda} = 26$ behandelt, im Abschnitt 5 mit $m_{\lambda} = 63$. In den Darstellungen wurden aus Vergleichs- und Übersichtsgründen beide Ergebniswerte eingetragen.

Die Strouhalzahlen Sr_0 und die Querkraftbeiwerte \tilde{c}_Q wurden bei maximaler Beanspruchung ermittelt.

Die Strouhalzahlen variieren annähernd systematisch, während die Querkraftbeiwerte stark streuen.

Für die primär interessierende Beanspruchung gilt:

- bezogene Auslenkung $\tilde{\eta} \sim \tilde{c}_Q / Sr_0^2$

Die Querkraftbeiwerte sind durchaus vom Massendämpfungsparameter abhängig. Maximale Beanspruchungen treten auf, wenn der Meßzylinder im Nachlauf des Blendenzylinders oder in der Nähe des Nachlaufendes angeordnet ist, wo sich der Umströmungszustand sprunghaft ändern kann, bzw. wo die Wirbelablösung des Meßzylinders von der Blende gesteuert wird.

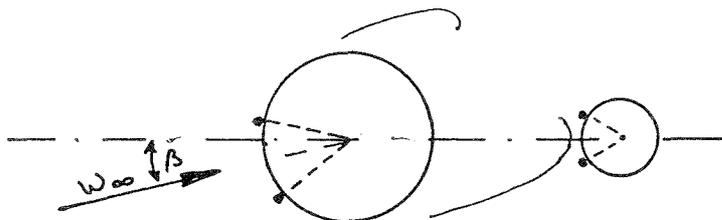
Im Vergleich zum Einzelzylinder ergeben sich größere Beanspruchungen:

- bei kleinen Abstandverhältnissen, wobei große Massendämpfungsparameter eine Ausnahme bilden können
- wenn der Meßzylinder niedriger als die Blende ist
- wenn der Durchmesser des Meßzylinders kleiner als der der Blende ist

6. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von in Zweiergruppen angeordneten Kreiszyklindern bei Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches

In diesem Abschnitt werden Windkanalmeßergebnisse von in Zweiergruppen angeordneten Kreiszyklindern bei transkritischer Reynoldszahlmodellierung beschrieben. Untersucht wurden nachlauferregte Schwingungen. Bei Variation des Blendendurchmessers und der Höhe werden Strouhalzahlen, dynamische Querkraftbeiwerte und bezogene Auslenkungen in Resonanz bei unterschiedlichen Anströmbedingungen (Zylinderabstand, Anströmwinkel) und Massendämpfungsparameter $m \cdot \alpha \approx 62$ bzw. 50 angegeben. Es werden Aussagen zur Übertragbarkeit der im unterkritischen Reynoldszahlgebiet gemessenen Ergebnisse in das transkritische Gebiet getroffen.

Bei Querströmung ($\beta > 0^\circ$) wird der im Nachstrom stehende Zylinder von den Wirbeln unsymmetrisch getroffen. Dadurch kann die für den Einzelzylinder nachgewiesene Modellierbarkeit des transkritischen Reynoldszahlbereiches problematisch werden.



Bei Anströmrichtung $\beta > 0^\circ$ wurde der Blendenzylinder bezüglich der Lage der Stolperkanten symmetrisch zur Anströmrichtung gedreht. Die symmetrische Anströmung und das Wiederanlegen der Strömung nach der Stolperkante wurde mit einer Fadensonde überprüft. Solange der Meßzylinder in dem stark turbulenten Nachlauf des Anströmzylinders liegt, wird durch die Turbulenz eine überkritische Strömung erzeugt. Die Wirkung gleicht der der Stolperkante. Nur wenn der Meßzylinder gerade den Nachlauf berührt, wird eine merklich unsymmetrische Strömung auftreten. Dabei können Fehler bei der Modellierung des transkritischen Bereiches entstehen.

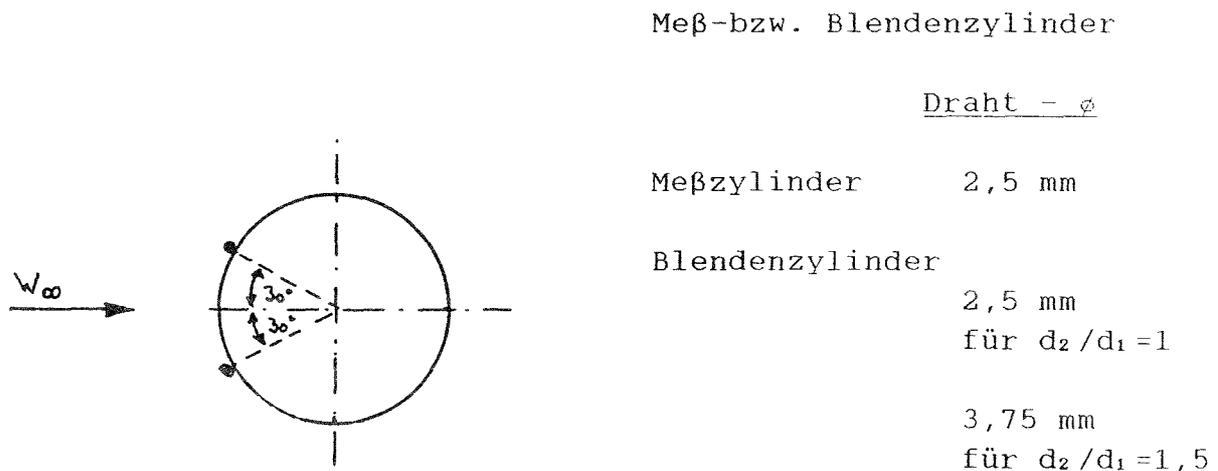
6.1 Versuchaufbau

Es wurde der für die Modellierung des transkritischen Reynoldszahlbereiches bereits benutzte Versuchsaufbau des großen Windkanales wiederverwendet (Abschnitt 2.3)

Der Meßzylinder $\phi 110$ hat eine Wandstärke von 5 mm und ist aus Aluminium. Zur Variation der Dämpfung wurde die Möglichkeit vorgesehen, das obere Ende des Rohres mit feinem Sand zu füllen. Die beiden Blendenzylinder $\phi 108$ bzw. $\phi 162$ sind aus Holz gefertigt.

Im Unterschied zu Untersuchungen im unterkritischen Reynoldszahlgebiet, wo die effektive Streckung der Zylinder durch Anbringen von Endscheiben vergrößert wurde (damit Annäherung an transkritische Umströmung), ist im transkritischen Fall auf Endscheiben verzichtet worden. Im transkritischen und modellierten transkritischen Reynoldszahlgebiet sind die Streckungen geometrisch und strömungsmechanisch ähnlich.

Die das transkritische Gebiet charakterisierenden turbulenten Grenzschichten wurden mit Stolperdrähten erzeugt:



Die mit Klebeband aufgeklebten Drähte erstrecken sich über die gesamte Zylinderlänge (Abb. 56)



Abb. 56: transkritische Reynoldszahl-Modellierung durch Anbringen von Draht

- Versuchsablauf:

1. Bestimmung der Federkonstanten
2. statische Eichung der Beanspruchung in und normal zur Anströmrichtung
3. "dynamische" Eichung der Meßgeräte
4. periodische Ermittlung von Eigenfrequenz und logarithmischem Dämpfungskrement des Meßzylinders aus der Aufzeichnung der Impulsantwort auf dem Monitor des Meßcomputers PSA 1305
5. Ermittlung des statischen Widerstandsbeiwertes c_w des Einzelzylinders

6. periodische Ermittlung von Resonanzstaudruck und dynamischer Beanspruchung am Meßzylinder
7. Ermittlung der Resonanzstaudrücke und dynamischen Beanspruchungen, für die zu untersuchenden Doppelanordnungen
8. Bestimmung der Resonanzkurve für den Einzelzylinder bei drei verschiedenen Massendämpfungsparametern

- Variantenübersicht:

Eine Übersicht über die untersuchten Modellanordnungen gibt Abb. 57. Folgende Versuchsparameter wurden eingehalten:

1. Einzelzylinder - transkritisch modelliert:

Abmessungen	d_1, l_1
Streckung	$l_1/d_1 = 12,8$
Widerstandbeiwert	$c_w = 0,51$
Massendämpfungsparameter	$m_{\mathcal{A}} = 9, 16, 50 \text{ und } 62$

2. Doppelanordnungen:

Blendenzylinder - Abmessungen	d_2, l_2
Durchmesser Verhältnis	$d_2/d_1 = 1 \text{ und } 1,5$
Höhenverhältnis	$l_2/l_1 = 1 \text{ und } 1,37$
Zylinderabstände	nach Abb. 57
Anströmrichtung	nach Abb. 57
Massendämpfungsparameter	$m_{\mathcal{A}} = 62, 58$

Im folgenden werden immer nur die Querkräfte bzw. -beiwerte angegeben, da die Längsbewegung meist viel kleiner als die Querbewegung war.

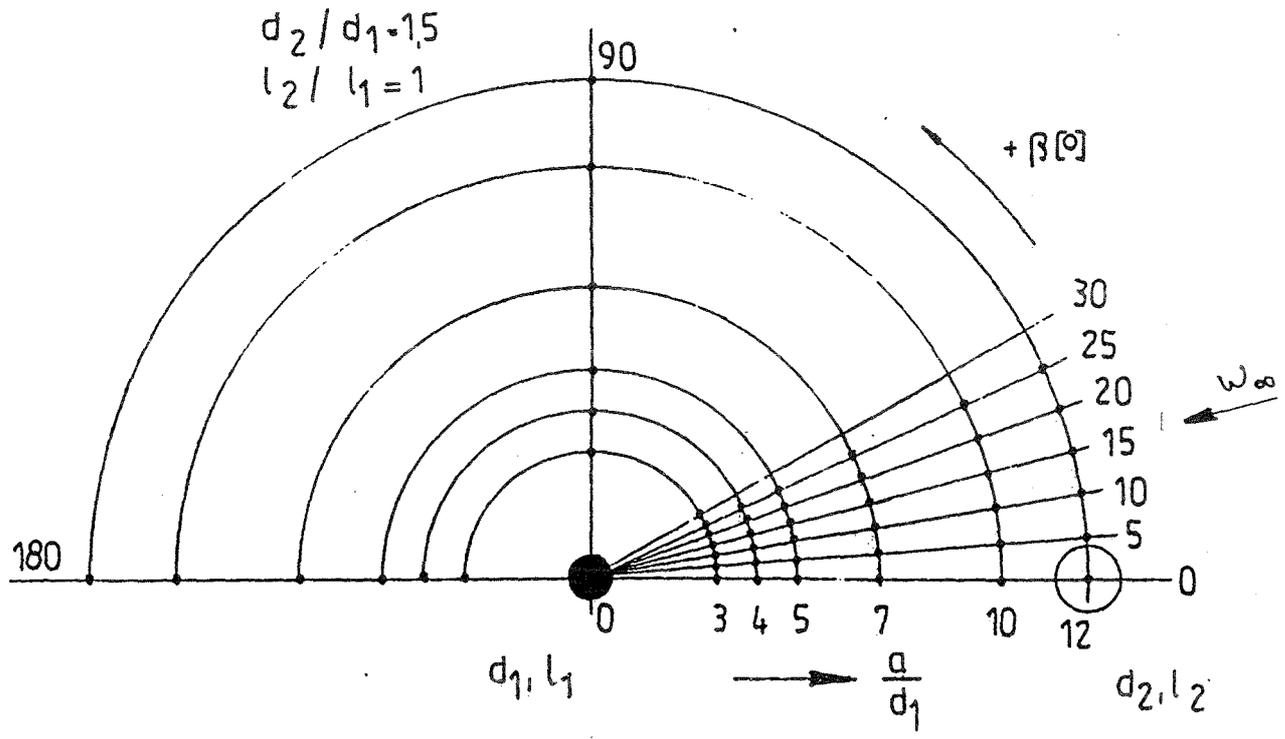
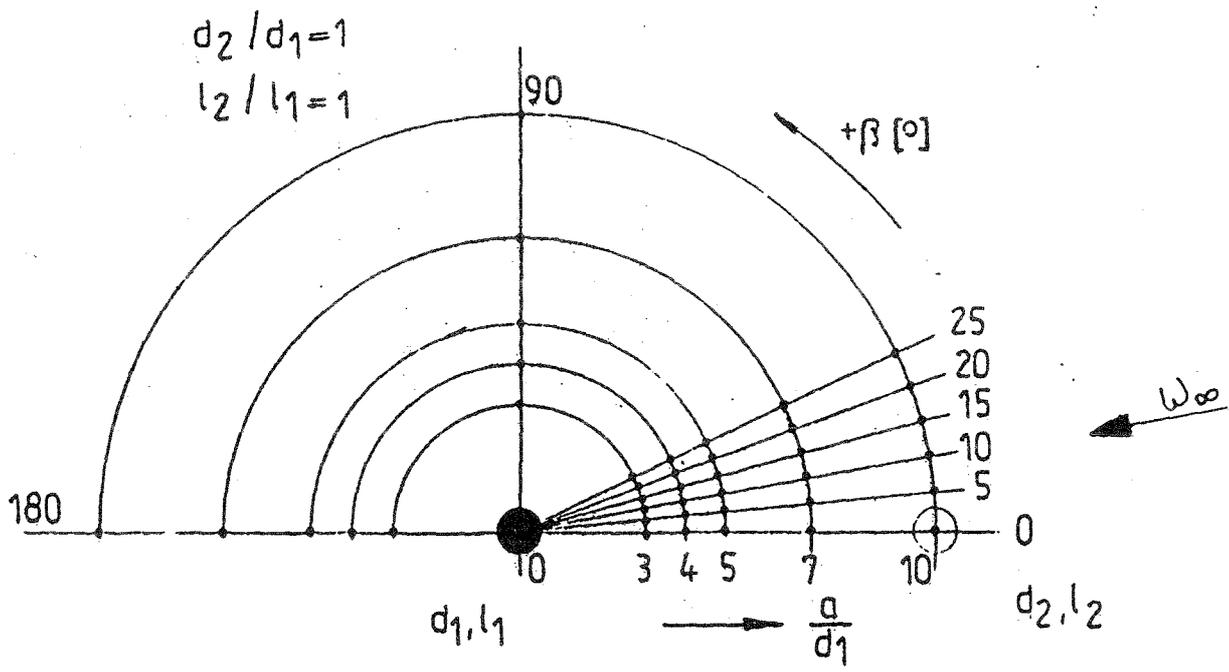
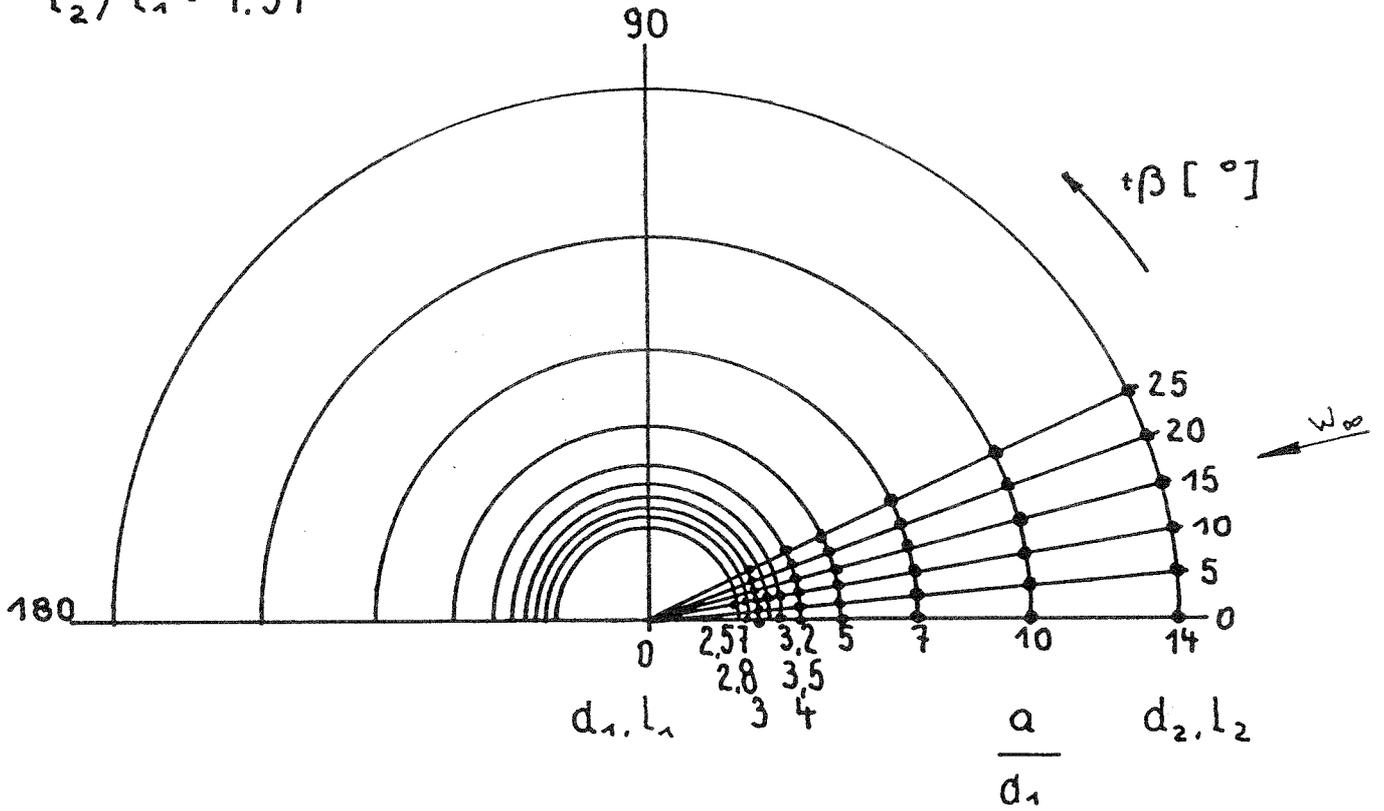


Abb.57: Untersuchte Modellansordnungen

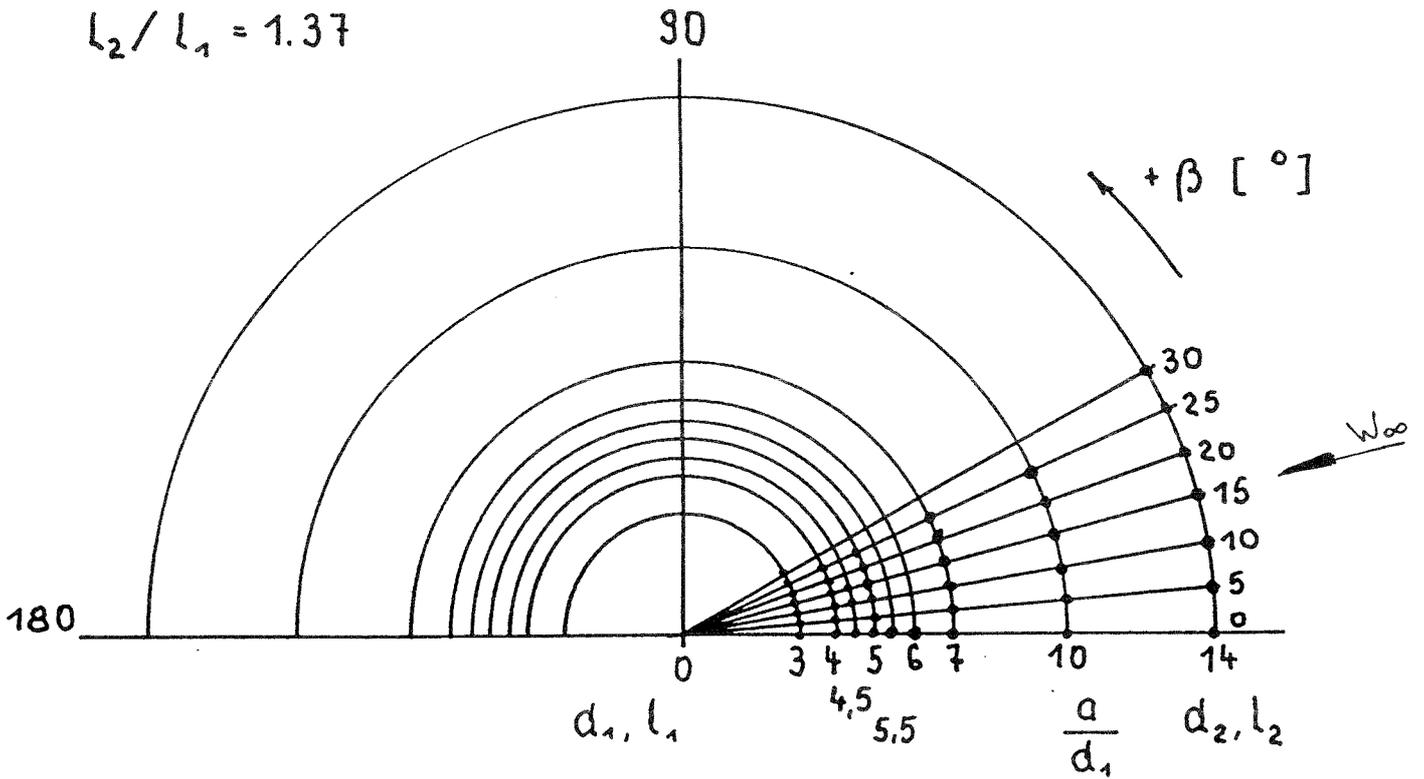
$d_2/d_1 = 1$

$l_2/l_1 = 1.37$



$d_2/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 1.37$



Fortsetzung Abb.57: Untersuchte Modellanordnungen

6.2 Versuchsergebnisse von Doppelanordnungen bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung

Aus den gemessenen Resonanzstaudrücken und Querkraftbeanspruchungen werden berechnet:

- die Strouhalzahl $Sr_o = f_o * d_1 / W$
- der effektive Querkraftbeiwert $\tilde{C}_Q = 1,67 * F_Q * \mathcal{D} / (\pi * q_w * d_1 * l_1)$
- die effektive bezogene Auslenkung $\tilde{\eta} = y / d_1 = \tilde{F}_Q / (c_r * d_1)$

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6, 7, 7a und 7b zusammengefaßt.

6.2.1 Vergleich von Strouhalzahlen und Querkraftbeiwerten

Die an den Doppelanordnungen durchgeführten Messungen wurden bei Massendämpfungsparametern $m \mathcal{D} = 62$ bzw. 50 vorgenommen.

- gleiche Durchmesser ($d_2/d_1=1$, $l_2/l_1=1$)

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,20 < Sr_o < 0,24$. Es wurden fast ausschließlich Strouhalzahlen $Sr_o > 0,22$ ermittelt, also Werte, die wenig vom Einzelzylinder abweichen. Nur bei $a/d_1=3$ und $\beta=0^\circ \dots 10^\circ, 180^\circ$ sowie $a/d_1=4$ und $\beta=180^\circ$ werden Werte von $Sr_o=0,20 \dots 0,21$ gemessen. Bei diesen Abstandsverhältnissen tritt eine qualitative Änderung des Strömungsnachlaufes ein. Die Querkraftbeiwerte liegen zwischen $0,04 < \tilde{C}_Q < 0,50$. Die ermittelten Werte bei $a/d_1=4$ und größer entsprechen etwa denen des Einzelzylinders. Beim Abstandsverhältnis $a/d_1=3$ treten zwischen $\beta=0^\circ \dots 15^\circ$ die größten Beanspruchungen auf. Die Querkraftbeiwerte betragen hier zwischen $\tilde{C}_Q=0,21$ ($\beta=0^\circ$) und $\tilde{C}_Q=0,50$ ($\beta=10^\circ$)

- verschiedene Durchmesser ($d_2/d_1=1,5$, $l_2/l_1=1$)

Hier liegen die Strouhalzahlen zwischen $0,13 < S_{r0} < 0,25$. Die kleinsten Werte wurden bei $a/d_1=3$ und $\beta=15^\circ$ und 20° ermittelt. Mit dem Zylinderabstand a nehmen die Strouhalzahlen im allgemeinen zu. Erst wenn der im Nachstrom befindliche Zylinder aus dem Nachlauf des davorstehenden Zylinders heraustritt, steigen die Strouhalzahlen auf den Wert des Einzelzylinders an. Bei $\beta=180^\circ$ werden geringfügig kleinere Strouhalzahlen erreicht.

Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,03 < \tilde{c}_p < 0,13$. Sie liegen damit kaum über dem des Einzelzylinders. Auffällig ist das Maximum bei $a/d_1=5$. Die Tendenz, daß die maximalen Beanspruchungen in der Umgebung der Anströmrichtung $\beta=0^\circ$ liegen, ist für $a/d_1 > 4$ gegeben.

- unterschiedliche Zylinderhöhen ($d_2/d_1=1,0$ bzw. $1,5$;
 $l_2/l_1=1,37$)

Im transkritisch modellierten Reynoldszahlbereich ist ein Längeneinfluß nicht nachweisbar.

Tabelle 6: Versuchsergebnisse zur Doppelanordnung (gleiche Durchmesser, transkritisch modelliert)

Parameter:

$$f_0 = 25.1 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.10$$

$$m\nu = 62$$

$$l_1/d_1 = 12.8$$

$$d_2/d_1 = 1$$

$$l_2/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders:

bei $c_w = 0.51$

$$Sr_0 = 0.243$$

$$\zeta_0 = 0.11$$

$$\tilde{\eta} = 0.0042$$

$$\zeta_0/Sr_0 = 1.86$$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$	ζ_0/Sr_0^2
3	0	0.203	0.21	0.0113	0.0259	11.45
	5	0.205	0.27	0.0146		
	10	0.209	0.50	0.0259		
	15	0.222	0.25	0.0113		
	20	0.231	0.15	0.0065		
	25	0.240	0.12	0.0049		
	90	0.244	0.11	0.0042		
	180	0.204	0.04	0.0023		
4	0	0.223	0.14	0.0065	0.0065	2.82
	5	0.229	0.11	0.0047		
	10	0.228	0.13	0.0057		
	15	0.237	0.10	0.0039		
	20	0.238	0.11	0.0042		
	25	0.241	0.12	0.0045		
	90	0.241	0.09	0.0036		
	180	0.204	0.05	0.0029		
5	0	0.235	0.12	0.0050	0.0050	2.17
	5	0.237	0.11	0.0042		
	10	0.238	0.11	0.0044		
	15	0.241	0.10	0.0039		
	20	0.241	0.11	0.0042		
	25	0.243	0.11	0.0044		
	90	0.243	0.11	0.0041		
	180	0.223	0.08	0.0036		
7	0	0.238	0.11	0.0044	0.0049	2.24
	5	0.240	0.11	0.0044		
	10	0.240	0.11	0.0044		
	15	0.241	0.11	0.0042		
	20	0.241	0.13	0.0049		
	25	0.241	0.11	0.0042		
	90	0.243	0.11	0.0044		
	180	0.235	0.11	0.0044		

Fortsetzung Tabelle 6

a/d_1	β [°]	Sr_0	ξ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$	ξ_0/Sr_0^2
10	0	0.241	0.10	0.0039	0.0044	1.89
	5	0.241	0.11	0.0044		
	10	0.241	0.11	0.0042		
	15	0.243	0.11	0.0042		
	20	0.243	0.11	0.0041	0.0044	1.89
	25	0.241	0.11	0.0044		
	90	0.243	0.11	0.0042		
	180	0.237	0.11	0.0044		

Tabelle 7: Versuchsergebnisse zur Doppelanordnung (verschiedene Durchmesser, transkritisch modelliert)

Parameter:

$f_0 = 25.1 \text{ Hz}$
$\beta = 0.10$
$m_j = 62$

$l_1/d_1 = 12.8$

$d_2/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders:

bei $c_w = 0.51$

$Sr_0 = 0.243$

$\xi_0 = 0.11$

$\tilde{\eta} = 0.0042$

$\xi_0/Sr_0^2 = 1.86$

a/d ₁	β [°]	Sr ₀	ξ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{max}$	ξ_0/Sr_0^2		
3	0	0.191	0.04	0.0024	0.0053	2.36		
	5	0.191	0.04	0.0024				
	10	0.191	0.04	0.0024				
	15	0.128	0.03	0.0041				
	15	0.191	0.03	0.0021				
	20	0.130	0.03	0.0041				
	20	0.193	0.04	0.0024				
	25	0.184	0.08	0.0053				
	25	0.194	0.05	0.0032				
	30	0.201	0.07	0.0041				
90	0.252	0.11	0.0041					
180	0.208	0.03	0.0016					
4	0	0.169	0.05	0.0041	0.0055	2.48		
	5	0.196	0.06	0.0036				
	10	0.203	0.06	0.0034				
	15	0.212	0.10	0.0052				
	20	0.215	0.11	0.0055				
	25	0.220	0.12	0.0055				
	90	0.246	0.12	0.0044				
	180	0.213	0.03	0.0013				
5	0	0.152	0.13	0.0122	0.0122	5.63		
	5	0.160	0.13	0.0113				
	10	0.170	0.13	0.0097				
	15	0.179	0.13	0.0089				
	20	0.212	0.08	0.0042				
	25	0.229	0.07	0.0029				
	90	0.246	0.12	0.0045				
	180	0.219	0.09	0.0042				

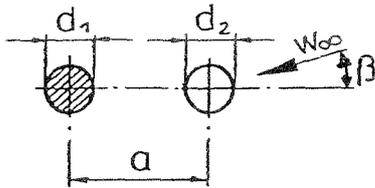
Fortsetzung Tabelle 7

a/d_1	β [°]	Sr_σ	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{max}$	ξ_a/Sr_σ^2
7	0	0.176	0.12	0.0089	0.0089	3.87
	5	0.179	0.10	0.0073		
	10	0.182	0.10	0.0068		
	15	0.184	0.09	0.0062		
	20	0.211	0.07	0.0037		
	25	0.235	0.11	0.0044		
	90	0.244	0.12	0.0044		
	180	0.229	0.11	0.0047		
10	0	0.183	0.12	0.0078	0.0078	3.58
	5	0.186	0.10	0.0068		
	10	0.196	0.09	0.0053		
	15	0.235	0.12	0.0047		
	20	0.237	0.11	0.0045		
	25	0.240	0.11	0.0044		
	90	0.243	0.11	0.0044		
	180	0.235	0.11	0.0045		
12	0	0.181	0.12	0.0081	0.0081	3.66
	5	0.184	0.11	0.0073		
	10	0.200	0.08	0.0042		
	15	0.233	0.10	0.0042		
	20	0.238	0.11	0.0044		
	25	0.238	0.11	0.0045		
	90	0.241	0.11	0.0044		
	180	0.238	0.11	0.0044		

Tabelle 7a: Versuchsergebnisse zur
Doppelanordnung - gleiche Durch-
messer, transkritisch modelliert

Parameter:

$$\begin{aligned} f_o &= 23.7 \text{ Hz} \\ \nu &\approx 0.09 \\ m_{\nu} &\approx 58 \end{aligned}$$



$$l_1/d_1 = 12,8$$

$$d_2/d_1 = 1,0$$

$$l_2/l_1 = 1,37$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_o = 0.232$ $\tilde{c}_Q = 0.134$
 $c_w \approx 0.6$ $\tilde{c}_Q/Sr_o^2 = 2.49$

a/d ₁	β [°]	Sr _o	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_o^2	$\tilde{\eta}_{max}$
2.57	10	0.201	0.074	1.82	0.0041
2.80	0	0.207	0.063	1.46	0.0081
	10	0.213	0.167	3.56	
3.00	0	0.205	0.185	4.40	0.0106
	5	0.209	0.208	4.75	
	8	0.211	0.196	4.39	
	9	0.210	0.210	4.75	
	10	0.210	0.210	4.75	
	10	0.211	0.212	4.75	
	11	0.214	0.200	4.39	
	15	0.222	0.217	4.38	
	25	0.237	0.186	3.29	
3.20	10	0.251	0.162	2.56	0.0101
	10	0.217	0.214	4.53	
3.50	0	0.222	0.198	4.02	0.0089
	10	0.223	0.183	3.66	
4.00	0	0.232	0.216	4.02	0.0089
	5	0.233	0.159	2.93	
	10	0.234	0.160	2.92	
	15	0.236	0.164	2.93	
	25	0.241	0.170	2.93	
5.00	25	0.246	0.155	2.56	0.0065
	0	0.239	0.167	2.93	
	5	0.241	0.149	2.56	
	10	0.241	0.149	2.56	
	15	0.243	0.151	2.56	
7.00	20	0.245	0.131	2.19	0.0065
	25	0.244	0.109	1.83	
	0	0.241	0.149	2.56	
	5	0.241	0.140	2.41	
	10	0.245	0.162	2.71	
	15	0.250	0.114	1.83	
	20	0.230	0.136	2.56	
	25	0.230	0.155	2.93	
	25	0.230	0.155	2.93	
	25	0.230	0.155	2.93	

Fortsetzung Tabelle 7a

a/d_1	β [°]	Sr_0	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\eta}_{max}$
10.00	0	0.240	0.134	2.34	0.0062
	5	0.241	0.106	1.83	
	10	0.250	0.110	1.76	
	15	0.233	0.119	2.19	
	20	0.232	0.138	2.56	
	25	0.232	0.149	2.78	
14.00	0	0.240	0.092	1.61	0.0062
	5	0.236	0.102	1.83	
	10	0.235	0.101	1.83	
	15	0.233	0.147	2.71	
	20	0.232	0.150	2.78	
	25	0.232	0.149	2.78	

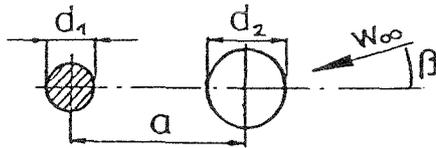
Tabelle 7b: Versuchsergebnisse zur
Doppelanordnung - verschiedene Durch-
messer, transkritisch modelliert

Parameter:

$$f_0 = 23.7 \text{ Hz}$$

$$\tilde{\gamma} \approx 0.09$$

$$m_{2\gamma} \approx 58$$



$$l_1/d_1 = 12.8$$

$$d_2/d_1 = 1.5$$

$$l_2/l_1 = 1.37$$

Werte des Einzelzylinders:

$$Sr_0 = 0.232 \quad \tilde{c}_Q = 0.134$$

$$c_w \approx 0.6 \quad \tilde{c}_Q/Sr_0^2 = 2.49$$

a/d_1	β [°]	Sr_0	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\gamma}_{max}$
3.00	0	0.184	0.037	1.10	0.0073
	5	0.193	0.041	1.10	
	10	0.188	0.041	1.17	
	15	0.196	0.042	1.10	
	20	0.187	0.039	1.10	
	25	0.180	0.106	3.29	
	30	0.193	0.109	2.93	
4.00	0	0.181	0.043	1.32	0.0081
	5	0.190	0.047	1.32	
	10	0.193	0.044	1.17	
	15	0.201	0.148	3.66	
	20	0.214	0.150	3.29	
	25	0.218	0.139	2.93	
4.5	0	0.163	0.069	2.56	0.0081
	10	0.177	0.104	3.29	
	15	0.190	0.132	3.66	
5.0	0	0.163	0.117	4.39	0.0097
	5	0.174	0.100	3.29	
	10	0.179	0.105	3.29	
	15	0.184	0.099	2.93	
	20	0.196	0.126	3.29	
	25	0.205	0.123	2.93	
5.5	0	0.168	0.134	4.75	0.0106
6.0	0	0.172	0.130	4.39	0.0097
7.0	0	0.172	0.119	4.02	0.0089
	5	0.172	0.109	3.66	
	10	0.184	0.112	3.29	
	15	0.187	0.103	2.93	
	20	0.225	0.129	2.56	
	25	0.233	0.135	2.49	

Fortsetzung Tabelle 7b

a/d_1	β [°]	St_0	ξ_Q	ξ_Q/St_0^2	η_{max}
10.0	0	0.192	0.122	3.29	0.0073
	5	0.193	0.114	3.07	
	10	0.195	0.112	2.93	
	15	0.224	0.111	2.19	
	20	0.233	0.147	2.71	
	25	0.236	0.139	2.49	
14.0	0	0.192	0.113	3.07	0.0068
	5	0.193	0.095	2.56	
	10	0.201	0.083	2.05	
	15	0.232	0.153	2.85	
	20	0.233	0.147	2.71	
	25	0.236	0.139	2.49	

Das Durchmesser Verhältnis zwischen Blenden- und Meßzylinder bestimmt wesentlich die Größenordnung der Strouhalzahl. Für $d_2/d_1 = 1,5$ wurden deutlich kleinere Werte als für $d_2/d_1 = 1$ ermittelt. Der Zylinder kleineren Durchmessers liegt dann voll im Nachlauf des davorstehenden Zylinders. Zu beachten ist der breite Nachlauf des Vorderzylinders. Der Wirbelabgang am Meßzylinder wird durch die Wirbelablösung am großen Zylinder gesteuert.

6.2.2 Vergleich der maximalen Beanspruchungen mit Meßergebnissen von unterkritisch umströmten Doppelanordnungen

Wie die Untersuchungen an unterkritisch umströmten Anordnungen und vorliegende Ergebnisse bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung belegen, treten maximale Beanspruchungen in der Regel nur auf, wenn sich der Meßzylinder im turbulenten Nachlauf des stromaufwärts liegenden Zylinders befindet oder wenn er in der Nähe des Nachlaufendes angeordnet ist. Im unterkritischen Reynoldszahlgebiet konnte eine Beeinflussung der kritischen Windrichtung durch den Massendämpfungsparameter nachgewiesen werden (siehe Abschnitte 4 und 5).

Unter der Annahme einer linearen Eigenform ergibt sich die bezogene Auslenkung des Meßzylinders zu:

$$\tilde{\eta} = \tilde{y}/d_1 = 0,143 * \tilde{c}_q / (m_{\text{eff}} * S_{r0}^2)$$

Da man von einem konstanten Massendämpfungsparameter $m_{\text{eff}} = 62$ bzw. 58 während der Messungen ausgehen kann, gilt der Zusammenhang:

$$\tilde{\eta} \sim \tilde{c}_q / S_{r0}^2$$

Auf den Abbildungen 58 bis 60 sind \tilde{c}_q / S_{r0}^2 - Werte bei maximalen Auslenkungen über dem dimensionslosen Zylinderabstand aufgetragen. Das betrifft Meßergebnisse aus dem unterkritischen und modellierten transkritischen Reynoldszahlgebiet.

Symbol	Re-Bereich	m_{α}
□	unterkritisch	26
○	unterkritisch	63
●	transkritisch	62

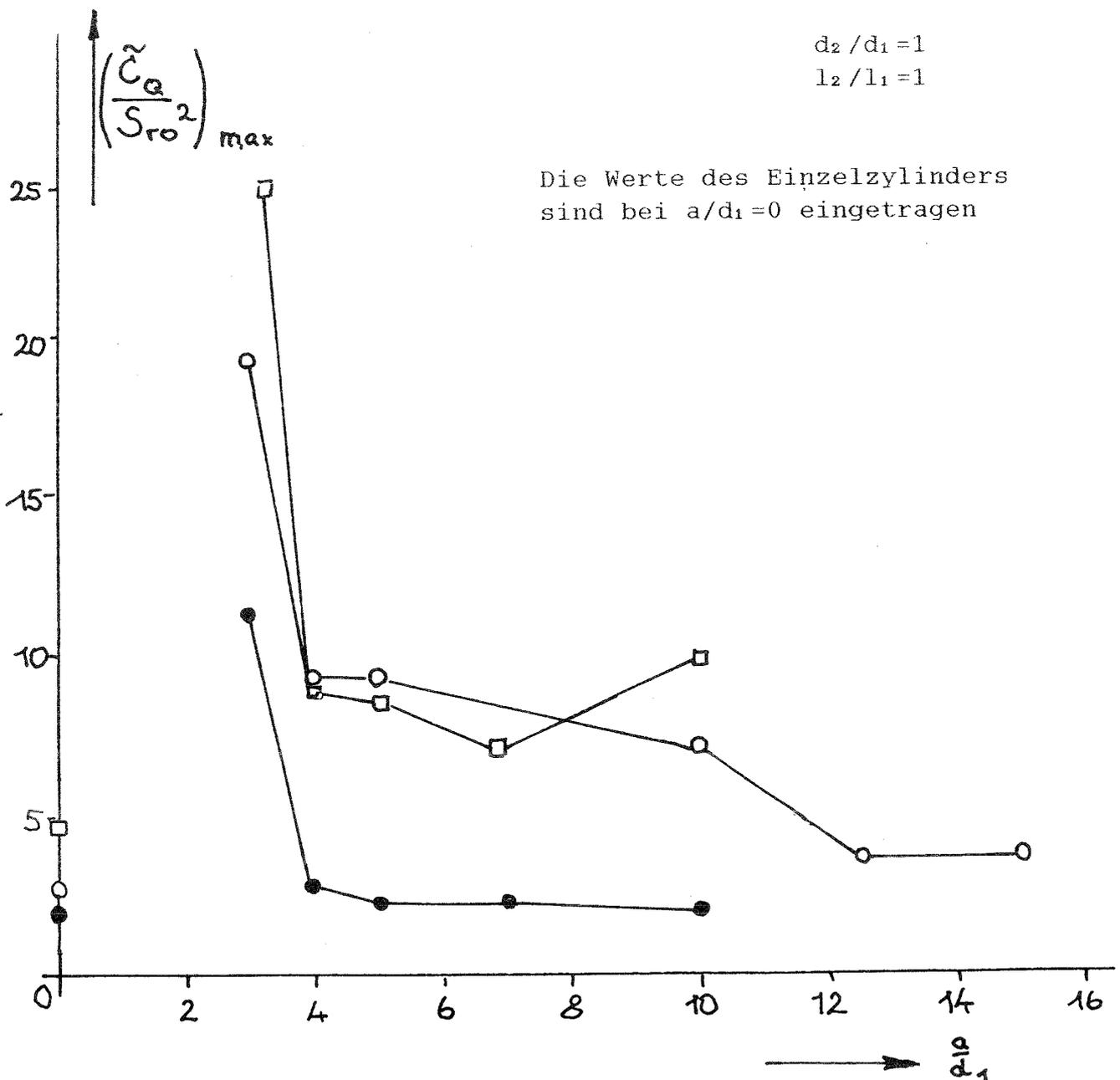


Abb.58: Vergleich maximaler unterkritischer und transkritischer Werte für die Doppelanordnung $d_2/d_1=1$ und $l_2/l_1=1$

Symbol	Re-Bereich	$m_{\mathcal{R}}$
□	unterkritisch	26
○	unterkritisch	63
●	transkritisch	62

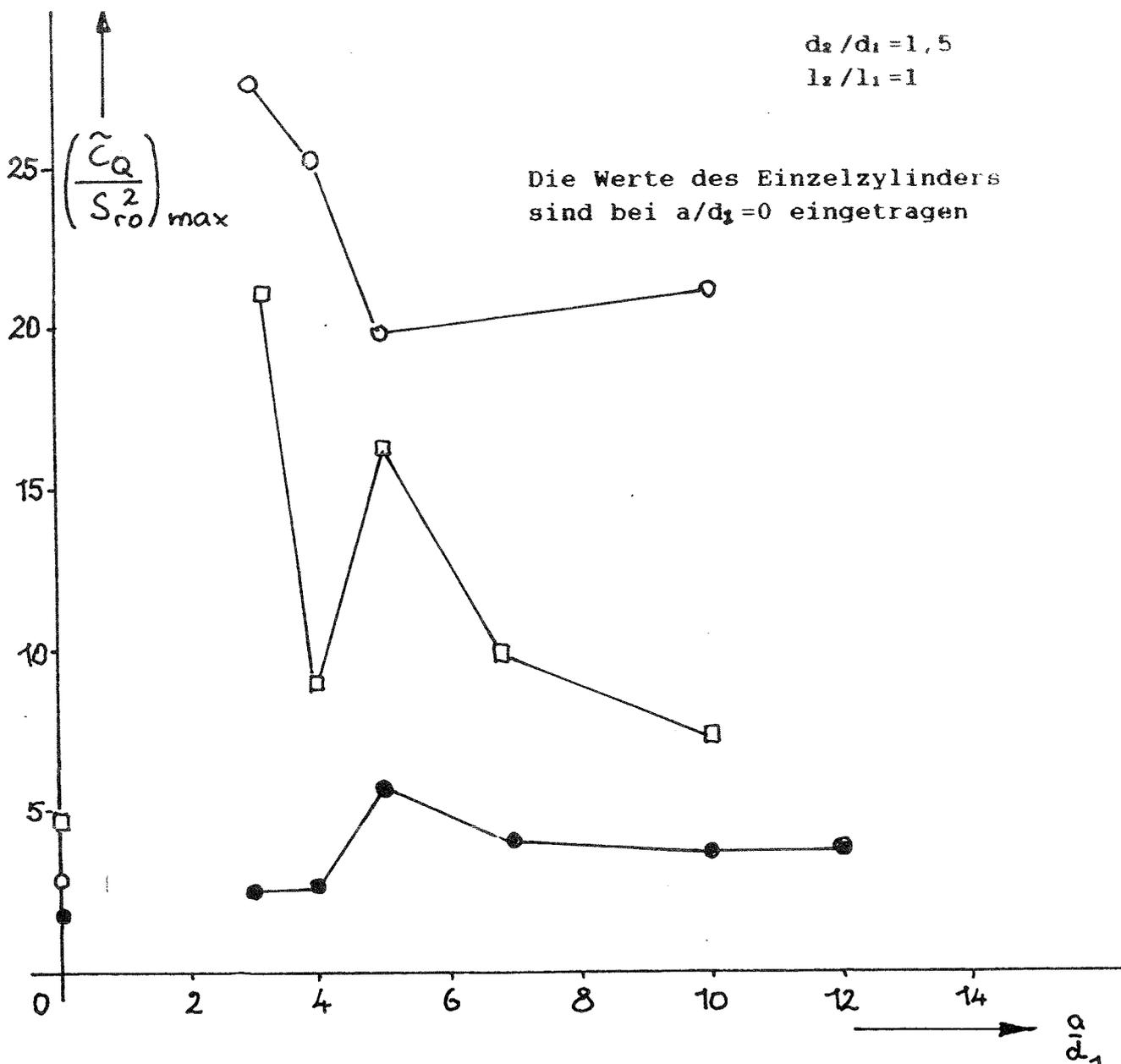


Abb.59: Vergleich maximaler unterkritischer und transkritischer Werte für die Doppelanordnung $d_2/d_1 = 1,5$ und $l_2/l_1 = 1$

Symbol	Re-Bereich	$m\mathfrak{S}$
□	unterkritisch	26
○	unterkritisch	63
●	transkritisch	62

$$d_2/d_1 = 1,5$$

$$l_2/l_1 = 1$$

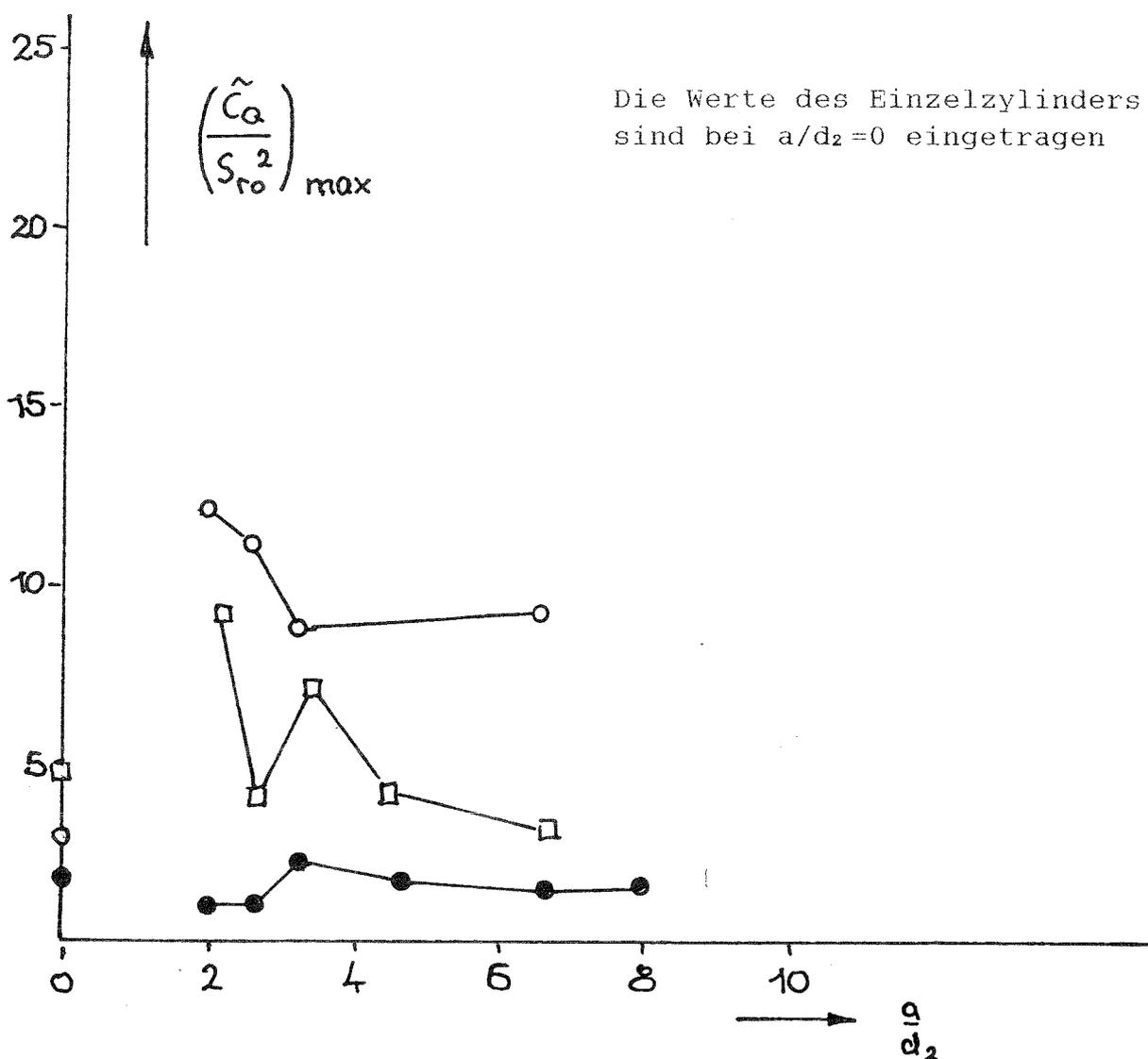


Abb.60: Vergleich maximaler unterkritischer und transkritischer Werte für die Doppelanordnung $d_2/d_1 = 1,5$ und $l_2/l_1 = 1$ in Abhängigkeit von a/d_2

- gleiche Durchmesser ($d_2/d_1=1, l_2/l_1=1$)

Die Meßergebnisse $=f(a/d_1)$ sind auf Abbildung 58 dargestellt. Es ergeben sich bei unterkritischer und transkritischer Umströmung ähnliche qualitative Verläufe. Im unterkritischen Reynoldszahlbereich ist ein Einfluß des Massendämpfungsparameters bei $m_s = 26$ bzw. 63 nicht erkennbar.

- verschieden Durchmesser ($d_2/d_1=1,5; l_2/l_1=1$)

Dazu sind die Meßergebnisse über a/d_1 (Abb.59) und a/d_2 (Abb.60) aufgetragen. Wie aus Abbildung 59 ersichtlich, ergeben sich zwischen unterkritischer und transkritischer Umströmung keine Ähnlichkeiten im qualitativen Kurvenverlauf. Im unterkritischen Fall ist der Einfluß des Massendämpfungsparameters $m_s = 26$ bzw. 63 ausgeprägt. In der Regel nimmt die Beanspruchung mit m_s stark zu. Dies ist eine gegensätzliche Tendenz zum Einzelzylinder, bei dem ja eine Abnahme des Querkraftbeiwertes \tilde{c}_Q mit m_s zu verzeichnen war.

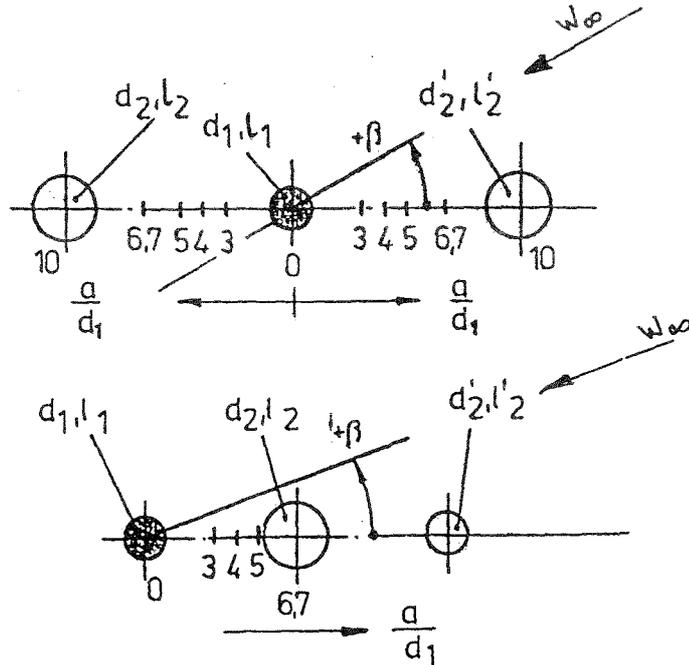
7. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Dreierreihenordnungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

In diesem Abschnitt werden nachlauferregte Schwingungen von "Dreierreihenordnungen in Reihe" des unterkritisch umströmten Kreiszylinders behandelt. Ermittelt wurden die Strouhalzahlen, die dynamischen Beiwerte und die bezogenen Auslenkungen in Resonanz bei unterschiedlichen Anströmbedingungen (Abstand, Anströmwinkel). Zusätzlich wurde der Einfluß verschiedener Massendämpfungsparameter auf die Meßergebnisse untersucht.

Die im mittleren Windkanal erzielten Ergebnisse über die ermittelten Strouhalzahlen St_0 und Querkraftbeiwerte \tilde{c}_Q werden in Tabellenform angegeben. Die bezogene Auslenkungen $\tilde{\eta}$ werden in Diagrammform dargestellt.

Nachstehend sind die untersuchten Modellanordnungen angegeben. Die Anströmwinkel konnten von $\beta=0^\circ \dots 360^\circ$ eingestellt werden.

Dreieranordnung in Reihe



Die Variantenübersicht "Dreieranordnung in Reihe" enthält die nachstehende Tabelle. Die Abmessungen der Meß- und Blendenzylinder sind im Abschnitt 5 angegeben.

Var.	$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{d_2'}{d_1}$	$\frac{l_2}{l_1}$	$\frac{l_2'}{l_1}$	f_0 [Hz]	ν	m, g	$\frac{a}{d_1}$					Bemerkung zum Standort des Meßzylinders
								3	4	5	6,7	10	
1 2.1. 2	1	1	1	1	65,4 65,8	0,056 0,12	31 63	x	x	x	x	x	Mitte
1 2.2. 2	1	1	1	1	67,5 65,8	0,019 0,12	10 63	x	x	x	x		vorn/hinten
1 2.3.2 3	1,5	1,5	2	2	68,5 67,5 65,8	0,016 0,019 0,12	8 10 63	x	x			x	Mitte
1 2.4. 2	1,5	1	2	1	67,6 65,8	0,025 0,12	12 63	x	x	x	x		vorn/hinten

Die Versuchsauswertung erfolgte mit folgender Methode:

1. Resonanzstrouhalzahlen werden aus der Eigenfrequenz des Meßzylinders (sie ändert sich mit der Dämpfung) und den gemessenen Staudrücken berechnet.
2. Querkraftbeiwerte werden ermittelt aus: Dynamischer Beanspruchung, dazugehörigem Resonanzstaudruck und aktuellem logarithmischem Dämpfungsdekrement.
3. Bezogene Auslenkungen ergeben sich aus dynamischer Beanspruchung und Federkonstante.

Verteilt über den Untersuchungszeitraum wurden wiederholt Eigenfrequenz, Dämpfung und Querkraftbeiwert des Einzelzylinders gemessen bzw. aus den Meßwerten berechnet. Es wurden nur die Querkraftbeiwerte angegeben, da die Längsbewegung meist viel kleiner war.

Zur Größenordnung der Querkraftbeiwerte wurden schon in den vorhergehenden Abschnitten Aussagen getroffen, die über die Kompliziertheit dieser Problematik berichten. Auf Abb. 61 sind Meßergebnisse bei Variation des Masendämpfungsparameters angegeben. Es zeigt sich, daß die Querkraftbeiwerte für die Einzelanordnung mit $m \cdot S \cdot S_{r0}^2$ abnehmen, während sie für die Mehrfachanordnung eher zunehmen.

7.1 Versuchsergebnisse

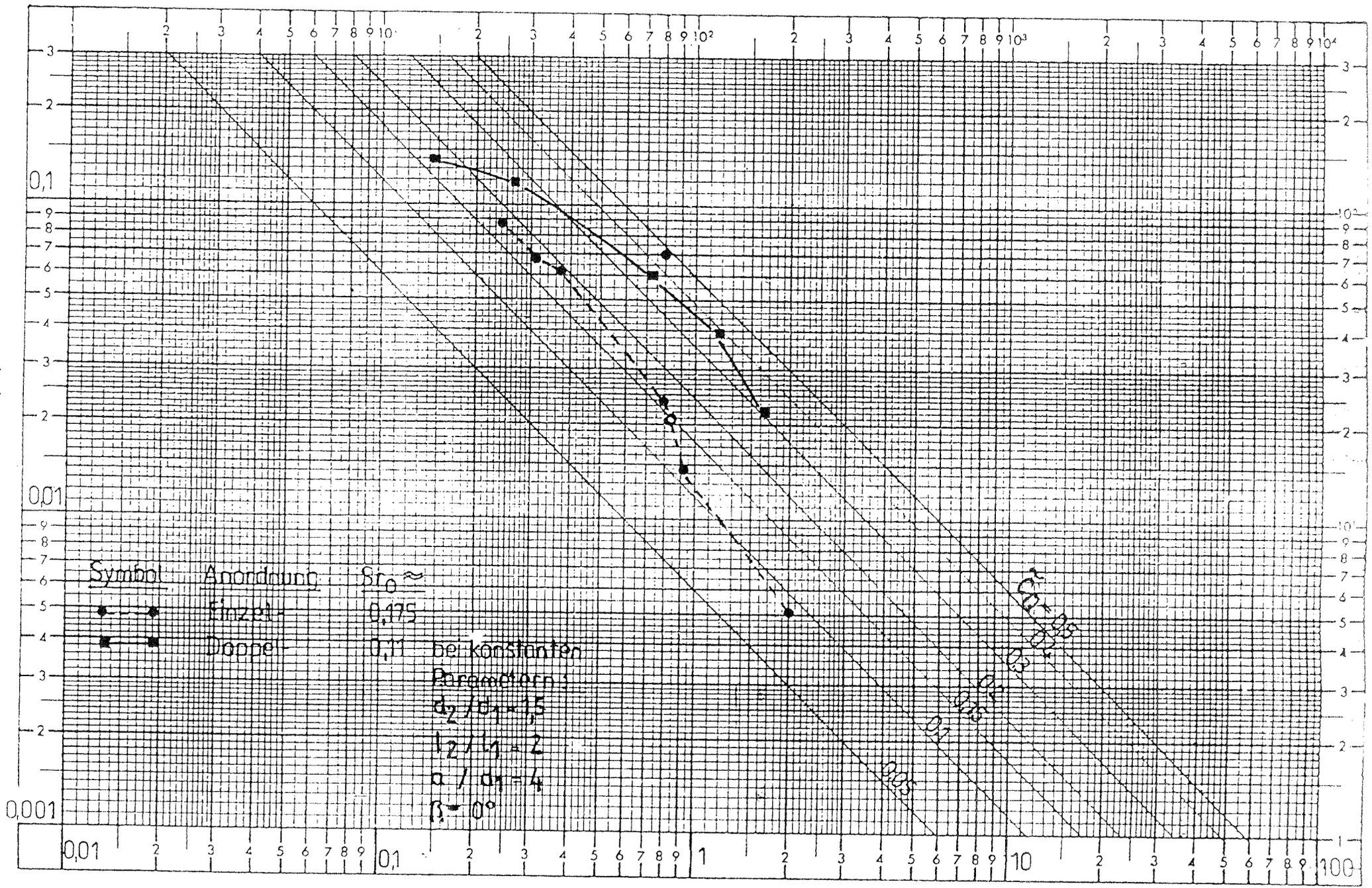
Aus den gemessenen maximalen Querkraften und Staudrücken werden berechnet, in Tabellenform dargestellt und verglichen:

- die Strouhalzahl
(bei maximaler Kraft)

$$S_{r0} = f_0 \cdot d_1 / w$$

- der effektive
Querkraftbeiwert

$$\tilde{C}_Q = 2 \cdot \tilde{F}_Q \cdot S / (l_1 \cdot d_1 \cdot q \cdot \pi)$$



$\longrightarrow m_j \cdot Sr_0^2$

Abb. 61: Vergleich von Meßergebnissen bei Variation des Massendämpfungsparameters

- die effektive
bezogene Auslenkung
(bei maximaler Kraft)

$$\tilde{\eta} = \tilde{y}/d_1 = \tilde{F}_Q / c_r$$

7.1.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Dreieranordnung in Reihe

- Variante 2.1.1 ($m_{\mathcal{S}} = 31$) Abb. 62



$$d_2/d_1 = d_{2'}/d_1 = 1 \quad l_2/l_1 = l_{2'}/l_1 = 1 \quad 3 < (a/d_1) < 10 \quad 0^\circ < \beta < 90^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,13 < S_{r_0} < 0,185$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,36$. Die Werte liegen also etwa wie bei der entsprechenden Doppelanordnung.

- Variante 2.1.2 (wie oben, aber $m_{\mathcal{S}} = 63$) Abb. 63

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < S_{r_0} < 0,19$ (bei $\beta = 90^\circ$). Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,37$.

- Variante 2.2.1 ($m_{\mathcal{S}} = 10$) Abb. 64



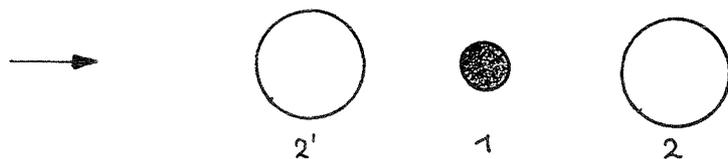
$$d_2/d_1 = d_{2'}/d_1 = 1 \quad l_2/l_1 = l_{2'}/l_1 = 1 \quad 3 < (a/d_1) < 6,7 \quad 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen bei $0,09 < Sr_0 < 0,17$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,25$. Auffällig ist, daß die Strouhalzahlen bei $\beta = 180^\circ$ kleiner als beim Einzelzylinder sind.

- Variante 2.2.2 (wie oben, aber $m_{\mathcal{A}} = 63$) Abb. 65

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < Sr_0 < 0,17$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,46$. Auch hier sind die Strouhalzahlen bei $\beta = 180^\circ$ kleiner als beim Einzelzylinder. Allerdings treten hier nicht die maximalen Beanspruchungen auf.

- Variante 2.3.1/2.3.2 ($m_{\mathcal{A}} = 8/10$) Abb. 66 und 67

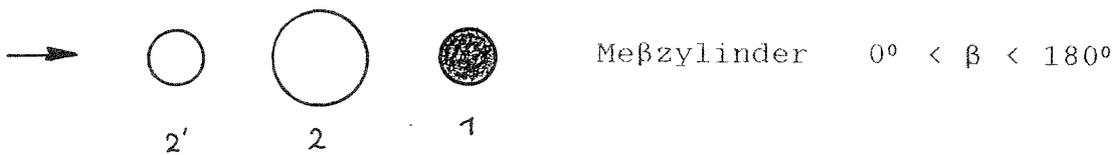


$$d_2/d_1 = d_2'/d_1 = 1,5 \quad l_2/l_1 = l_2'/l_1 = 2 \quad 3 < (a/d_1) < 10 \quad 0^\circ < \beta < 90^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,10 < Sr_0 < 0,21$ ($\beta = 90^\circ$). Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,30$, wobei die maximalen Werte bei $a/d_1 = 3$ auftreten.

- Variante 2.3.3 (wie oben, aber $m_{\mathcal{A}} = 63$) Abb. 68

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,10 < Sr_0 < 0,21$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,47$. Die Werte stellen sich also in der Größenordnung wie bei der vergleichbaren Doppelanordnung ein.

- Variante 2.4.1 ($m_{\text{a}} = 12$) Abb.69

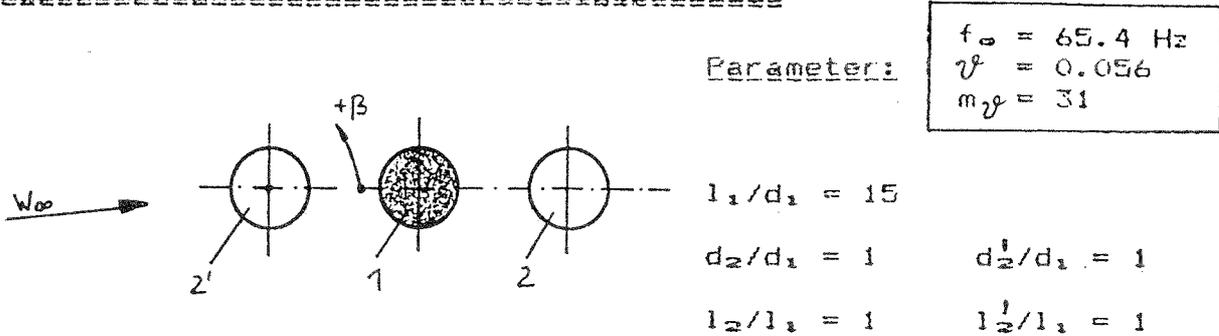
$$d_2/d_1 = 1,5 \quad d_2'/d_1 = 1 \quad l_2/l_1 = 2 \quad l_2'/l_1 = 1 \quad 3 < (a/d_1) < 6,7$$

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,10 < Sr_0 < 0,21$ ($\beta = 90^\circ$). Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,35$.

- Variante 2.4.2 (Wie oben, aber $m_{\text{a}} = 63$) Abb.70

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,10 < Sr_0 < 0,20$ (bei $\beta = 90^\circ$). Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,43$. Die maximalen Beanspruchungen sind kleiner als bei der Anordnung Variante 2.3.3 (kleiner Zylinder in der Mitte), weil diese bei $\beta > 0^\circ$ auftreten und dort schon höhere Strouhalzahlen vorliegen.

Abb.62: Versuchsergebnisse zur DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.1.1):



Parameter:
 $f_\infty = 65.4 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.056$
 $m_\nu = 31$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_\infty = 0.173$ $\zeta_\infty = 0.11$ $\tilde{\eta} = 0.0145$

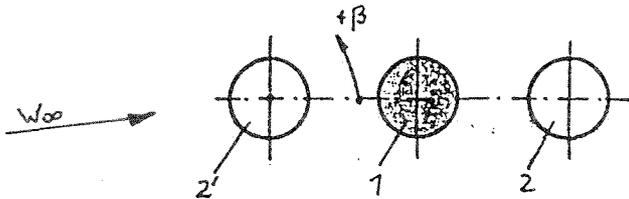
a/d ₁	β [°]	Sr _∞	ζ_∞	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.130	0.37	0.083	0.083
	5	0.129	0.02	0.004	
	5	0.170	0.03	0.004	
	10	0.183	0.03	0.003	
	15	0.113	0.02	0.005	
	15	0.200	0.02	0.002	
	20	0.198	0.04	0.004	
	25	0.177	0.04	0.004	
	30	0.170	0.05	0.007	
	35	0.170	0.08	0.011	
	40	0.174	0.07	0.009	
	45	0.186	0.11	0.012	
	50	0.189	0.11	0.012	
	55	0.192	0.12	0.013	
	60	0.188	0.14	0.015	
	65	0.192	0.13	0.014	
	70	0.190	0.15	0.016	
75	0.196	0.14	0.014		
80	0.194	0.17	0.017		
85	0.192	0.18	0.019		
90	0.191	0.22	0.024		
4	0	0.162	0.09	0.014	0.035
	5	0.165	0.20	0.028	
	10	0.169	0.19	0.025	
	15	0.172	0.15	0.020	
	20	0.178	0.13	0.016	
	25	0.161	0.13	0.019	
	25	0.184	0.10	0.011	
	30	0.163	0.24	0.035	
	35	0.171	0.21	0.028	
	40	0.173	0.15	0.019	
	45	0.179	0.13	0.016	
	50	0.183	0.11	0.013	
	90	0.183	0.10	0.012	
90	0.196	0.12	0.012		

Fortsetzung Variante 2.1.1

a/d_1	β [°]	Sr_α	ζ_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
5	0	0.173	0.15	0.019	0.019
	90	0.179	0.09	0.011	
6.7	0	0.154	0.10	0.016	0.016
	0	0.181	0.12	0.014	
	90	0.175	0.10	0.012	
10	0	0.162	0.11	0.016	0.032
	5	0.162	0.11	0.016	
	10	0.155	0.16	0.025	
	15	0.164	0.22	0.032	
	20	0.184	0.13	0.015	
	25	0.171	0.10	0.013	
	30	0.171	0.10	0.013	
	35	0.173	0.10	0.013	
90	0.173	0.10	0.013		

Abb. 63: Versuchsergebnisse zur DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.1.2):

=====



Parameter:

$f_{\omega} = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1 \quad d_2^i/d_1 = 1$

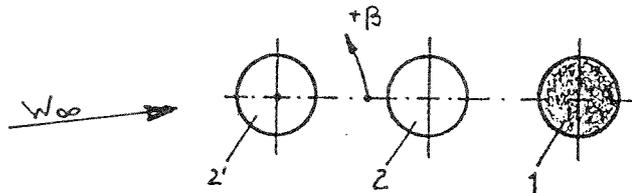
$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^i/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_{\omega} = 0.179 \quad z_{\omega} = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/a_1	β [°]	Sr_{ω}	z_{ω}	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{max}$
3	0	0.126	0.37	0.044	0.044
	5	0.123	0.01	0.002	
	10	0.127	0.02	0.002	
	20	0.181	0.03	0.002	
	25	0.162	0.04	0.003	
	30	0.181	0.06	0.003	
4	0	0.154	0.10	0.008	0.020
	5	0.167	0.23	0.015	
	10	0.168	0.20	0.013	
	25	0.159	0.18	0.013	
	30	0.166	0.29	0.020	
	35	0.173	0.24	0.015	
5	0	0.155	0.14	0.011	0.026
	20	0.159	0.18	0.013	
	25	0.160	0.36	0.026	
	30	0.173	0.17	0.011	
	90	0.189	0.08	0.004	
10	0	0.162	0.13	0.010	0.015
	10	0.161	0.15	0.011	
	15	0.164	0.22	0.015	
	20	0.177	0.11	0.007	
	90	0.189	0.09	0.005	

Abb.64: Versuchsergebnisse zur DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.2.1):

=====



Parameter:

$f_a = 67.5 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.019$
 $m_\nu = 10$

$l_2/d_2 = 15$

$d_2/d_1 = 1$ $d'_2/d_1 = 1$

$l_2/l_1 = 1$ $l'_2/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.177$ $\xi_a = 0.165$ $\tilde{\eta} = 0.068$

a/d ₁	β [°]	Sr _a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.127	0.15	0.121	0.270
	5	0.151	0.07	0.042	
	9	0.089	0.05	0.089	
	10	0.089	0.16	0.270	
	11	0.089	0.01	0.023	
	60	0.158	0.25	0.129	
	90	0.174	0.21	0.090	
	170	0.178	0.10	0.043	
	175	0.155	0.25	0.134	
	180	0.153	0.23	0.130	
4	0	0.162	0.04	0.021	0.090
	10	0.171	0.06	0.026	
	50	0.165	0.19	0.087	
	60	0.166	0.17	0.076	
	90	0.179	0.16	0.062	
	120	0.191	0.15	0.053	
	150	0.170	0.17	0.075	
	160	0.162	0.19	0.090	
	170	0.158	0.17	0.084	
	175	0.155	0.16	0.086	
	180	0.152	0.16	0.086	
5	0	0.154	0.04	0.022	0.069
	90	0.179	0.15	0.060	
	180	0.162	0.14	0.069	

Fortsetzung Variante 2.2.1

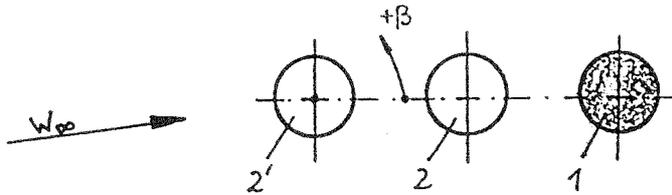
a/d_s	β [°]	Sr_a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
6.7	0	0.135	0.03	0.022	0.089
	5	0.135	0.04	0.027	
	10	0.153	0.04	0.022	
	15	0.164	0.07	0.031	
	20	0.171	0.12	0.053	
	25	0.173	0.21	0.089	
	30	0.174	0.19	0.080	
	35	0.174	0.19	0.080	
	40	0.170	0.15	0.067	
	45	0.170	0.15	0.067	
	50	0.171	0.16	0.067	
	55	0.174	0.15	0.062	
	60	0.173	0.16	0.067	
	65	0.173	0.15	0.062	
	70	0.174	0.15	0.062	
	75	0.174	0.15	0.062	
	80	0.174	0.15	0.062	
	85	0.174	0.16	0.067	
	90	0.174	0.16	0.067	
	95	0.177	0.14	0.058	
	100	0.179	0.15	0.058	
	105	0.179	0.15	0.058	
	110	0.179	0.15	0.058	
	115	0.177	0.17	0.067	
	120	0.179	0.14	0.053	
	125	0.179	0.13	0.049	
	130	0.174	0.16	0.067	
	135	0.174	0.16	0.067	
	140	0.174	0.16	0.067	
	145	0.171	0.16	0.067	
150	0.170	0.15	0.067		
155	0.170	0.15	0.067		
160	0.170	0.15	0.067		
165	0.168	0.15	0.067		
170	0.168	0.14	0.062		
175	0.173	0.13	0.053		
180	0.171	0.16	0.067		

Abb.65: Versuchsergebnisse zur
DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.2.2):

=====

$f_a = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

Parameter:



$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1 \quad d_2'/d_1 = 1$

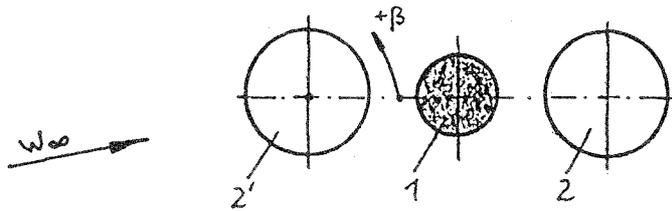
$l_2/l_1 = 1 \quad l_2'/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.179 \quad \epsilon_a = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/d ₁	β [°]	Sr _a	ϵ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.121	0.46	0.059	0.059
	10	-	-	0.002	
	60	0.167	0.23	0.015	
	90	0.180	0.11	0.006	
	175	-	-	0.001	
	180	0.132	0.02	0.003	
4	0	0.145	0.12	0.011	0.026
	25	0.149	0.23	0.020	
	30	0.155	0.25	0.020	
	35	0.169	0.40	0.026	
	40	0.174	0.25	0.015	
	60	0.169	0.13	0.009	
	90	0.187	0.13	0.007	
	175	0.156	0.23	0.017	
	180	0.150	0.13	0.011	
5	0	0.147	0.07	0.006	0.013
	90	0.194	0.09	0.004	
	175	0.168	0.16	0.011	
	180	0.167	0.20	0.013	
6.7	0	0.150	0.05	0.004	0.011
	90	0.191	0.10	0.005	
	180	0.172	0.17	0.011	

Abb.66: Versuchsergebnisse zur
DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.3.1):

=====



Parameter:

$f_a = 68.5 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.016$
 $m_{\nu} = 8$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2^1/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 2 \quad l_2^1/l_1 = 2$

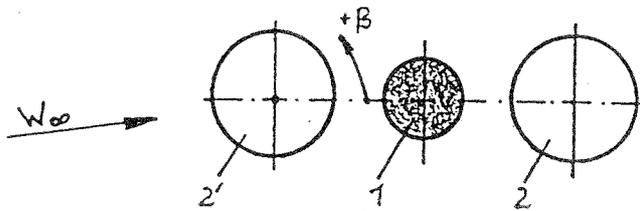
Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.174 \quad \zeta_a = 0.17 \quad \tilde{\eta} = 0.0865$

a/d_1	β [°]	Sr_a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{max}$
3	0	0.101	0.08	0.118	0.416
	5	0.104	0.07	0.096	
	10	0.113	0.03	0.033	
	15	0.106	0.30	0.401	
	16	0.103	0.29	0.416	
	20	0.106	0.26	0.346	
	25	0.136	0.21	0.175	
	30	0.150	0.26	0.171	
	35	0.168	0.19	0.102	
	40	0.182	0.21	0.096	
	45	0.193	0.17	0.070	
	50	0.205	0.19	0.068	
	60	0.214	0.17	0.056	
	70	0.218	0.16	0.050	
80	0.216	0.16	0.051		
90	0.214	0.16	0.052		
4	0	0.107	0.13	0.169	0.448
	5	0.108	0.18	0.235	
	10	0.079	0.18	0.448	
	15	0.106	0.23	0.308	
	20	0.116	0.14	0.153	
	25	0.123	0.11	0.111	
	25	0.139	0.24	0.189	
	30	0.144	0.22	0.163	
	35	0.151	0.17	0.117	
	40	0.165	0.14	0.079	
	45	0.169	0.14	0.076	
	50	0.178	0.16	0.077	
	60	0.189	0.15	0.066	
	90	0.198	0.16	0.064	

20

Abb.67: Versuchsergebnisse zur
DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.3.2):

=====



Parameter:

$f_a = 67.5 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.019$
 $m_{\nu} = 10$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2'/d_1 = 1.5$

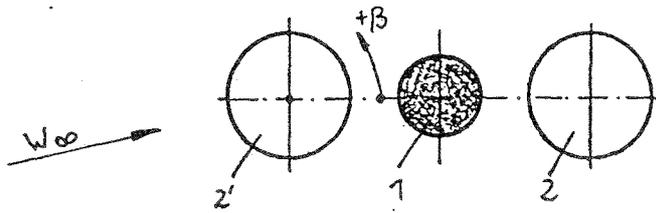
$l_2/l_1 = 2 \quad l_2'/l_1 = 2$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.177 \quad \xi_a = 0.165 \quad \tilde{\eta} = 0.068$

a/d ₁	β [°]	Sr _a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
4	5	0.107	0.17	0.140	0.408
	10	0.082	0.28	0.408	
5	0	0.117	0.11	0.105	0.141
	2	0.113	0.14	0.141	
	90	0.185	0.17	0.064	
6.7	0	0.123	0.16	0.133	0.133
	90	0.182	0.17	0.067	
10	0	0.129	0.19	0.149	0.149
	5	0.127	0.16	0.125	
	10	0.128	0.16	0.123	
	15	0.128	0.09	0.072	
	15	0.160	0.14	0.068	
	20	0.168	0.17	0.077	
	25	0.173	0.16	0.066	
	30	0.172	0.14	0.063	
	90	0.182	0.16	0.065	

Abb.68: Versuchsergebnisse zur
DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.3.3):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m\nu = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2'/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 2 \quad l_2'/l_1 = 2$

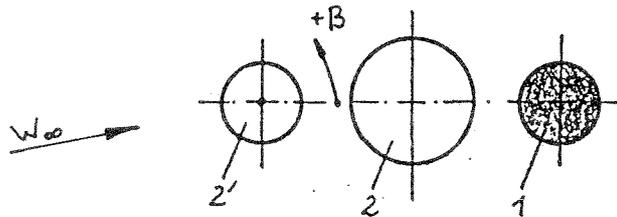
Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179 \quad \zeta_0 = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.099	0.32	0.061	0.061
	5	0.099	0.30	0.057	
	10	0.156	-	-	
	30	0.210	0.07	0.003	
	90	0.198	0.09	0.004	
4	0	0.105	0.39	0.065	0.065
	5	0.103	0.25	0.044	
	10	0.134	0.13	0.013	
	15	0.131	0.16	0.017	
	20	0.137	0.33	0.033	
	25	0.135	0.32	0.033	
	30	0.139	0.34	0.033	
	35	0.146	0.30	0.026	
	40	0.153	0.14	0.011	
	90	0.209	0.10	0.004	
5	0	0.108	0.38	0.061	0.061
	5	0.107	0.35	0.057	
	10	0.106	0.26	0.044	
	15	0.108	0.25	0.039	
	20	0.113	0.30	0.044	
	25	0.114	0.21	0.031	
	30	0.123	0.09	0.011	
	35	0.130	0.03	0.003	
	90	0.198	0.09	0.004	
6.7	0	0.119	0.41	0.054	0.054
	5	0.123	0.37	0.046	
	10	0.121	0.31	0.039	
	15	0.119	0.28	0.037	
	20	0.121	0.26	0.033	
	25	0.123	0.07	0.009	
	90	0.189	0.08	0.004	

Fortsetzung Variante 2.3.3

a/d_1	β [°]	Sr_α	ξ_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
10	0	0.127	0.47	0.054	0.054
	5	0.127	0.45	0.052	
	10	0.126	0.37	0.044	
	15	0.125	0.20	0.024	
	20	0.128	0.04	0.005	
	20	0.184	0.09	0.005	
	90	0.188	0.09	0.005	

Abb. 69: Versuchsergebnisse zur DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.4.1):



Parameter:

$f_0 = 67.6 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.025$
 $m_\nu = 12$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2'/d_1 = 1$

$l_2/l_1 = 2 \quad l_2'/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.177 \quad \zeta_0 = 0.20 \quad \tilde{\eta} = 0.062$

a/d ₁	β [°]	Sr ₀	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.111	0.02	0.016	0.267
	10	0.111	0.03	0.022	
	15	0.108	0.03	0.022	
	20	0.099	0.14	0.133	
	25	0.101	0.29	0.267	
	30	0.111	0.34	0.267	
	35	0.112	0.32	0.244	
	40	0.113	0.12	0.089	
	50	0.138	0.45	0.222	
	55	0.169	0.20	0.067	
	60	0.169	0.27	0.089	
	65	0.169	0.27	0.089	
	70	0.169	0.33	0.111	
	75	0.199	0.28	0.067	
	80	0.199	0.28	0.067	
	85	0.199	0.28	0.067	
	90	0.207	0.30	0.067	
	95	0.216	0.24	0.049	
	100	0.216	0.24	0.049	
	105	0.216	0.24	0.049	
110	0.227	0.17	0.031		
145	0.216	0.04	0.009		
150	0.192	0.03	0.009		
155	0.185	0.03	0.009		
160	0.179	0.08	0.022		
165	0.169	0.07	0.022		
170	0.147	0.13	0.059		
175	0.136	0.43	0.222		
180	0.127	0.38	0.222		

Fortsetzung Variante 2.4.1

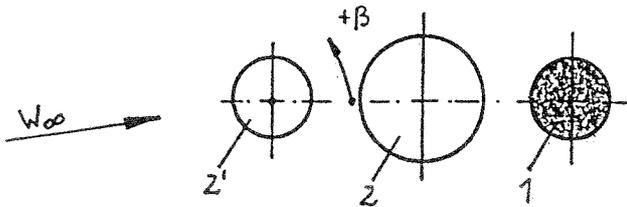
a/d_1	β [°]	Sr_{σ}	$\bar{\epsilon}_{\sigma}$	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
4	0	0.147	0.05	0.024	0.111
	5	0.134	0.05	0.027	
	10	0.135	0.05	0.027	
	15	0.136	0.04	0.022	
	20	0.138	0.06	0.031	
	25	0.134	0.21	0.111	
	30	0.124	0.18	0.111	
	35	0.148	0.21	0.089	
	40	0.153	0.22	0.089	
	45	0.154	0.20	0.080	
	50	0.156	0.20	0.080	
	55	0.158	0.18	0.067	
	60	0.163	0.19	0.067	
	65	0.167	0.22	0.076	
	70	0.174	0.23	0.071	
	75	0.177	0.22	0.067	
	80	0.180	0.23	0.067	
	85	0.182	0.22	0.062	
	90	0.184	0.23	0.066	
	95	0.193	0.24	0.062	
	100	0.199	0.24	0.058	
	105	0.204	0.23	0.053	
	110	0.205	0.22	0.049	
	115	0.205	0.24	0.053	
	120	0.205	0.24	0.053	
	125	0.204	0.23	0.053	
	130	0.200	0.23	0.053	
	135	0.197	0.22	0.053	
	140	0.193	0.21	0.053	
	145	0.185	0.19	0.053	
150	0.175	0.19	0.058		
155	0.168	0.20	0.067		
160	0.160	0.18	0.067		
165	0.156	0.17	0.067		
170	0.144	0.16	0.074		
175	0.139	0.17	0.084		
180	0.142	0.19	0.089		

Fortsetzung Variante 2.4.1

a/d_1	β [°]	sr_0	z_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
5	0	0.136	0.07	0.036	0.089
	5	0.133	0.06	0.031	
	10	0.136	0.06	0.031	
	15	0.138	0.08	0.040	
	20	0.134	0.14	0.075	
	25	0.115	0.09	0.067	
	30	0.133	0.08	0.044	
	30	0.163	0.22	0.080	
	35	0.169	0.24	0.080	
	40	0.169	0.24	0.080	
	45	0.164	0.23	0.080	
	50	0.166	0.23	0.080	
	55	0.166	0.22	0.076	
	60	0.169	0.20	0.067	
	65	0.169	0.24	0.080	
	70	0.167	0.26	0.089	
	75	0.174	0.25	0.080	
	80	0.174	0.25	0.080	
	85	0.172	0.21	0.067	
	90	0.180	0.25	0.073	
	95	0.185	0.24	0.067	
	100	0.185	0.22	0.062	
	105	0.185	0.22	0.062	
	110	0.183	0.22	0.062	
	115	0.185	0.19	0.053	
	120	0.192	0.24	0.062	
	125	0.192	0.21	0.053	
	130	0.185	0.22	0.062	
	135	0.185	0.22	0.062	
	140	0.185	0.22	0.062	
145	0.174	0.20	0.062		
150	0.173	0.20	0.062		
155	0.169	0.19	0.062		
160	0.167	0.18	0.062		
165	0.160	0.17	0.062		
170	0.152	0.16	0.066		
175	0.150	0.18	0.076		
180	0.148	0.18	0.080		

a/d_1	β [°]	Sr_a	ξ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
6.7	0	0.141	0.06	0.027	0.072
	5	0.143	0.06	0.029	
	10	0.138	0.07	0.033	
	15	0.141	0.09	0.044	
	20	0.114	0.08	0.060	
	20	0.151	0.11	0.044	
	25	0.179	0.15	0.044	
	30	0.169	0.20	0.067	
	35	0.169	0.20	0.067	
	40	0.169	0.20	0.067	
	45	0.171	0.20	0.067	
	50	0.171	0.20	0.067	
	55	0.169	0.20	0.067	
	60	0.169	0.20	0.067	
	65	0.169	0.20	0.067	
	70	0.174	0.21	0.067	
	75	0.174	0.21	0.067	
	80	0.174	0.21	0.067	
	85	0.174	0.21	0.067	
	90	0.175	0.23	0.072	
	95	0.174	0.21	0.067	
	100	0.174	0.21	0.067	
	105	0.177	0.23	0.071	
	110	0.177	0.23	0.071	
	115	0.177	0.23	0.071	
	120	0.177	0.23	0.071	
	125	0.179	0.24	0.071	
	130	0.177	0.22	0.067	
	135	0.174	0.21	0.067	
	140	0.174	0.23	0.071	
145	0.174	0.20	0.062		
150	0.169	0.21	0.071		
155	0.168	0.18	0.062		
160	0.168	0.18	0.062		
165	0.162	0.18	0.067		
170	0.162	0.18	0.067		
175	0.162	0.18	0.067		
180	0.161	0.19	0.071		

Abb.70: Versuchsergebnisse zur
DREIERANORDNUNG IN REIHE (Variante 2.4.2):



Parameter:

$$f_a = 65.8 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.12$$

$$m_\nu = 63$$

$$l_1/d_1 = 15$$

$$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2^1/d_1 = 1$$

$$l_2/l_1 = 2 \quad l_2^1/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.179$ $\zeta_a = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

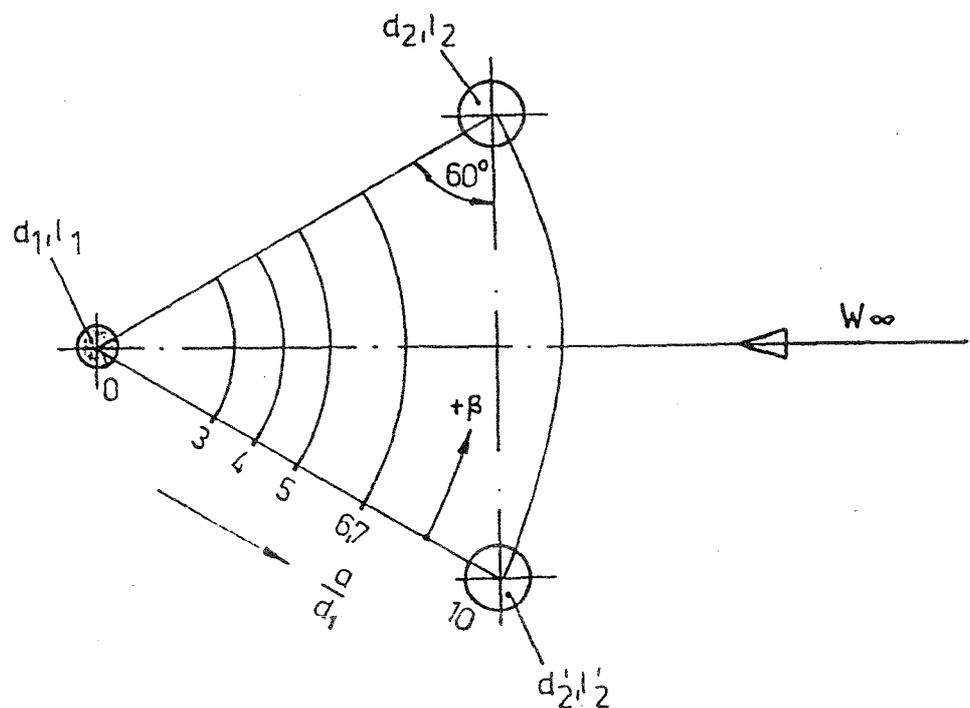
a/d_1	β [°]	Sr_a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.102	0.03	0.006	0.026
	60	0.162	0.30	0.022	
	65	0.164	0.37	0.026	
	70	0.169	0.40	0.026	
	75	0.185	0.28	0.015	
	80	0.188	0.25	0.013	
	85	0.197	0.22	0.011	
	90	0.209	0.11	0.005	
180	-	-	-	0.002	
4	0	0.136	0.06	0.007	0.033
	20	0.112	0.05	0.007	
	25	0.115	0.12	0.017	
	30	0.120	0.25	0.033	
	35	0.123	0.16	0.020	
	40	0.127	0.11	0.013	
	90	0.195	0.10	0.005	
	180	0.136	0.03	0.003	
5	0	0.136	0.11	0.011	0.024
	20	0.122	0.19	0.024	
	25	0.122	0.12	0.015	
	30	0.123	0.07	0.009	
	90	0.191	0.10	0.005	
	180	0.152	0.09	0.007	
6.7	0	0.130	0.06	0.007	0.031
	15	0.131	0.10	0.011	
	20	0.112	0.21	0.031	
	25	0.121	0.10	0.013	
	30	0.131	0.04	0.004	
	90	0.184	0.09	0.005	
	180	0.166	0.10	0.007	

8. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Dreieckanordnungen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

Als Versuchsanlage wurde der mittlere Windkanal verwendet. Untersucht wurden Dreieckanordnungen (gleichseitiges Dreieck) in verschiedenen Varianten bei unterschiedlichen Anströmbedingungen und verschiedenen Masedämpfungsparametern. Die ermittelten Strouhalzahlen Sr_0 und Querkraftbeiwerte \tilde{c}_0 werden in Tabellenform angegeben.

Nachstehend sind die untersuchten Modellanordnungen aufgeführt.

Dreieckanordnungen



Die Anströmwinkel konnten von $\beta=0^\circ \dots 360^\circ$ eingestellt werden.

Variantenübersicht der Dreieckanordnungen:

Var.	$\frac{d_2}{d_1}$	$\frac{d_2^I}{d_1}$	$\frac{l_2}{l_1}$	$\frac{l_2^I}{l_1}$	f_0 [Hz]	\mathcal{J}	$m_{\mathcal{J}}$	$\frac{a}{d_1}$				
								3	4	5	6,7	10
1 3.1.	0,67	0,67	1	1	65,4	0,056	31	x	x			x
2					65,8	0,12	63	x	x	x		x
1 3.2.	1	1	1	1	66,3	0,05	27	x	x	x		x
2					65,8	0,12	63	x	x	x		x
1 3.3.	1,5	1,5	2	2	66,1	0,05	28	x	x			x
2					65,8	0,12	63	x	x	x		x
1 3.4.	1	1,5	1	1	66,3	0,05	27	x	x			x
2					65,8	0,12	63	x	x	x		x
1 3.5.	1	1,5	1	2	66,3	0,05	27	x	x			x
2					65,8	0,12	63	x	x	x		x

Für die Versuchsanordnung wurden die gleichen Methoden und Abmessungen der Meß- bzw. Blendenzylinder verwendet wie in Abschnitt 7.

8.1 Strömungsnachlaufuntersuchungen in der Wasserfließrinne

In der Wasserfließrinne wurden die Strömungsfelder um die Dreieckanordnung aufgenommen. Zur Sichtbarmachung der Strömung wurde auf die Wasseroberfläche Grieß aufgestreut. Fotografiert wurde mit ruhender und mit bewegter Kamera.

Die Abb. 72 und 73 zeigen Fließrinnenaufnahmen der Dreieckanordnung bei

$a/d_1=3$ für $d_2/d_1 = d_2^I/d_1 = 1,5$ bzw. $1/1,5$

ruhende Kamera

mitbewegte Kamera

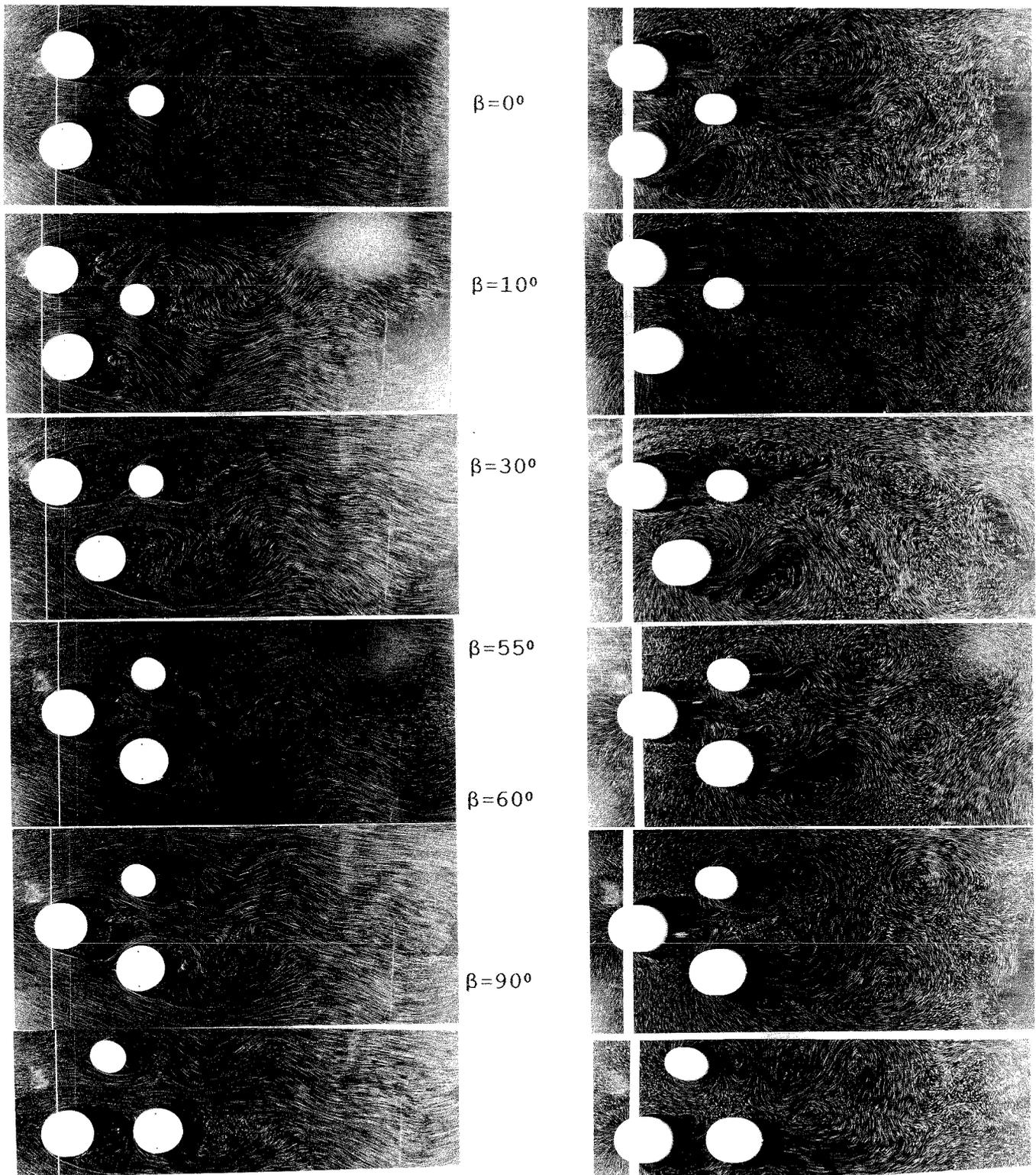


Abb. 72: Fließrinnenaufnahmen der Dreieckanordnung $d_2/d_1=d_2^1/d_1=1,5$ (Anströmung von links) bei $a/d_1=3$

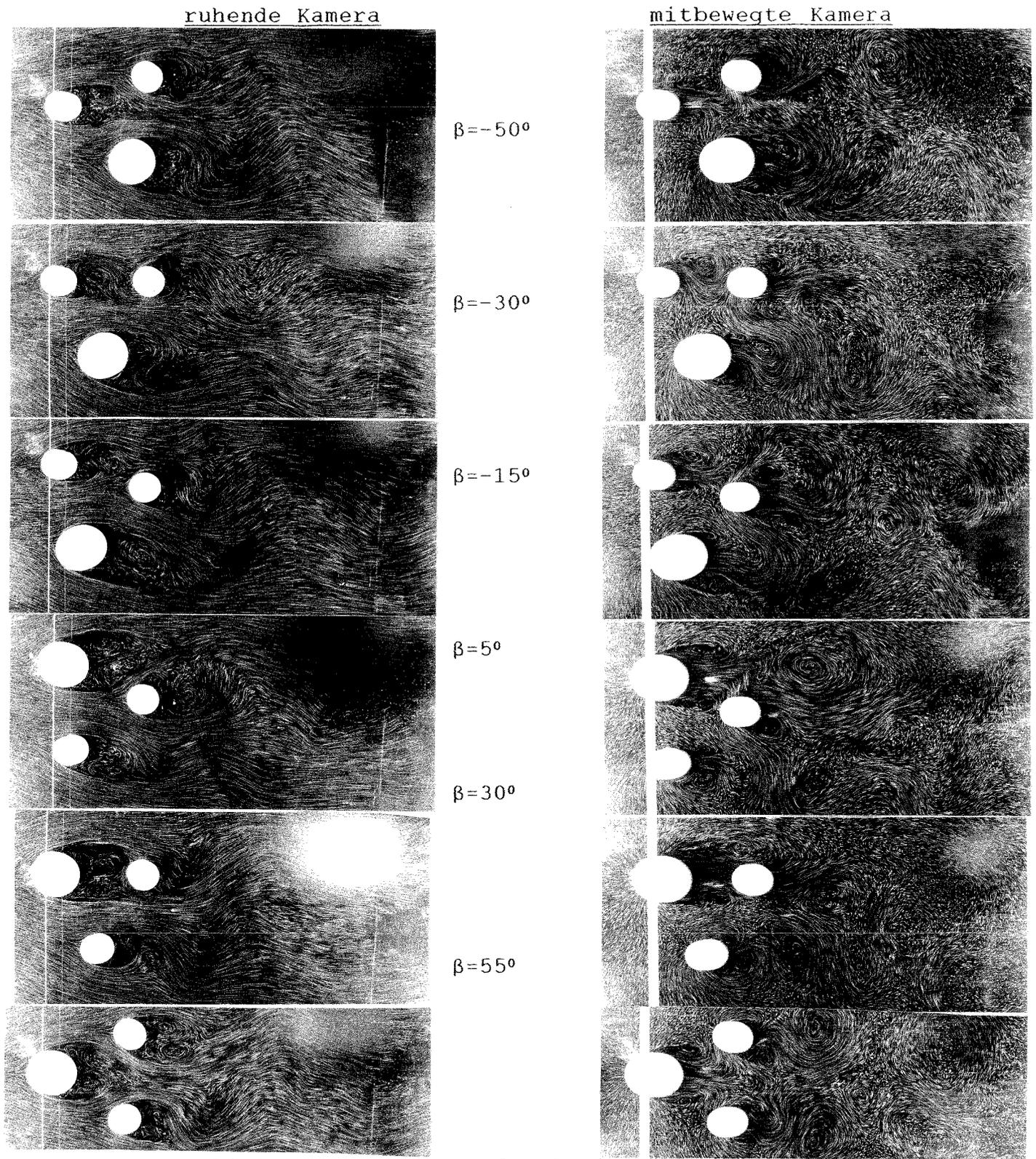


Abb.73: Fließbrinnenaufnahmen der Dreieckanordnung
 $d_2/d_1=1$ $d_2/d_1=1,5$ (Anströmung von links) bei $a/d_1=3$

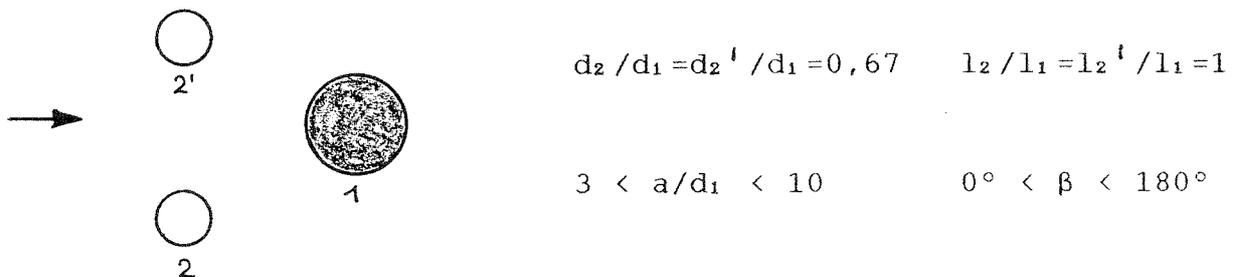
8.2. Versuchsergebnisse

Aus den gemessenen maximalen Querkräften und Staudrücken wurden berechnet, in Tabellenform dargestellt und verglichen:

- die Strouhalzahl bei maximaler Kraft $S_{r0} = f_0 \cdot d_1 / w_\infty$
- der effektive Querkraftbeiwert $\tilde{c}_Q = 2 \cdot \tilde{F}_Q \cdot \mathcal{A} / (l_1 \cdot d_1 \cdot q_\infty \cdot \pi)$
- die effektiv bezogene Auslenkung bei maximaler Kraft $\tilde{\eta} = \tilde{y} / d_1 = \tilde{F}_Q / c_r$

8.2.1 Strouhalzahlen und Kraftbeiwerte der Dreieckanordnung

- Variante 3.1.1 ($m_D = 31$) Abb. 74

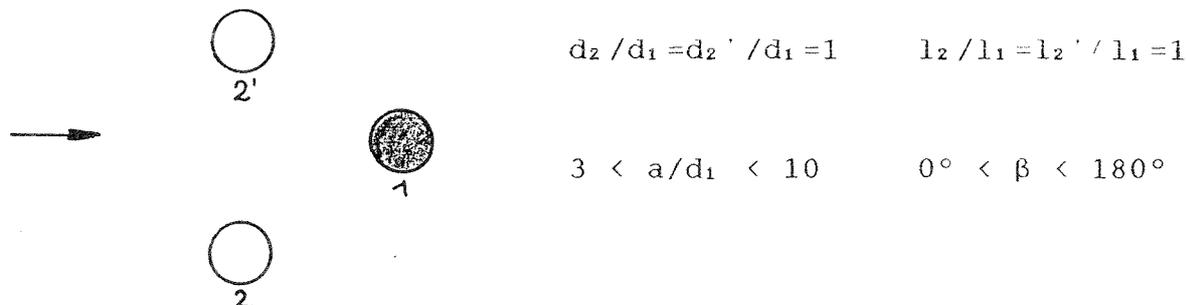


Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < S_{r0} < 0,175$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{c}_Q < 0,92$. Der Wert $\tilde{c}_Q = 0,92$ tritt bei $a/d_1 = 3$ und $\beta = 40^\circ$ auf.

- Variante 3.1.2 (wie oben, aber $m_D = 63$) Abb. 75

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,13 < S_{r0} < 0,19$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,04 < \tilde{c}_Q < 0,22$.

- Variante 3.2.1 ($m_{\text{a}} = 27$) Abb.76

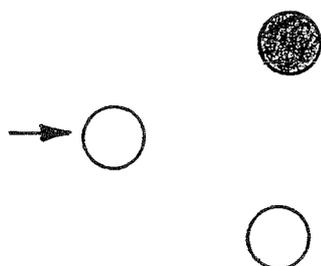


$$d_2 / d_1 = d_2' / d_1 = 1 \quad l_2 / l_1 = l_2' / l_1 = 1$$

$$3 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

Die Strouhalzahlen variieren zwischen $0,11 < Sr_0 < 0,19$. Die kleinsten Werte treten nur bei $a/d_1 = 3$ auf. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,34$.

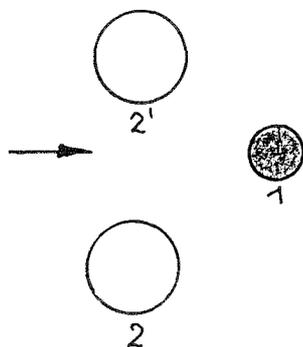
- Variante 3.2.2 (wie oben, aber $m_{\text{a}} = 63$) Abb.77



Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,16 < Sr_0 < 0,19$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,08 < \tilde{C}_Q < 0,59$.

Die maximalen Beiwerte treten in der Umgebung von $\beta = 60^\circ$ auf, also vergleichbar mit kritischen Stellungen der Zweieranordnung (dort $0^\circ < \beta < 30^\circ$).

- Variante 3.3.1 ($m_{\text{a}} = 28$) Abb. 78



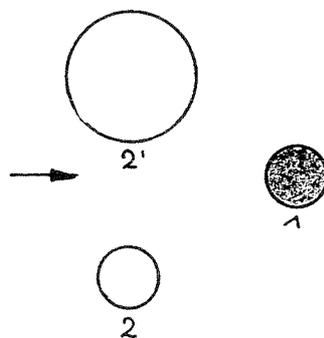
$$d_2 / d_1 = d_2' / d_1 = 1,5 \quad l_2 / l_1 = l_2' / l_1 = 2$$

$$3 < a/d_1 < 10 \quad 0^\circ < \beta < 180^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,09 < Sr_0 < 0,175$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,61$.

- Variante 3.3.2 (wie oben, aber $m_{\text{S}} = 63$) Abb. 79

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < S_{r0} < 0,19$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,55$. Bemerkenswert ist, daß die Querkraftbeiwerte bei $a/d_1 = 3$ klein sind. Die maximalen Werte liegen bei $a/d_1 = 10$ und $\beta = 30^\circ$. Dort liegt der Meßzylinder hinter einem der Blendenzylinder, also voll in dessen Nachlauf (siehe Fließrinnenbilder Abb. 72). Die Ergebnisse liegen also wiederum in der Größenordnung der vergleichbaren Zweieranordnung.

- Variante 3.4.1 ($m_{\text{S}} = 27$) Abb. 80

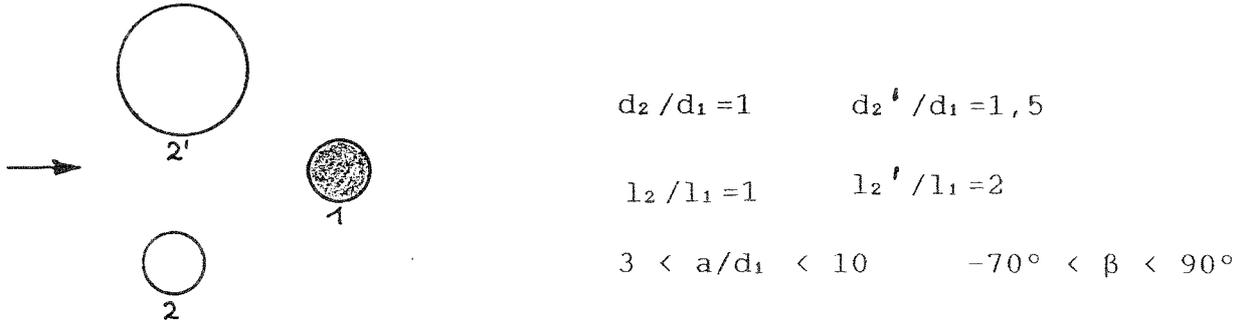
$$d_2/d_1 = 1 \quad d_2'/d_1 = 1,5 \quad l_2/l_1 = l_2'/l_1 = 1$$

$$3 < a/d_1 < 10 \quad -70^\circ < \beta < 90^\circ$$

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,09 < S_{r0} < 0,175$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,23$.

- Variante 3.4.2 (wie oben, aber $m_{\text{S}} = 63$) Abb. 81

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < S_{r0} < 0,18$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{C}_Q < 0,39$. Bei $a/d_1 = 3$ sind die Querkraftbeiwerte sehr klein. Die maximalen Beanspruchungen treten wieder bei $\beta = 30^\circ$ auf, also dort, wo der Meßzylinder voll im Nachlauf des großen Blendenzylinders liegt (siehe auch Fließrinnenbilder Abb. 73).

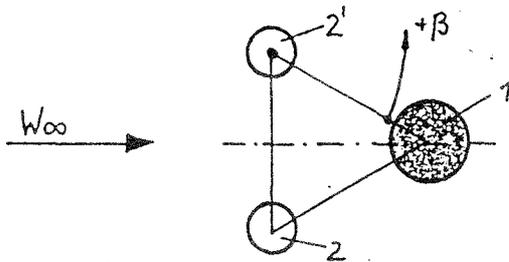
- Variante 3.5.1 ($m_s = 27$) Abb. 82

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,09 < S_{r_0} < 0,17$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0 < \tilde{c}_Q < 0,43$.

- Variante 3.5.2 (wie oben, aber $m_s = 63$) Abb. 83

Die Strouhalzahlen liegen zwischen $0,12 < S_{r_0} < 0,19$. Die Querkraftbeiwerte variieren zwischen $0,04 < \tilde{c}_Q < 0,52$. Die maximalen Beanspruchungen treten wieder in der Umgebung von $\beta=30^\circ$ auf, wo der Meßzylinder voll im Nachlauf des großen Blendenzylinders liegt. Bei $a/d_1=3$ sind die Beanspruchungen vergleichsweise niedrig. Im Vergleich zur Variante 3.4 erhält man auch hier für den niedrigen Meßzylinder größere Beanspruchungen. Diese liegen, abgesehen vom Abstand $a/d_1=3$, auch in der Größenordnung der vergleichbaren Zweieranordnung.

Abb. 74: Versuchsergebnisse zur
DREIECKANORDNUNG (Variante 3.1.1):
=====



Parameter:

$f_0 = 65.4 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.056$
 $m_{\nu} = 31$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 0.67 \quad d_2^1/d_1 = 0.67$

$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^1/l_1 = 1$

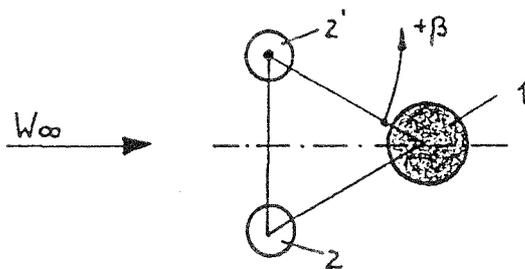
Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.173 \quad \zeta_0 = 0.11 \quad \tilde{\eta} = 0.0145$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	2	0.154	0.23	0.037	0.242
	42	0.122	0.92	0.242	
	64	0.169	0.23	0.031	
	72	0.176	0.19	0.023	
	138	0.173	0.24	0.030	
	161	0.172	0.16	0.020	
4	4	0.166	0.21	0.030	0.046
	51	0.166	0.24	0.034	
	52	0.165	0.32	0.046	
	53	0.167	0.29	0.041	
	54	0.166	0.28	0.039	
	141	0.171	0.12	0.015	
10	19	0.168	0.17	0.023	0.038
	30	0.153	0.07	0.012	
	31	0.153	0.08	0.012	
	40	0.167	0.27	0.038	

27

Abb. 75: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.1.2):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m_{\nu} = 63$

$l_1/d_1 = 15$

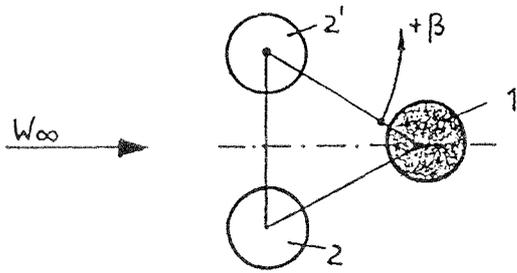
$d_2/d_1 = 0.67 \quad d_2'/d_1 = 0.67$

$l_2/l_1 = 1 \quad l_2'/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179 \quad \epsilon_0 = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ϵ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.149	0.18	0.015	0.015
	30	0.164	0.04	0.003	
	45	0.127	0.04	0.005	
	75	0.187	0.12	0.007	
	90	0.189	0.11	0.006	
	120	0.189	0.10	0.005	
	180	0.241	0.04	0.001	
4	0	0.173	0.14	0.009	0.011
	5	0.176	0.18	0.011	
	30	0.169	0.05	0.003	
	45	-	-	0.003	
	60	0.173	0.17	0.011	
	90	0.188	0.09	0.005	
	180	0.191	0.10	0.005	
5	0	0.191	0.13	0.007	0.013
	5	0.180	0.15	0.009	
	10	0.171	0.20	0.013	
	15	0.166	0.08	0.006	
	30	0.168	0.05	0.003	
	45	0.167	0.07	0.004	
	50	0.167	0.11	0.007	
	55	0.177	0.22	0.013	
	60	0.181	0.11	0.007	
	90	0.181	0.08	0.004	
180	0.178	0.10	0.006		
10	0	0.189	0.10	0.005	0.005
	30	0.158	0.06	0.004	
	55	0.180	0.09	0.005	
	60	0.188	0.08	0.004	
	180	0.187	0.10	0.005	

Abb. 76: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.2.1):



Parameter:

$$f_a = 66.3 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.05$$

$$m_\nu = 27$$

$$l_2/d_2 = 15$$

$$d_2/d_1 = 1$$

$$d_2^1/d_1 = 1$$

$$l_2/l_1 = 1$$

$$l_2^1/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.176$ $\zeta_a = 0.145$ $\tilde{\eta} = 0.0205$

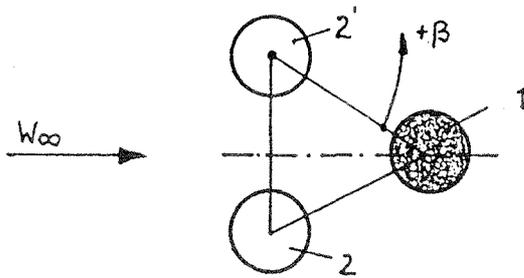
a/d_1	β [°]	Sr_a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	0	0.111	0.04	0.016	0.034
	0	0.176	0.06	0.009	
	5	0.112	0.04	0.013	
	5	0.182	0.06	0.008	
	10	0.115	0.03	0.009	
	10	0.204	0.10	0.010	
	15	0.113	0.03	0.009	
	15	0.198	0.06	0.007	
	20	0.115	0.02	0.006	
	20	0.173	0.06	0.008	
	25	0.111	0.02	0.006	
	25	0.169	0.08	0.012	
	30	0.115	0.02	0.007	
	30	0.164	0.11	0.017	
	35	0.175	0.13	0.019	
	40	0.165	0.04	0.007	
	45	0.145	0.03	0.006	
	45	0.165	0.03	0.005	
	50	0.141	0.07	0.014	
	55	0.159	0.11	0.018	
	60	0.166	0.20	0.031	
	62	0.167	0.22	0.034	
	65	0.168	0.18	0.027	
	70	0.171	0.11	0.016	
	75	0.179	0.15	0.020	
	80	0.170	0.16	0.025	
	85	0.175	0.22	0.031	
	90	0.175	0.19	0.026	
	95	0.181	0.17	0.022	
	100	0.183	0.15	0.019	
105	0.185	0.20	0.025		
110	0.182	0.20	0.025		
115	0.183	0.20	0.026		
120	0.185	0.21	0.026		
125	0.178	0.18	0.025		
130	0.181	0.20	0.026		
135	0.177	0.18	0.025		
140	0.172	0.03	0.004		
145	0.170	0.20	0.030		
150	0.168	0.16	0.024		
155	0.174	0.14	0.020		
160	0.175	0.08	0.011		
165	0.176	0.01	0.001		

Fortsetzung Variante 3.2.1

a/d_1	β [°]	Sr_α	z_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{\max}$
3	170	0.176	0.02	0.003	
	175	0.184	0.04	0.006	
	180	0.184	0.04	0.006	
4	0	0.167	0.12	0.019	0.045
	5	0.169	0.10	0.016	
	10	0.191	0.17	0.020	
	15	0.190	0.17	0.021	
	20	0.184	0.20	0.026	
	25	0.184	0.23	0.028	
	30	0.184	0.26	0.033	
	35	0.183	0.25	0.032	
	40	0.182	0.25	0.032	
	45	0.180	0.21	0.028	
	50	0.179	0.21	0.028	
	55	0.179	0.20	0.027	
	60	0.177	0.25	0.034	
	65	0.178	0.33	0.045	
70	0.180	0.34	0.044		
75	0.184	0.18	0.023		
5	0	0.170	0.23	0.036	0.041
	5	0.166	0.25	0.041	
	10	0.163	0.19	0.031	
	10	0.191	0.13	0.016	
	15	0.160	0.11	0.019	
	15	0.190	0.17	0.021	
	20	0.190	0.19	0.024	
	25	0.190	0.20	0.025	
	30	0.189	0.22	0.027	
	35	0.186	0.23	0.029	
	40	0.186	0.24	0.031	
	45	0.186	0.23	0.030	
	50	0.160	0.16	0.029	
	50	0.186	0.20	0.026	
	55	0.162	0.22	0.038	
	55	0.185	0.19	0.025	
60	0.164	0.18	0.030		
60	0.187	0.21	0.027		
10	0	0.177	0.13	0.019	0.029
	0	0.186	0.13	0.016	
	5	0.176	0.13	0.018	
	5	0.183	0.13	0.016	
	10	0.187	0.15	0.018	
	15	0.168	0.19	0.029	
	20	0.164	0.16	0.025	
	25	0.168	0.13	0.019	
	30	0.166	0.14	0.022	
	35	0.164	0.16	0.025	
	40	0.166	0.16	0.026	
	45	0.172	0.20	0.029	
	50	0.179	0.18	0.024	
	55	0.179	0.15	0.020	
	60	0.179	0.14	0.019	
70	0.175	0.14	0.020		
75	0.177	0.15	0.021		

Abb. 77: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.2.2):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
 $\nu = 0.12$
 $m\nu = 63$

$l_1/d_1 = 15$

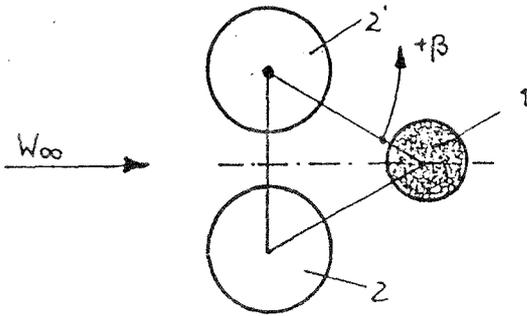
$d_2/d_1 = 1 \quad d_2^1/d_1 = 1$

$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^1/l_1 = 1$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179 \quad \zeta_0 = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	30	0.167	0.10	0.007	0.020
	55	0.161	0.07	0.005	
	60	0.165	0.25	0.017	
	65	0.176	0.11	0.007	
	85	0.170	0.30	0.020	
	120	0.189	0.21	0.011	
4	25	0.180	0.26	0.015	0.037
	30	0.180	0.30	0.017	
	35	0.179	0.37	0.022	
	40	0.179	0.34	0.020	
	60	0.174	0.35	0.022	
	65	0.171	0.58	0.037	
	70	0.173	0.59	0.037	
	75	0.164	0.06	0.004	
5	0	0.165	0.22	0.015	0.026
	5	0.163	0.25	0.017	
	10	0.160	0.18	0.013	
	25	0.185	0.20	0.011	
	30	0.180	0.23	0.013	
	35	0.183	0.27	0.015	
	40	0.181	0.21	0.012	
	50	0.181	0.15	0.009	
	55	0.179	0.22	0.013	
	60	0.177	0.36	0.022	
	65	0.179	0.45	0.026	
	70	0.184	0.20	0.011	
	75	0.185	0.12	0.007	
	90	0.187	0.08	0.004	
	120	0.192	0.09	0.004	
150	0.184	0.10	0.006		
180	0.179	0.11	0.007		
10	0	0.192	0.09	0.004	0.013
	30	0.165	0.16	0.011	
	35	0.162	0.18	0.013	
	60	0.187	0.10	0.005	
	65	0.185	0.08	0.004	

Abb. 78: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.3.1):



Parameter:

$$f_a = 66.1 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.05$$

$$m\nu = 28$$

$$l_1/d_1 = 15$$

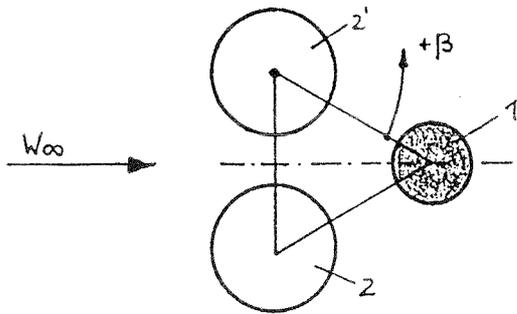
$$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2^1/d_1 = 1.5$$

$$l_2/l_1 = 2 \quad l_2^1/l_1 = 2$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.174$ $\zeta_a = 0.15$ $\tilde{\eta} = 0.021$

a/d ₁	β [°]	Sr _a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	36	0.090	0.03	0.015	0.043
	87	0.132	0.03	0.007	
	87	0.176	0.31	0.043	
	137	0.164	0.07	0.011	
	157	0.114	0.03	0.009	
	157	0.134	0.12	0.030	
4	0	0.125	0.24	0.067	0.093
	1	0.089	0.03	0.018	
	1	0.112	0.10	0.036	
	5	0.127	0.24	0.065	
	10	0.129	0.21	0.055	
	15	0.131	0.16	0.041	
	20	0.130	0.18	0.047	
	25	0.125	0.20	0.055	
	30	0.128	0.25	0.067	
	34	0.135	0.39	0.093	
	35	0.133	0.37	0.090	
	40	0.132	0.37	0.091	
	45	0.133	0.03	0.007	
	64	0.181	0.34	0.046	
138	0.178	0.11	0.015		
164	0.138	0.08	0.019		
10	0	0.172	0.15	0.022	0.155
	8	0.174	0.18	0.025	
	10	0.130	0.10	0.024	
	15	0.130	0.23	0.058	
	20	0.131	0.41	0.103	
	25	0.131	0.56	0.140	
	30	0.088	0.02	0.013	
	30	0.112	0.06	0.022	
	30	0.131	0.62	0.155	
	35	0.131	0.56	0.142	
	40	0.130	0.50	0.126	
	45	0.131	0.21	0.052	
	50	0.131	0.06	0.017	
50	0.175	0.15	0.022		
53	0.175	0.17	0.024		

Abb. 79: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.3.2):



Parameter:

$$f_a = 65.8 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.12$$

$$m_\nu = 63$$

$$l_1/d_1 = 15$$

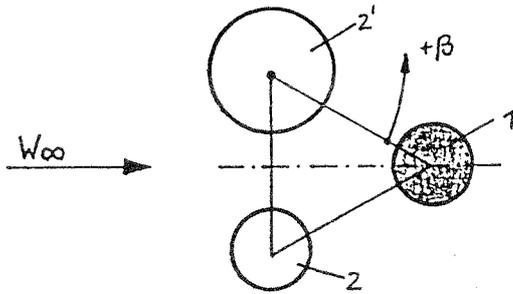
$$d_2/d_1 = 1.5 \quad d_2'/d_1 = 1.5$$

$$l_2/l_1 = 2 \quad l_2'/l_1 = 2$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_a = 0.179$ $\zeta_a = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

a/d ₁	β [°]	Sr _a	ζ_a	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	85	0.177	0.36	0.022	0.022
	90	0.178	0.18	0.011	
4	0	0.125	0.27	0.033	0.054
	5	0.128	0.29	0.033	
	25	0.130	0.29	0.033	
	30	0.130	0.35	0.039	
	35	0.132	0.51	0.054	
	40	0.131	0.44	0.048	
	60	0.177	0.51	0.031	
	65	0.180	0.68	0.039	
	70	0.185	0.56	0.031	
	90	0.191	0.25	0.013	
180	0.158	0.12	0.009		
5	0	0.125	0.37	0.044	0.057
	5	0.128	0.34	0.039	
	25	0.123	0.42	0.052	
	30	0.125	0.45	0.054	
	35	0.124	0.46	0.057	
	40	0.121	0.37	0.048	
	45	0.119	0.33	0.044	
	50	0.117	0.32	0.044	
	55	0.118	0.29	0.039	
	90	0.179	0.11	0.007	
180	0.160	0.07	0.005		
10	0	0.169	0.07	0.004	0.061
	25	0.131	0.52	0.057	
	30	0.130	0.55	0.061	
	35	0.131	0.48	0.052	
	40	0.128	0.46	0.052	
	45	0.127	0.28	0.033	
	90	0.180	0.09	0.005	
	180	0.174	0.08	0.005	

Abb. 80: Versuchsergebnisse zur
DREIECKANORDNUNG (Variante 3.4.1):



Parameter:

$$f_0 = 66.3 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.05$$

$$m_\nu = 27$$

$$l_1/d_1 = 15$$

$$d_2/d_1 = 1 \quad d_2^1/d_1 = 1.5$$

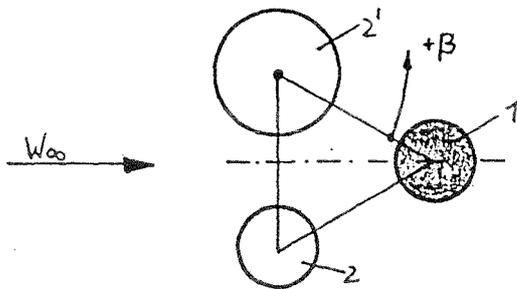
$$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^1/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.176$ $\zeta_0 = 0.145$ $\tilde{\eta} = 0.0205$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{\max}$
3	-42	0.185	0.19	0.025	0.025
	-42	0.190	0.20	0.024	
	-21	0.106	0.03	0.012	
	14	0.088	0.03	0.016	
	44	0.090	0.01	0.006	
	44	0.113	0.01	0.004	
4	-64	0.169	0.43	0.065	0.077
	-48	0.113	0.05	0.016	
	-5	0.128	0.14	0.037	
	0	0.114	0.07	0.025	
	0	0.134	0.20	0.049	
	27	0.114	0.23	0.077	
	38	0.130	0.12	0.031	
	48	0.113	0.06	0.019	
	56	0.128	0.08	0.021	
88	0.172	0.21	0.031		
10	-46	0.166	0.23	0.036	0.045
	13	0.169	0.14	0.022	
	28	0.114	0.10	0.032	
	32	0.129	0.17	0.045	
	52	0.175	0.15	0.022	

3A

Abb. 81: Versuchsergebnisse zur DREIECKANORDNUNG (Variante 3.4.2):



Parameter:

$$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$$

$$\nu = 0.12$$

$$m\nu = 63$$

$$l_1/d_1 = 15$$

$$d_2/d_1 = 1$$

$$d_2^1/d_1 = 1.5$$

$$l_2/l_1 = 1$$

$$l_2^1/l_1 = 1$$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179$ $\xi_0 = 0.09$ $\tilde{\eta} = 0.0052$

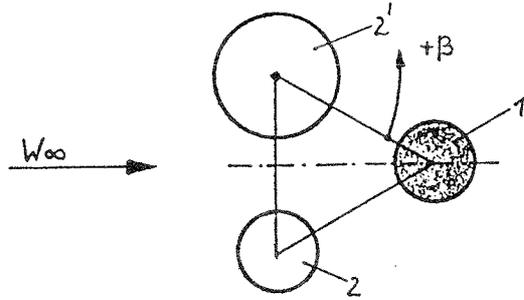
a/d ₁	β [°]	Sr_0	ξ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{max}$
3	-35	0.180	0.06	0.003	0.004
	-30	0.143	0.05	0.004	
4	-185	0.166	0.26	0.017	0.039
	-180	0.161	0.36	0.026	
	-175	0.159	0.35	0.026	
	-90	0.173	0.21	0.013	
	-35	0.117	0.13	0.017	
	-30	0.129	0.08	0.009	
	-25	0.124	0.09	0.011	
	-5	0.124	0.25	0.031	
	0	0.129	0.35	0.039	
	5	0.124	0.25	0.031	
	25	0.188	0.25	0.013	
	30	0.185	0.24	0.013	
	35	0.185	0.40	0.022	
40	0.180	0.30	0.017		
5	-180	0.169	0.17	0.011	0.052
	-90	0.188	0.12	0.007	
	-60	0.115	0.15	0.022	
	-45	0.115	0.25	0.035	
	-40	0.117	0.32	0.044	
	-35	0.118	0.39	0.052	
	-30	0.116	0.31	0.044	
	-25	0.116	0.34	0.049	
	-20	0.118	0.24	0.033	
	-15	0.119	0.23	0.031	
	-10	0.120	0.27	0.035	
	-5	0.121	0.26	0.033	
	0	0.122	0.17	0.022	
	30	0.188	0.21	0.011	
	55	0.158	0.29	0.022	
60	0.173	0.42	0.026		
65	0.173	0.52	0.033		

Fortsetzung Variante 3.4.2

a/d_1	β [°]	Sr_α	ξ_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}^{\max}$
10	-180	0.181	0.12	0.007	0.035
	-90	0.187	0.10	0.005	
	-45	0.116	0.13	0.017	
	-40	0.117	0.21	0.028	
	-35	0.117	0.26	0.035	
	-30	0.119	0.26	0.035	
	-25	0.130	0.29	0.033	
	-20	0.119	0.20	0.026	
	0	0.188	0.08	0.004	
	30	0.160	0.18	0.013	
	60	0.181	0.12	0.007	

32

Abb. 82: Versuchsergebnisse zur
DREIECKANORDNUNG (Variante 3.5.1):



Parameter:

$f_0 = 66.3 \text{ Hz}$
$\nu = 0.05$
$m\nu = 27$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1 \quad d_2^l/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^l/l_1 = 2$

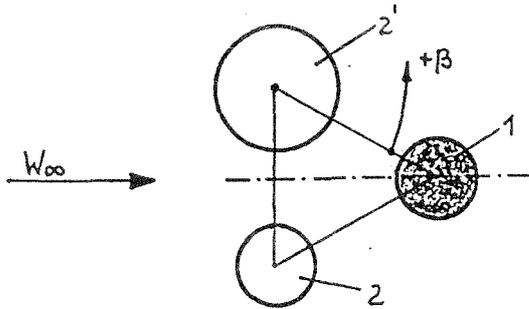
Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.176 \quad \epsilon_0 = 0.145 \quad \tilde{\eta} = 0.0205$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ϵ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	-37	0.180	0.11	0.015	0.211
	-32	0.129	0.05	0.014	
	4	0.085	0.09	0.052	
	12	0.088	0.38	0.211	
	29	0.127	0.08	0.021	
	32	0.117	0.12	0.039	
	32	0.158	0.10	0.017	
	57	0.113	0.04	0.014	
	88	0.159	0.14	0.024	
	88	0.177	0.15	0.021	
4	-65	0.176	0.17	0.023	0.092
	-4	0.138	0.16	0.036	
	0	0.111	0.04	0.014	
	0	0.142	0.15	0.033	
	29	0.116	0.09	0.030	
	34	0.124	0.32	0.092	
	48	0.114	0.07	0.024	
	51	0.123	0.10	0.028	
	70	0.172	0.26	0.038	
10	-48	0.171	0.18	0.027	0.107
	10	0.171	0.12	0.018	
	30	0.117	0.08	0.024	
	37	0.131	0.43	0.107	
	48	0.171	0.14	0.020	

73

Abb. 83: Versuchsergebnisse zur
DREIECKANORDNUNG (Variante 3.5.2):

=====



Parameter:

$f_0 = 65.8 \text{ Hz}$
$\nu = 0.12$
$m\nu = 63$

$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1 \quad d_2^1/d_1 = 1.5$

$l_2/l_1 = 1 \quad l_2^1/l_1 = 2$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.179 \quad \zeta_0 = 0.09 \quad \tilde{\eta} = 0.0052$

a/d_1	β [°]	Sr_0	ζ_0	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{max}$
3	-30	0.130	0.04	0.004	0.009
	30	0.122	0.07	0.009	
4	-70	0.174	0.14	0.009	0.052
	-65	0.165	0.32	0.022	
	-60	0.170	0.24	0.015	
	-30	0.191	0.38	0.020	
	0	0.127	0.19	0.022	
	5	0.127	0.22	0.026	
	25	0.125	0.32	0.039	
	30	0.125	0.40	0.048	
	35	0.123	0.42	0.052	
	60	0.165	0.19	0.013	
	65	0.167	0.46	0.031	
	70	0.171	0.48	0.031	
90	0.178	0.18	0.011		
180	0.164	0.22	0.015		
5	-65	0.180	0.30	0.017	0.059
	-60	0.179	0.48	0.028	
	-55	0.157	0.29	0.022	
	-30	0.189	0.21	0.011	
	0	0.129	0.37	0.041	
	5	0.130	0.35	0.039	
	10	0.129	0.33	0.037	
	25	0.118	0.40	0.054	
	30	0.118	0.42	0.057	
	35	0.118	0.44	0.059	
	40	0.123	0.31	0.039	
	60	0.118	0.18	0.024	
90	0.183	0.12	0.007		
180	0.170	0.09	0.006		

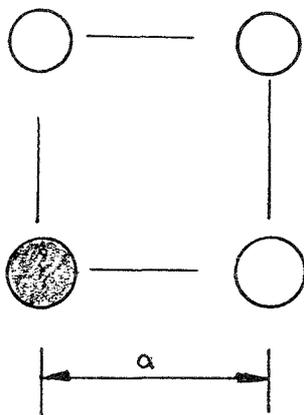
Fortsetzung Variante 3.5.2

a/d_s	β	Sr_α	z_α	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\eta}_{\max}$
10	-50	0.183	0.19	0.011	0.059
	-30	0.164	0.13	0.009	
	0	0.183	0.09	0.005	
	10	0.181	0.09	0.005	
	20	0.127	0.41	0.048	
	25	0.128	0.50	0.057	
	30	0.129	0.52	0.059	
	35	0.129	0.48	0.054	
	40	0.130	0.37	0.041	
	50	0.176	0.07	0.004	
	55	0.188	0.11	0.006	
	90	0.181	0.09	0.005	
	180	0.181	0.10	0.006	

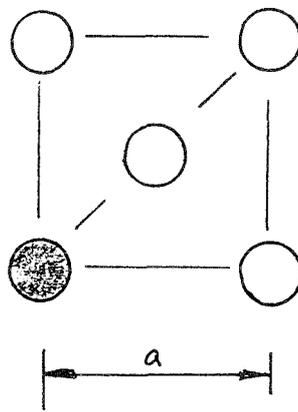
9. Windkanaluntersuchungen der nachlauferregten Schwingungen von Vierer- und Fünfergruppen im unterkritischen Reynoldszahlbereich

Im unterkritischen Reynoldszahlbereich wurden die dynamischen Querkraftbeiwerte und Strouhalzahlen bei Resonanz für Nachlaufwirbelerregung für folgende Kreiszyylindergruppen ermittelt:

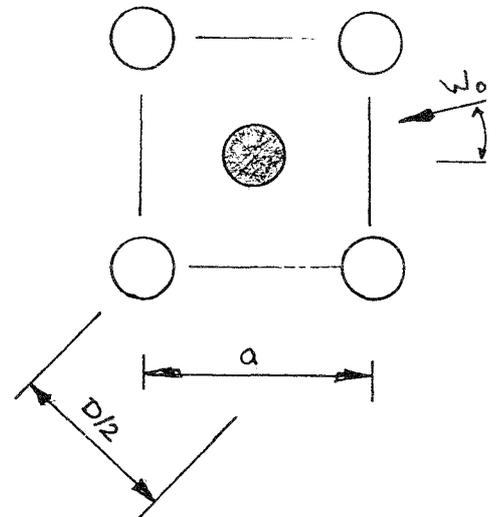
Variante 1.1



Variante 1.2



Variante 1.3



d_1 Meßzylinder 

d_2 Blendenzylinder 

Durchmesserverhältnis $d_1/d_2 = 1$

Abstandsverhältnis $3 \leq a/d_1 \leq 12,5$

Anströmwinkel bei Variante 1.1 und 1.2

$-45^\circ < \beta < 45^\circ$

bei Variante 1.3

$0^\circ < \beta < 45^\circ$

Massendämpfungsparameter $m_s \approx 50$

Dämpfungsdekrement $\delta \approx 0,1$

Alle Zylinder haben gleiche Höhen.

Die Versuche erfolgten im mittleren Windkanal.

Versuchsablauf:

- Bestimmung der reduzierten Federkonstanten (Auslenkung und Querkraft am oberen Zylinderende)
- Ermittlung von Eigenfrequenz und logarithmischem Dämpfungsdekrement
- Ermittlung des Resonanzstaudruckes und der dynamischen Beanspruchung am Einzelmeßzylinder (mehrfache Beanspruchung)
- Ermittlung des Resonanzstaudruckes und der dynamischen Beanspruchung

Mit Hilfe einer Zusatzdämpfung (feiner Kies im Zylinderende) wurde für den Meßzylinder ein logarithmisches Dämpfungsdekrement von $\delta \approx 0,12$ erzeugt. Der Massendämpfungsparameter des Meßzylinders betrug $m\delta \approx 53$.

Untersucht wurden jeweils die maximalen Querkraftbereiche bei Resonanz über dem Schiebewinkel β für die verschiedenen Zylinderabstände.

Ausgewertet wurden - die Strouhalzahl S_r
- der Querkraftbeiwert \tilde{c}_q
- der Quotient \tilde{c}_q / S_r^2

Die Meßergebnisse der ermittelten Strouhalzahlen S_{r0} und Querkraftbeiwerte \tilde{c}_q für die Varianten 1.1, 1.2 und 1.3 sind in Abb. 85 bis 87 in Tabellenform zusammengestellt.

Zu beachten ist, daß bei der Fünfergruppe, Meßzylinder in der Mitte, der Abstand (hier mit D bezeichnet) entlang der Diagonalen gemessen wird.

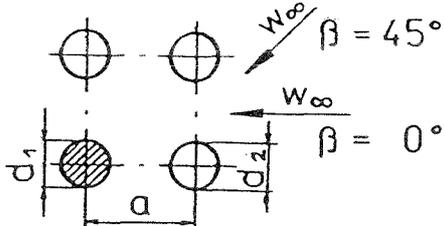
39

Abb. 85: Versuchsergebnisse zur VIERERANORDNUNG (Variante 1.1):

Parameter:

$f_0 = 68 \text{ Hz}$
 $\nu \approx 0.12$
 $m_\nu \approx 59$

(unterkritisch modelliert)



$l_1/d_1 = 15$

$d_2/d_1 = 1.0$

$l_2/l_1 = 1.0$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.187$; $\tilde{c}_Q = 0.10$; $\tilde{c}_Q/Sr_0^2 = 2,86$

a/d ₁	β [°]	Sr ₀	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\eta}_{max}$
3.0	45	0.181	0.05	1.52	0.0419
	40				
	35				
	30				
	25				
	20				
	15				
	10				
	5				
	0				
	-5				
	-10				
	-15				
	-20				
	-25				
4.0	45	0.178	0.18	5.7	0.0177
	40				
	35				
	30				
	25				
	20				
	15				
	10				
	5				
	0				
	-5				
	-10				
	-15				
	-20				
	-25				
-30					
-35					
-40					
-45					

Fortsetzung Variante 1.1

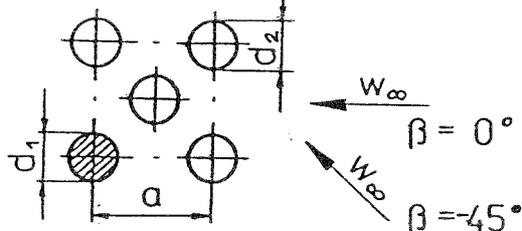
a/d_1	β [°]	Sr_0	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\eta}_{max}$
5.0	45	0.199	0.13	3.3	0.0155
	40	0.196	0.11	2.8	
	35	0.196	0.09	2.4	
	30				
	25				
	20				
	15				
	10	0.184	0.13	3.7	
	5	0.180	0.14	4,4	
	0	0.188	0.21	6.5	
	- 5	0.180	0.18	5.4	
	-10	0.183	0.15	4.4	
	-15	0.184	0.13	3.7	
	-20	0.185	0.12	3.5	
	-25	0.166	0.21	7.6	
	-30	0.171	0.16	5.4	
-35					
-40					
-45	0.186	0.091	2.6		
6.7	10	0.176	0.07	2.2	0.0141
	5	0.172	0.08	2.8	
	0	0.165	0.11	4.1	
	- 5	0.184	0.10	3.0	
	-10	0.189	0.10	2.8	
	-15	0.165	0.08	3.0	
	-20	0.166	0.19	6.96	
	-25	0.187	0.17	4.8	
	-30	0.189	0.14	3.9	
	-35	0.189	0.09	2.6	
10.0	15	0.166	0.14	5.2	0.0124
	5	0.175	0.09	2.8	
	0	0.171	0.10	3.5	
	- 5	0.175	0.09	2.8	
	-10	0.172	0.08	2.8	
	-15	0.167	0.17	6.1	
	-20	0.183	0.10	3.0	
	-25	0.190	0.09	2.4	
12.6	5	0.174	0.09	2.8	0.0115
	0	0.168	0.09	3.3	
	- 5	0.174	0.09	2.8	
	-10	0.165	0.16	5.7	
	-15	0.186	0.12	3.5	

Abb. 86: Versuchsergebnisse zur FÜNFERANORDNUNG (Variante 1.2):

Parameter:

$f_0 = 68 \text{ Hz}$
 $\tilde{\gamma} \approx 0.12$
 $m_{sp} \approx 59$

(unterkritisch)



$l_1/d_1 = 15$
 $d_2/d_1 = 1.0$
 $l_2/l_1 = 1.0$

Werte des Einzelzylinders: $Sr_0 = 0.187$; $\tilde{c}_Q = 0.10$; $\tilde{c}_Q/Sr_0^2 = 2.86$

a/d_1	β [°]	Sr_0	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\gamma}_{max}$
3.0	45	0.202	0.11	2.6	0.0088
	0	0.108	0.03	2.2	
	-45	0.186	0.15	4.4	
4.0	45	0.156	0.27	12.0	0.0243
	0	0.217	0.13	2.8	
	-5				
	-10				
	-15				
	-20				
	-25	0.173	0.17	5.7	
	-30	0.189	0.12	3.5	
	-35	0.186	0.20	6.1	
	-40	0.181	0.16	4.8	
	-45	0.184	0.18	5.4	
5.0	45	0.163	0.127	4.8	0.0353
	40	0.163	0.162	6.1	
	35				
	30				
	25	0.167	0.12	4.8	
	20	0.171	0.22	7.6	
	15	0.173	0.156	5.2	
	10				
	5				
	0	0.210	0.13	2.8	
	-5				
	-10				
	-15	0.178	0.138	4.4	
	-20	0.174	0.184	6.1	
	-25	0.171	0.25	8.7	
	-28	0.165	0.48	17.4	
	-30	0.165	0.44	16.3	
-35	0.185	0.09	2.6		
-40	0.187	0.10	2.8		
-45	0.176	0.12	3.9		

Fortsetzung Variante 1.2

a/d_1	β [°]	Sr_0	\bar{c}_Q	\bar{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\eta}_{max}$
6.7	45	0.154	0.07	3.0	0.0177
	40				
	35				
	30				
	25	0.148	0.114	5.2	
	20	0.149	0.20	9.1	
	15				
	10				
	5				
	0	0.202	0.12	3.0	
	-5	0.194	0.13	3.5	
	-10	0.185	0.13	3.7	
	-15	0.178	0.14	4.4	
	-20	0.173	0.23	7.6	
	-25	0.172	0.42	14.1	
	-30	0.177	0.11	3.5	
	-35				
-40	0.197	0.11	2.8		
-45	0.196	0.08	2.2		
10.0	45	0.149	0.05	2.4	0.0177
	40				
	35				
	30	0.150	0.15	6.5	
	25	0.150	0.20	8.7	
	20	0.179	0.27	8.7	
	15	0.175	0.17	5.4	
	10				
	5				
	0	0.165	0.10	3.5	
	-5				
	-10				
	-15	0.165	0.18	6.5	
	-20	0.175	0.27	8.7	
	-25	0.180	0.28	8.7	
	-30				
	-35				
-40					
-45	0.196	0.10	2.6		
12.5	45	0.151	0.06	2.6	0.0287
	40				
	35				
	30	0.157	0.35	14.1	
	25	0.171	0.25	8.7	
	20				
	15				
	10				
	5	0.165	0.15	5.4	
	0	0.165	0.10	3.7	
	-5				
	-10	0.165	0.15	5.4	
	-15	0.176	0.20	6.5	
	-20				
	-25				
	-30				
	-35				
-40					
-45	0.194	0.10	2.6		

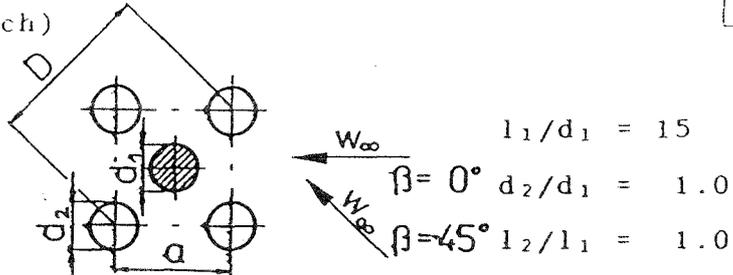
36

Abb. 87: Versuchsergebnisse zur FÜNFERANORDNUNG (Variante 1.3):

Parameter:

$f_c = 68 \text{ Hz}$
 $\zeta \approx 0.12$
 $m_{\zeta} \approx 59$

(unterkritisch)



Werte des Einzelzylinders: $Sr_o = 0.187$; $\tilde{c}_Q = 0.10$; $\tilde{c}_Q/Sr_o^2 = 2.86$

$(D/2)/d_1$	β [°]	Sr_o	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_o^2	$\tilde{\zeta}_{max}$
3.0	0	0.178	0.124	3.9	0.0177
	-5	0.177	0.102	3.3	
	-10	0.177	0.123	3.9	
	-15	0.180	0.25	7.6	
	-17	0.180	0.28	8.7	
	-20	0.179	0.18	5.4	
	-25	0.183	0.04	1.3	
	-30	0.181	0.04	1.1	
	-35	0.185	0.03	0.9	
	-40	0.178	0.04	1.3	
	-45	0.147	0.187	8.7	
4.0	0	0.179	0.154	4.8	0.0287
	-5	0.175	0.16	5.2	
	-10	0.170	0.18	6.1	
	-15	0.158	0.23	9.1	
	-20	0.176	0.23	7.4	
	-25	0.172	0.24	8.3	
	-30	0.171	0.22	7.6	
	-35	0.167	0.26	9.4	
	-40	0.168	0.40	14.1	
	-45	0.167	0.40	14.1	
	5.0	0	0.184	0.10	
-5		0.180	0.11	3.3	
-10		0.177	0.14	4.6	
-15		0.172	0.17	5.9	
-20		0.159	0.21	8.3	
-25		0.179	0.12	3.7	
-30		0.179	0.13	4.1	
-35		0.178	0.16	5.0	
-40		0.177	0.22	7.0	
-45		0.175	0.23	7.6	
7.0		-20	0.178	0.15	4.6
	-25	0.159	0.15	6.1	
	-30	0.166	0.09	3.3	
	-35				
	-40	0.164	0.11	3.9	
	-45	0.163	0.12	4.6	

Fortsetzung Variante 1.3

$(D/2)/d_1$	β [°]	Sr_0	\tilde{c}_Q	\tilde{c}_Q/Sr_0^2	$\tilde{\eta}_{\max}$
10.0	-25	0.183	0.10	3.0	0.0119
	-30	0.165	0.16	5.9	
	-35	0.165	0.10	3.5	
	-40	0.162	0.11	4.1	
	-45	0.165	0.12	4.4	
14.0	-30	0.184	0.11	3.3	0.0084
	-35	0.166	0.14	5.0	
	-40	0.160	0.11	4.1	
	-40	0.161	0.12	4.6	
	-45	0.163	0.09	3.5	
17.0	-30	0.181	0.09	2.6	0.0088
	-35	0.167	0.11	3.9	
	-40	0.160	0.11	4.4	
	-45	0.165	0.09	3.3	

Literatur

- [1] Mahrenholtz, O. Fluidelastische Schwingungen,
Zeitschrift für angewandte Mathematik und
Mechanik, 66(1986) H. 1, S.1 - 22
- [2] Schewe, G. On the force fluctuations acting on a cir-
cular cylinder in cross flow from subcriti-
cal up to transcritical Reynolds numbers
Journ. Fluid Mech., Vol. 133 (1983),
S. 265 - 285
- [3] Ruscheweyh, H. Dynamische Windwirkung an Bauwerken
Band 2, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin
1982
- [4] Chen, S.S. Flow-induced vibration of circular cylin-
drical structures
Berlin 1987
- [5] Bearman, P.W. An experimental study of pressure fluctua-
Obasaju, E.O. tions on fixed and oscillating square
section cylinders
J. Fluid Mech. (1982), Vol. 119,
S. 297 - 321
- [6] Försching, H. Zur theoretischen Behandlung aeroelastisch
erregter Schwingungen kreiszylindrischer
Konstruktionen bei periodischer Wirbelan-
regung
Zeitschrift für Flugwissenschaften und
Weltraumforschung
18 (1970), 9/10, S. 347 - 359
- [7] Fung, Y. C. Fluctuating lift and drag acting on a cylin-
der in a flow at supercritical Reynolds-
numbers
Journal of the aerospace sciences 27
(1960) S.801 - 814

- [8] Igarashi, T. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem (1st Report),
Bulletin of the ISME 24 (1981) 188,
S. 323 - 331
- [9] Ruscheweyh, H. Dynamische Windwirkung an Bauwerken
Band 2: Praktische Anwendungen,
Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1982
- [10] Staubli, T. Untersuchung der oszillierenden Kräfte an querangeströmten, schwingenden Kreiszyklindern
Dissertation Juris Druck und Verlag,
Zürich 1983
- [11] Wootton, L. R. The oscillations of model circular stacks due to vortex shedding at Reynoldnumbers in the range 10^5 to $3 \cdot 10^6$,
Proceedings of a Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures 1968
- [12] Igarashi, T. Characteristics of a flow around two circular cylinders of different diameters arranged in tandem,
Bulletin of the JSME 25 (1982) 201,
S. 349 -357
- [13] Kiya, M. u. a. Vortex shedding from two circular cylinders in staggered arrangement. Trans. ASME, Journal Fluids Eng. 102 (1980),
S. 166 - 173
- [14] Langer, W. Richtlinie für die Berechnung und bauliche
Hölzel, G. Durchbildung hoher schlanker Tragwerke unter winderregter Querschwingungsbeanspruchung vom März 1982, herausgegeben vom Rundfunk- und Fernsichttechnisches Zentralamt der Deutschen Post
- [15] Meiche, G. Schadensfall an einem 150 m hohen Stahlbetonschornstein. Erscheint demnächst in "Wind-

technologische Gesellschaft - Berichte"

- [16] Trätner, A. Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnung. Erscheint demnächst in "Windtechnologische Gesellschaft - Berichte"
- [17] Zdravkovich, M. Effect of damping on interference induced
Medeiros, E.B. oscillations of two indentical circular
cylinders.
Journal Wind Eng. 38 (1991), S. 197 - 211

Teil 4: Ergebnisse

Forschungsvorhaben

Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei kreisförmigen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung

Teil 4: Ergebnisse

Auftraggeber: Institut für Bautechnik
 IfBT – Az.: IV 1-5-657/91

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Spaethe
 Dr.-Ing. Arnulf Trätner

Mitglieder der Betreuergruppe:
 Dipl.-Ing. Hirtz
 Dr. Nieser
 Prof. Dr. Petersen
 Prof. Dr. Ruschewey

Zeuthen im November 1992

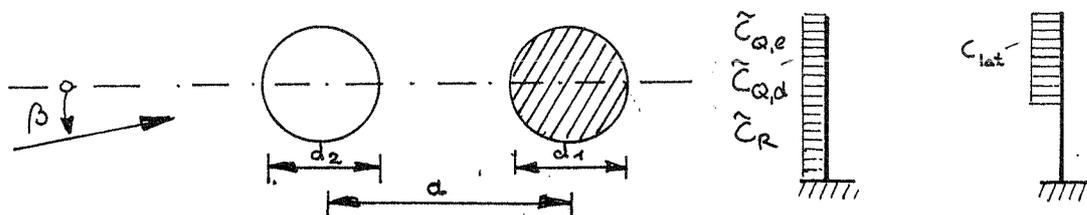
Inhaltsverzeichnis

0. Bezeichnungen
1. Übersicht
2. Zusammenstellung der Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen
 - 2.1. Verhältnismerte Gruppenanordnung zum Einzelzylinder in Tabellenform
 - 2.2. Verhältnismerte Gruppenanordnung zum Einzelzylinder in Diagrammform
3. Aussagen zu Versuchsergebnissen an Einzelmodellen
4. Zusammenstellung von Aussagen über winderregte Querschwingungsbeanspruchungen von Bauwerken in Gruppen- und Reihenordnungen in Richtlinien und Normen
5. Zusammenstellung von wichtigen Ergebnissen der Literaturauswertung
6. Empfehlungen für die praktische Anwendung
 - 6.1. Empfehlungen von Lastannahmen für winderregte Querschwingungsbeanspruchungen bei kreiszylindrischen Schornsteinen in Massivbauart in Gruppen- und Reihenanordnung
 - 6.2. Vergleich der Empfehlungen mit den Meßergebnissen
7. Statistische Auswertung der Abstandsverhältnisse der in den ostdeutschen Ländern vorhandenen Schornsteingruppen

0. Bezeichnungen *)

<u>Größe</u>	<u>Dimension</u>	<u>Bedeutung</u>
A	m	Projektionsfläche
a	m	Zylindermittenabstand
C _{lat}	-	Erregerkraftbeiwert
$\tilde{C}_{0,e}$	-	Effektivwert des Quertriebsbeiwertes am Einzelzylinder
$\tilde{C}_{0,d}$	-	Effektivwert des Quertriebsbeiwertes am Meßzylinder bei Reihen- oder Gruppenanordnung
C _R	-	Resultierender Erregerkraftbeiwert
\tilde{C}_R	-	Effektivwert des resultierenden Erregerkraftbeiwertes
d ₁	m	Durchmesser des Meßzylinders
d ₂ , d' ₂	m	Durchmesser des Blendenzylinders
\tilde{h}_e	-	Effektivwert der bezogenen Auslenkung des Einzelkreiszylinders (im Diagrammen auch e _e)
\tilde{h}_d	-	Effektivwert der bezogenen Auslenkung des Meßzylinders bei Reihen- oder Gruppenanordnung (im Diagramm auch e _d)
f ₀	Hz	Eigenfrequenz

K_w	-	Wirklängenfaktor
l_1	m	Höhe des Meßzylinders
l_2, l_2'	m	Höhe des Blendenzylinders
$m_{\mathcal{D}}$	-	Massendämpfungsparameter (in Diagrammen MD)
$S_{r,e}$	-	Strouhalzahl bei Resonanz am Einzelzylinder
$S_{r,d}$	-	Strouhalzahl bei Resonanz am Meßzylinder bei Reihen- oder Gruppenanordnung
trans	-	modellierter transkritischer Reynoldszahlbereich
unter	-	unterkritischer Reynoldszahlbereich
w_{∞}	m/s	ungestörte Strömungsgeschwindigkeit
y	m	Querschwingungsausschlag
β	°	Anströmwinkel
$\tilde{\eta} = \tilde{y}/d$	-	Effektivwert der bezogenen Auslenkung
\mathcal{D}	-	logarithmisches Dämpfungsdekrement



*) Im Abschnitt 5 sind bei der Zusammenstellung von Angaben aus der Literatur zum Teil die Originalbezeichnungen verwendet, die abweichend sein können.

Übersicht

Ziel der Forschungsaufgabe "Winderregte Querschwingungen infolge Wirbelablösung bei kreiszylindrischen Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnung" ist die Angaben von Lastannahmen für Stahlbetonschornsteine. Grundlage dafür sind die in Teil 3 dargestellten Windkanalversuche und Auswertungen internationaler Literaturangaben und Vorschriften.

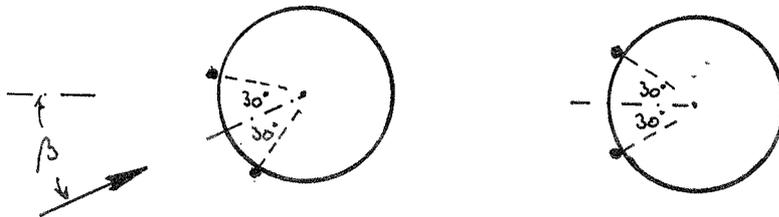
Im vorliegenden Abschlußbericht werden die Ergebnisse der Forschungsaufgabe zusammengefaßt und Empfehlungen für die praktische Anwendung erarbeitet.

In den vorhandenen Vorschriften, Empfehlungen und Richtlinien werden Aussagen über den Erregerkraftbeiwert (Querkraftbeiwert) und die Strouhalzahl in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis a/d gemacht. Diese Vorgehensweise wird auch bei der Auswertung der Ergebnisse der vorliegenden Forschungsaufgabe angewendet.

Im Abschnitt 2 werden die Ergebnisse der Windkanalversuche tabellarisch zusammengestellt, in Diagrammen dargestellt und mit den in Abschnitt 6 näher erläuterten Empfehlungen für die praktische Anwendung verglichen.

Querschwingungsuntersuchungen können im benutzten Windkanal im unterkritischen und im unteren überkritischen Reynoldszahlbereich durchgeführt werden. In der Praxis treten bei Stahlbetonschornsteinen Querschwingungsbeanspruchungen im transkritischen Reynoldszahlbereich auf. Es wurden deshalb zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen im unterkritischen Bereich für ausgewählte wichtige Doppelzylinderanordnungen Erprobungen bei transkritischer Reynoldszahl-Modellierung durchgeführt.

Die das transkritische Gebiet charakterisierenden Grenzschichten wurden mit Klebeband befestigten Drähten erzeugt. Bei Anströmrichtungen $\beta=0^\circ$ wurde der Blendenzylinder bezüglich der Lage der Stolperkanten symmetrisch zur Anströmrichtung gedreht. Die symmetrische Anströmung und das Wiederanlegen der Strömung nach der Stolperkante wurde mit einer Fadensonde überprüft.



Solange der Meßzylinder in dem stark turbulenten Nachlauf des Anströmzylinders liegt, wird durch die Turbulenz eine überkritische Strömung erzeugt. Nur wenn der Meßzylinder gerade die Nachlaufgrenzen berührt, wird eine merklich unsymmetrische Strömung auftreten. Dabei können Fehler bei der Modellierung des transkritischen Bereiches entstehen. Größere Fehler sind aber unwahrscheinlich, da bei der Auswertung des Querkraftbeiwertes die unterkritisch sowie transkritisch modellierten Meßergebnisse für die Empfehlungen Berücksichtigung finden und die Stouhalzahlen im transkritisch modellierten Bereich sich recht gut, momentan und stetig über der Anströmrichtung verhalten.

Mit dieser Methode wurden nur ausgewählte wichtige Anordnungen untersucht und damit eine Einschätzung des Einflusses des Reynoldszahlbereiches gewonnen.

Die Mehrzahl der Untersuchungen erfolgten allerdings aus Kostengründen im unterkritischen Bereich. Da die Querkraftbeiwerte hier größer sind, liegen diese Untersuchungen auf der sicheren Seite. Die Empfehlungen für die praktische Anwendung im Abschnitt 6 decken weitgehend auch den unterkritischen Bereich mit ab.

Die Auswertung wird auf die Verhältniswerte Mehrfachanordnung/Einzelanordnung orientiert. Im Abschnitt 2 sind diese Verhältniswerte tabellarisch und grafisch dargestellt und zwar immer die Werte für den Anströmwinkel β , bei dem die größte Beanspruchung (Amplitude) η auftrat. Diese Werte sind in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis a/d_1 angegeben.

Die Meßergebnisse der Strouhalzahlen streuen relativ wenig, so daß ihre Auswertung unproblematisch ist. Die im Abschnitt 6 näher dargestellten Empfehlungen für die praktische Anwendung wurde auf Grund der Meßwerte im transkritisch modellierten Bereich festgelegt. Sie decken aber auch im wesentlichen die

Meßwerte im unterkritischen Bereich mit ab.

In den Diagrammen für die Strouhalzahlen sind die Verhältniswerte mit den Verhältniswerten der Empfehlung verglichen.

$$S_{r,d, \text{Meßw.}} / S_{r,e, \text{Meßw.}} \longleftrightarrow S_{r,d, \text{Empf.}} / S_{r,e, \text{Empf.}}$$

Kritischer sind die Ergebnisse für das Verhältnis der Querkraftbeiwerte, die sehr große Streuungen besitzen. Dabei zeigt sich, daß ein relativ großer Streuungsanteil aus den Meßwerten des Einzelzylinders resultiert. Die Ursachen dafür sind im Abschnitt 3 zusammengefaßt dargestellt. Da sich die Werte der Empfehlungen für die praktische Anwendung (Abschnitt 6) nicht auf Meßwerte des Einzelzylinders beziehen, sondern auf die Vorschriftenwerte des Einzelzylinders (ISO, EC1), wird hier so vorgegangen, daß für die Festlegung des $\tilde{c}_{Q,d}$ - Verhältnisses der Vorschriftenwert zugrunde gelegt wird.

Dieser Vorschriftenwert des Einzelzylinders stellt einen allgemein anerkannten oberen Wert dar, der durch viele Forschungsergebnisse bestätigt und nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Durch den Bezug auf Vorschriftenwerte vermindert sich die Streuung des Quotienten $\tilde{c}_{Q,d} / \tilde{c}_{Q,e}$ bleibt aber trotzdem erheblich.

Bei dem grafischen Vergleich zwischen Meßwerten und den Werten der vorgeschlagenen Empfehlung (Abschnitt 6) gibt es dann grundsätzlich zwei Möglichkeiten, will man Verhältniswerte von Doppelanordnung zu Einzelanordnung darstellen. Entweder man bezieht $c_{Q,d}$ auf die Meßwerte und vergleicht

$$\tilde{c}_{Q,d, \text{Meßw.}} / \tilde{c}_{Q,e, \text{Meßw.}} \longleftrightarrow \tilde{c}_{Q,d, \text{Empf.}} / \tilde{c}_{Q,d, \text{Meßw.}}$$

oder man bezieht $C_{Q,d}$ auf Vorschriftenwerte und vergleicht

$$\tilde{c}_{Q,d, \text{Meß.}} / \tilde{c}_{Q,e, \text{Empf.}} \longleftrightarrow \tilde{c}_{Q,d, \text{Empf.}} / \tilde{c}_{Q,e, \text{Empf.}}$$

Dabei ist $\tilde{c}_{Q,e, \text{Empf.}} = 0.17$ und

$$\tilde{c}_{Q,d, \text{Empf.}} / \tilde{c}_{Q,e, \text{Empf.}} = C_{Iat,d} / C_{Iat,e}$$

Beide Vorgehensweisen sind identisch, da man eigentlich die Nenner herauskürzen kann, und im Prinzip nur $\tilde{c}_{Q,d}$ - Werte verglichen werden. Die Unterschiede haben den Charakter von Meß-

stabsunterschieden.

Die erste Vorgehensweise hat den Vorteil, daß die Verhältniswerte der tatsächlich gemessenen Werte grafisch dargestellt sind, aber die Empfehlungsverhältnisse entsprechend verschoben sind.

Die zweite Variante hat den Vorteil, daß die Empfehlung original erscheint und die Meßwertverhältnisse modifiziert werden.

In diesem Bericht wird vorrangig die erste Variante angewendet, aber auch einige Vergleiche der zweiten Darstellungsweise gezeigt.

Der Vergleich wird günstiger bei den Amplituden, die den Beanspruchungen und dem Quotienten \tilde{c}_0/S_r^2 proportional sind. Als Beanspruchungen haben sie besonders große praktische Bedeutung.

Im Abschnitt 6 sind die Amplitudenverhältniswerte dargestellt und Vergleiche mit den dort dargestellten Empfehlungen durchgeführt.

Während die Diagramme im Abschnitt 2 vorrangig der Wahl einer geeigneten Empfehlung dienen, sind die im Abschnitt 6 dargestellten Diagramme für die \tilde{c}_0/S_r^2 - Werte der entscheidende Nachweis, daß die für die Anwendung empfohlenen \tilde{c}_0 - und S_r -Werte gerechtfertigt sind.

Bei der Darstellung der Amplitudenverhältnisse gibt es die gleichen Probleme und Möglichkeiten, wie sie bei den \tilde{c}_0 -Werten diskutiert wurden.

Im Abschnitt 4 erfolgt eine Zusammenstellung von Aussagen über winderregte Querschwingungsbeanspruchungen von Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnungen, die in Vorschriften, Richtlinien oder Empfehlungen enthalten sind und die für die Festlegung von Empfehlungen für Lastannahmen von Bedeutung sind. Angaben sind nur für in Reihe stehende Kreiszyylinder mit gleichen Durchmessern vorhanden.

Im Abschnitt 5 werden Angaben aus der Literaturzusammenstellung - Teil 1: Literatúrauswertung vom November 1991 und Ergänzung

zum Teil 1: Literaturlauswertung vom März 1992 - kurz zusammen-
gestellte soweit sie für die Festlegung von Lastannahmen von
Bedeutung sind.

Im Abschnitt 6 werden die Empfehlungen für die praktische An-
wendung, die aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden,
dargestellt. Sie gelten für Stahlbetonschornsteine oder kreis-
zylindrische Bauwerke mit ähnlichen Massendämpfungsparametern
und können in Vorschriften eingearbeitet werden.

Abschnitt 6 enthält auch den Vergleich der sich aus diesen Emp-
fehlungen ergebenden Amplituden mit den gemessenen Amplituden-
werten.

Im Abschnitt 7 werden die im Teil 2 zusammengestellten, in Ost-
deutschland vorhandenen Schornsteingruppen statistisch ausge-
wertet. Sie zeigen daß 10% aller Schornsteingruppen Abstands-
verhältnisse von $a/d_1 \leq 3$ und 38% Abstandsverhältnisse von $a/d_1 \leq 5$
besitzen. In diesen Bereichen treten große Beanspruchungserhö-
hungen auf. Nicht nur der Schadensfall im Kraftwerk Boxberg,
sondern auch diese statistischen Erhebungen zeigen die prakti-
sche Bedeutung der Forschungsergebnisse.

2. Zusammenstellung der Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen

Jede im Windkanal untersuchte Reihen- oder Gruppenanordnung er-
hält eine Anordnungsnummer, auf die bei der Auswertung Bezug
genommen wird. Sie ist in Tabelle 2.1. definiert. Hier sind
auch die Meßwerte für den Einzelzylinder angegeben.

Tabelle 2.1 Zusammenstellung der Anordnungsnummern

Anordnungsnummer	Reynoldszahlenbereich	Massendämpfungsparameter	Verhältniswerte					Gruppe	Werte des Einzelzylinders			
			L_1/d_1	d_2/d_1	d_2'/d_1	L_2/L_1	L_2'/L_1		s_{ro}	ζ_Q	$\tilde{\eta}$	$\tilde{\zeta}_Q/s_{ro}^2$
01	transkritisch	62	12,8	1					0,243	0,11	0,0042	1,86
02	unterkritisch	26	15	1					0,176	0,15	0,024	4,84
03	unterkritisch	63	15	1					0,179	0,09	0,0052	2,81
04	transkritisch	62	12,8	1,5					0,243	0,11	0,0042	1,86
05	unterkritisch	26	15	1,5					0,176	0,15	0,024	4,84
06	unterkritisch	63	15	1,5					0,179	0,09	0,0052	2,81
07	unterkritisch	26	15	0,67		0,5			0,176	0,15	0,024	4,84
08	unterkritisch	26	15	0,67		0,75			0,176	0,15	0,024	4,84
09	unterkritisch	26	15	0,67		1			0,176	0,15	0,024	4,84
10	unterkritisch	63	15	1		1,5			0,179	0,09	0,0052	2,81
10a	transkritisch	58		1		1,37			0,232	0,135		2,50
11	unterkritisch	63	15	0,67		0,75			0,179	0,09	0,0052	2,50
12	unterkritisch	26	15	1,5		1,5			0,176	0,15	0,024	4,84
13	unterkritisch	63	15	1,5		1,5			0,179	0,09	0,0052	2,81
13a	transkritisch	58		1,5		1,37			0,232	0,135		2,50
14	unterkritisch	26	15	1,5		2,0			0,176	0,15	0,024	4,84
15	unterkritisch	63	15	1,5		2,0			0,179	0,09	0,0052	2,81
16	unterkritisch	31	15	1	1	1	1		0,173	0,11	0,0145	3,68
17	unterkritisch	63	15	1	1	1	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
18	unterkritisch	63	15	1	1	1	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
19	unterkritisch	8	15	1,5	1,5	2	2		0,174	0,17	0,0865	5,62
20	unterkritisch	10	15	1,5	1,5	2	2		0,177	0,165	0,068	5,27
21	unterkritisch	63	15	1,5	1,5	2	2		0,179	0,09	0,0052	2,81
22	unterkritisch	12	15	1,5	1	2	1		0,177	0,20	0,062	6,38
23	unterkritisch	63	15	1,5	1	2	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
24	unterkritisch	31	15	0,67	0,67	1	1		0,173	0,11	0,0145	3,68
25	unterkritisch	63	15	0,67	0,67	1	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
26	unterkritisch	27	15	1	1	1	1		0,176	0,145	0,0205	4,68
27	unterkritisch	63	15	1	1	1	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
28	unterkritisch	28	15	1,5	1,5	2	2		0,174	0,15	0,021	4,95
29	unterkritisch	63	15	1,5	1,5	2	2		0,179	0,09	0,0052	2,81
30	unterkritisch	27	15	1	1,5	1	1		0,176	0,145	0,0205	4,68
31	unterkritisch	63	15	1	1,5	1	1		0,179	0,09	0,0052	2,81
32	unterkritisch	27	15	1	1,5	1	2		0,176	0,145	0,0205	4,68
33	unterkritisch	63	15	1	1,5	1	2		0,179	0,09	0,0052	2,81
34	unterkritisch	59,2		1		1				0,187	0,10	
35	unterkritisch	59,2		1		1			0,187	0,10		2,80
36	unterkritisch	59,2		1		1			0,187	0,10		2,80

2.1. Verhältniswerte in Tabellenform

In der Tabelle 2.2 sind die Verhältniswerte Einzelanordnung/Mehrfachanordnung bei der Strouhalzahl und Mehrfachanordnung/Einzelanordnung bei den Querkraftbeiwerten und den Amplituden für alle Anordnungen in Abhängigkeit von Abstandsverhältnis a/d_1 angegeben. Es sind die Verhältniswerte von Meßergebnissen dargestellt.

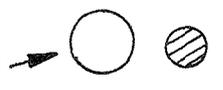
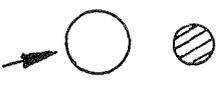
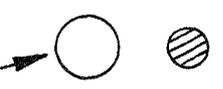
Dabei ist von den im Forschungsbericht Teil 3 zusammengestellten vollständigen Meßwerten jeweils die Anströmrichtung β maßgebend, die den Größtwert der Amplitude η_{\max} erzeugt.

Tabelle 2.2 Verhältniswerte für die Mehrfachnaordnung
Zusammengestellt sind die Verhältniswerte der gemessenen Werte.

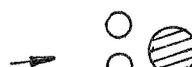
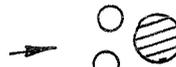
Anordnungsnummer	Abstandsverhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhalzahl	Querkraftbeiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
01 transkr. modelliert 	3	1,16	4,55	6,17
	4	1,09	1,27	1,55
	5	1,034	1,09	1,19
	7	1,01	1,18	1,17
	10	1,01	1,00	1,05
02 	3,25	1,23	3,40	5,08
	4	1,02	1,73	1,67
	5,05	0,99	1,80	1,63
	6,8	0,97	1,53	1,38
	10	1,05	1,87	1,96

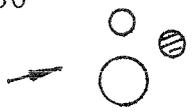
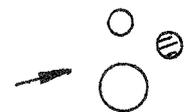
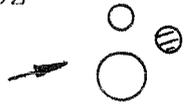
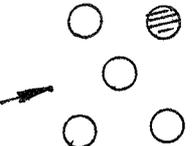
Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
03 	3	1,23	4,55	7,11
	4	1,05	3,00	3,27
	5	1,11	2,67	3,27
	10	1,07	2,22	2,50
	12,5	1,07	1,11	1,35
	15	1,08	1,11	1,35
04 trankrit. modelliert 	3	1,32	0,73	1,26
	4	1,10	1,09	1,31
	5	1,60	1,18	2,90
	7	1,38	1,09	2,12
	10	1,33	1,09	1,86
	12	1,34	1,09	1,93
05 	3,25	1,50	1,93	4,33
	4	1,66	0,67	1,71
	5,05	1,45	1,60	3,21
	6,8	1,42	1,00	1,79
	10	1,01	1,47	1,46
06 	3	1,72	3,33	10,00
	4	1,74	3,00	9,23
	5	1,60	2,78	7,12
	10	1,53	3,22	7,50
07 	3,25	1,05	3,27	3,25
	4	0,96	1,60	1,38
	5,05	0,93	1,67	1,50
	6,8	0,98	1,60	1,42
	10	0,99	1,73	1,58

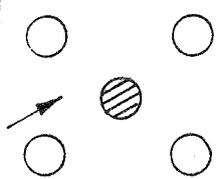
Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
08 	3,25	1,11	4,00	4,46
	4	1,02	2,20	2,13
	5,05	1,02	2,33	2,25
	6,8	1,00	2,13	2,00
	10	1,01	2,40	2,33
09 	3,25	1,40	3,53	6,13
	4	1,03	1,47	1,46
	5,05	1,06	2,07	2,17
	6,8	1,04	1,53	1,54
	10	1,05	2,00	2,13
10 	3	1,32	4,78	8,46
	4	1,08	5,00	5,96
	5	0,99	6,33	6,35
	10	0,97	2,67	2,50
	10a transkr. modelliert 	2,55	1,15	0,55
2,8		1,12	1,25	1,43
3		1,13	1,62	1,91
3,2		1,07	1,60	1,87
3,5		1,05	1,48	1,61
4		1,00	1,61	1,18
5		0,97	1,25	1,18
7		1,01	1,21	1,18
10		1,00	1,11	1,12
14		1,00	1,12	1,12
11 	3	1,01	3,67	3,85
	4	1,02	6,00	6,35
	5	1,05	5,67	6,35
	10	1,05	5,33	5,96

Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
12 	3,25	1,80	5,00	15,58
	4	1,61	2,13	5,08
	5,05	1,40	3,93	7,25
	6,8	1,42	2,07	3,79
	10	1,35	2,33	4,00
13 	3	1,56	3,78	9,23
	4	1,72	3,44	10,38
	5	1,49	4,78	10,96
	10	1,44	5,00	10,38
13a transkr. modelliert 	3	1,29	0,81	1,32
	4	1,28	1,12	1,47
	4,5	1,42	0,99	1,47
	5	1,42	0,94	1,76
	5,5	1,38	1,00	1,91
	6	1,35	0,97	1,76
	7	1,35	1,01	1,61
	10	1,21	1,10	1,32
14	14	1,21	1,14	1,23
14 	3,25	1,80	4,87	15,04
	4	1,69	2,00	5,33
	5,05	1,56	2,07	4,67
	6,8	1,43	1,73	3,29
	10	1,38	2,67	4,79
15 	3	1,74	3,67	11,35
	4	1,67	4,33	12,11
	5	1,63	4,33	11,73
	10	1,49	5,00	11,35

Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
16 	3	1,33	3,36	5,72
	4	1,06	2,18	2,41
	5	1,00	1,36	1,31
	6,7	1,12	0,91	1,10
	10	1,05	2,00	2,21
17 	3	1,42	4,11	8,46
	4	1,08	3,22	3,85
	5	1,12	4,00	5,00
	10	1,09	2,44	2,88
	18 	3	1,48	5,11
4		1,06	4,44	5,00
5		1,07	2,22	2,50
6,7		1,04	1,89	2,12
19 		3	1,69	1,71
	4	2,20	1,06	5,18
20 	4	2,16	1,70	6,00
	5	1,57	0,85	2,07
	6,7	1,44	0,97	1,96
	10	1,37	1,15	2,19
	21 	3	1,81	3,55
4		1,70	4,33	12,50
5		1,66	4,22	11,73
6,7		1,50	4,55	10,38
10		1,41	5,22	10,38
22 	3	1,59	1,70	4,31
	4	1,32	1,05	1,79
	5	1,06	1,30	1,44
	6,7	1,01	1,15	1,16

Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
23 	3	1,06	4,44	5,00
	4	1,49	2,78	6,35
	5	1,47	2,11	4,62
	6,7	1,60	2,33	5,96
24 	3	1,42	8,36	16,69
	4	1,05	2,91	3,17
	10	1,04	2,45	2,62
25 	3	1,20	2,00	2,88
	4	1,02	2,00	2,11
	5	1,01	2,44	2,50
	10	0,95	1,11	0,96
26 	3	1,05	1,52	1,66
	4	0,99	2,28	2,20
	5	1,06	1,72	2,00
	10	1,02	1,38	1,41
27 	3	1,05	3,33	3,85
	4	1,03	6,56	7,12
	5	1,00	5,00	5,00
	10	1,10	2,00	2,50
28 	3	0,99	2,07	2,05
	4	1,29	2,60	4,43
	10	1,33	4,13	7,38
29 	3	1,01	4,00	4,23
	4	1,36	5,67	10,38
	5	1,44	5,11	10,96
	10	1,38	6,11	11,73

Anordnungs- nummer	Abstands- verhältnis a/d_1	Verhältniswerte		
		Strouhal- zahl	Querkraft- beiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
30 	3	0,95	1,31	1,22
	4	1,54	1,59	3,76
	10	1,36	1,17	2,20
31 	3	1,25	0,55	0,77
	4	1,39	3,89	7,50
	5	1,52	4,33	10,00
	10	1,50	2,89	6,73
32 	3	2,00	2,62	10,29
	4	1,42	2,21	4,49
	10	1,34	2,97	5,22
33 	3	1,47	0,78	1,73
	4	1,46	4,67	10,00
	5	1,52	4,89	11,35
	10	1,39	5,78	11,35
34 	3	1,30	4,30	7,24
	4	1,08	2,60	3,04
	5	1,13	2,10	2,66
	6,7	1,13	1,90	2,43
	10	1,13	1,70	2,13
	12,5	1,13	1,60	1,99
35 	3	1,01	1,50	1,54
	4	1,20	2,70	4,20
	5	1,15	4,80	5,70
	6,7	1,26	4,20	4,93
	10	1,26	2,70	3,04
	12,5	1,24	3,50	4,93

Anordnungsnummer	Abstandsverhältnis a/d ₁	Verhältniswerte		
		Strouhalzahl	Querkraftbeiwert	Auslenkung
		<u>einzel</u> mehrfach	<u>mehrfach</u> einzel	
36 	3	1,27	2,80	3,04
	4	1,18	4,00	4,93
	5	1,18	2,30	2,90
	7	1,18	1,50	2,13
	10	1,15	1,60	2,06
	14	1,17	1,40	1,75
	17	1,17	1,10	1,54

2.2 Verhältniswerte in Diagrammform

In folgenden Diagrammen sind die Verhältniswerte grafisch in Abhängigkeit von a/d₁ dargestellt.

Hierbei bedeuten

$$\text{Strouhalzahlverhältniswert} = S_{re} / S_{rd}$$

$$= \text{Strouhalzahl, Einzelanordnung} / \text{Strouhalzahl, Mehrfachanordnung}$$

$$\text{Querkraftbeiwertverhältnis} = \tilde{c}_{Qd} / \tilde{c}_{Qe}$$

$$= \text{Querkraftbeiwert, Mehrfachanord.} / \text{Querkraftbeiw., Einzelanordng.}$$

Auf den Blättern Seite 20 bis 35 sind die Verhältniswerte in Abhängigkeit von der Anordnung (Doppel-, Dreieckanordnung...) vom Reynoldszahlbereich (transkritisch, unterkritisch), vom Masendämpfungsparameter ($m_{\lambda} = MD = 58, \dots, 63$ bzw. $m_{\lambda} = MD = 8, \dots, 31$) und

vom Abstandsverhältnis a/d_1 für die Strouhalzahl sowie für die Querkraftbeiwerte dargestellt. Verwendet wurden die Meßwerte für Anströmwinkel zur Reihung β , bei denen maximale Amplituden η_{\max} auftreten. Bei den Diagrammen der Strouhalzahl ist zusätzlich die in "DIN 4133, Bild A.7, November 1991, Schornsteine aus Stahl" enthaltene Beziehung als Kurve eingetragen. Die Diagramme der Strouhalzahlen und Querkraftbeiwerte mit Abstandsverhältnissen a/d_1 enthalten auch die im Abschnitt 6 angegebenen Empfehlungen für Lastannahmen von Stahlbetonschornsteinen. Die Diagramme enthalten in der Titelzeile den Massendämpfungsparameter, die Schlankheit des Meßzylinders sowie den Reynoldszahlbereich. Auf der Ordinatenachse sind die Verhältnismerte der Strouhalzahlen ($S_{r,e}/S_{r,d}$) bzw. der Querkraftbeiwerte ($\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e}$) aufgeführt. Die Abszissenachse enthält das Abstandsverhältnis a/d_1 .

Die Legende zeigt die Anordnungsnummer (z.B. 01e/01d bzw. 01) sowie das Durchmesserverhältnis d_2/d_1 (d_2'/d_1) und das Höhenverhältnis l_2/l_1 (l_2'/l_1) von Blenden-/Meßzylinder.

Beispiele:

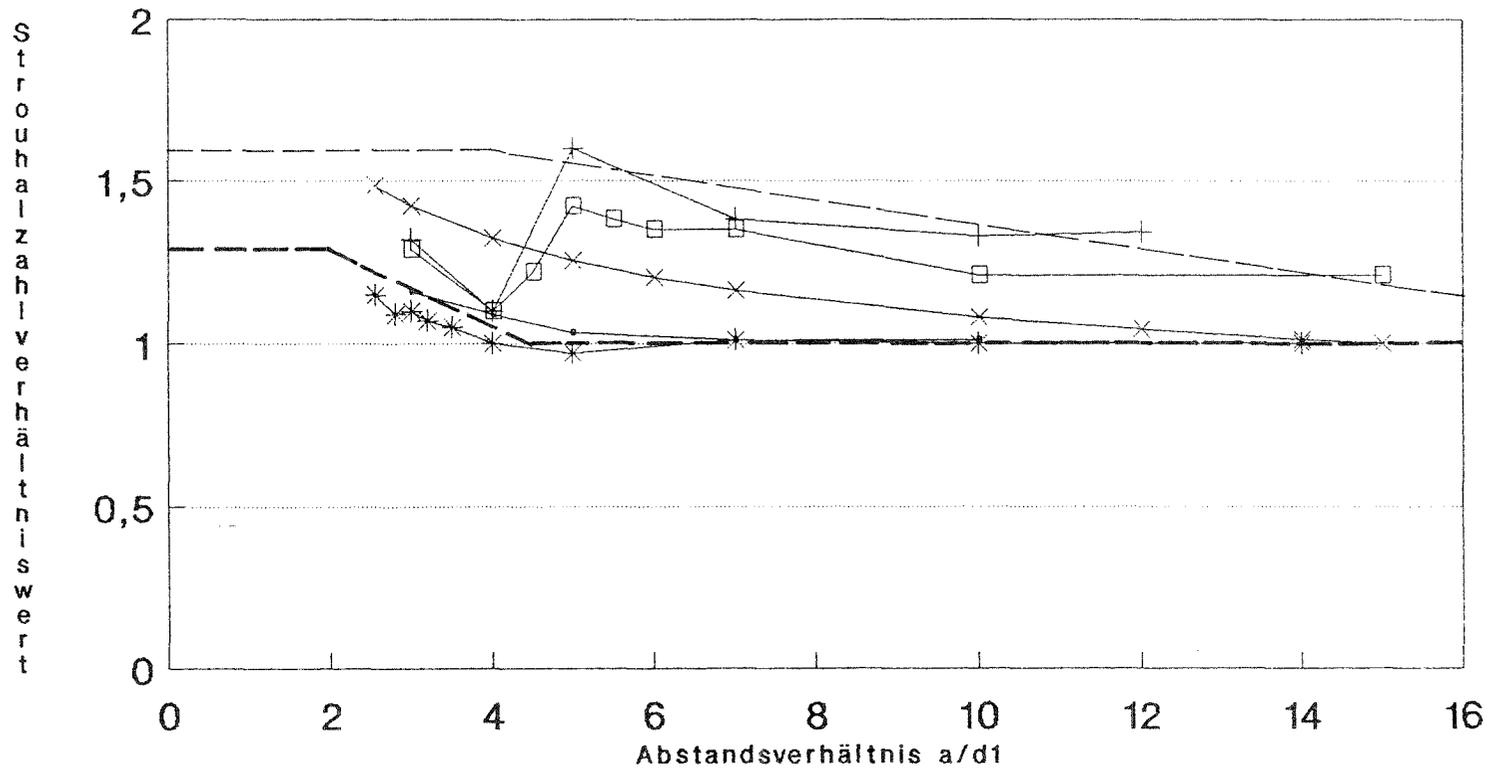
01e / 01d	-	1 , 1
\ /		\ /
Anordnungs-		d_2/d_1 l_2/l_1
nummer		

17e / 17d	-	1; 1; 1; 1
Anordnungs-		d_2/d_1 d'_2/d_1 l_2/l_1 l'_2/l_1
nummer		

Die untere Zeile enthält die Meßgrößen des Einzelzylinders. Auf diese sind alle Meßgrößen der Mehrfachanordnung und auch die Größen der Empfehlungen bezogen.

Doppelanordnung-Strouhalzahlen

MD=58...62;transkritisch;l/d1=12.8



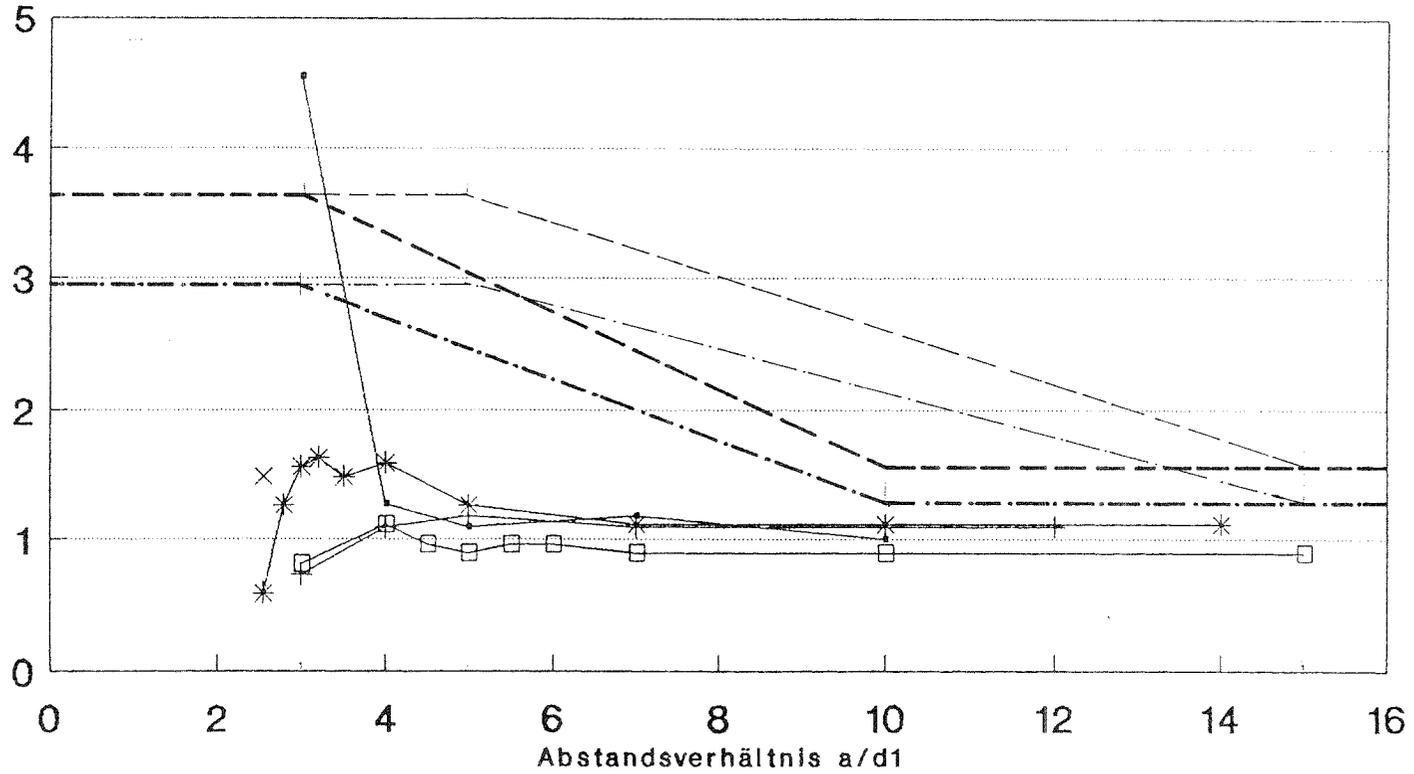
- 01e/01d-1;1 —+— 04e/04d-1.5;1 —*— 10ae/10ad-1;1.37
- 13ae/13ad-1.5;1.37 —x— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr = 0.243; c_q = 0.11 (\varnothing 1 + \varnothing 4)$
 $Sr = 0.232; c_q = 0.135 (1\varnothing a + 13a)$

Doppelanordnung-Querkraftbeiwerte

MD=58...62;transkritisch;l/d1=12.8

Querkräftebeiwertverhältniswert



—●— 01e/01d-1;1

—+— 04e/04d-1.5;1

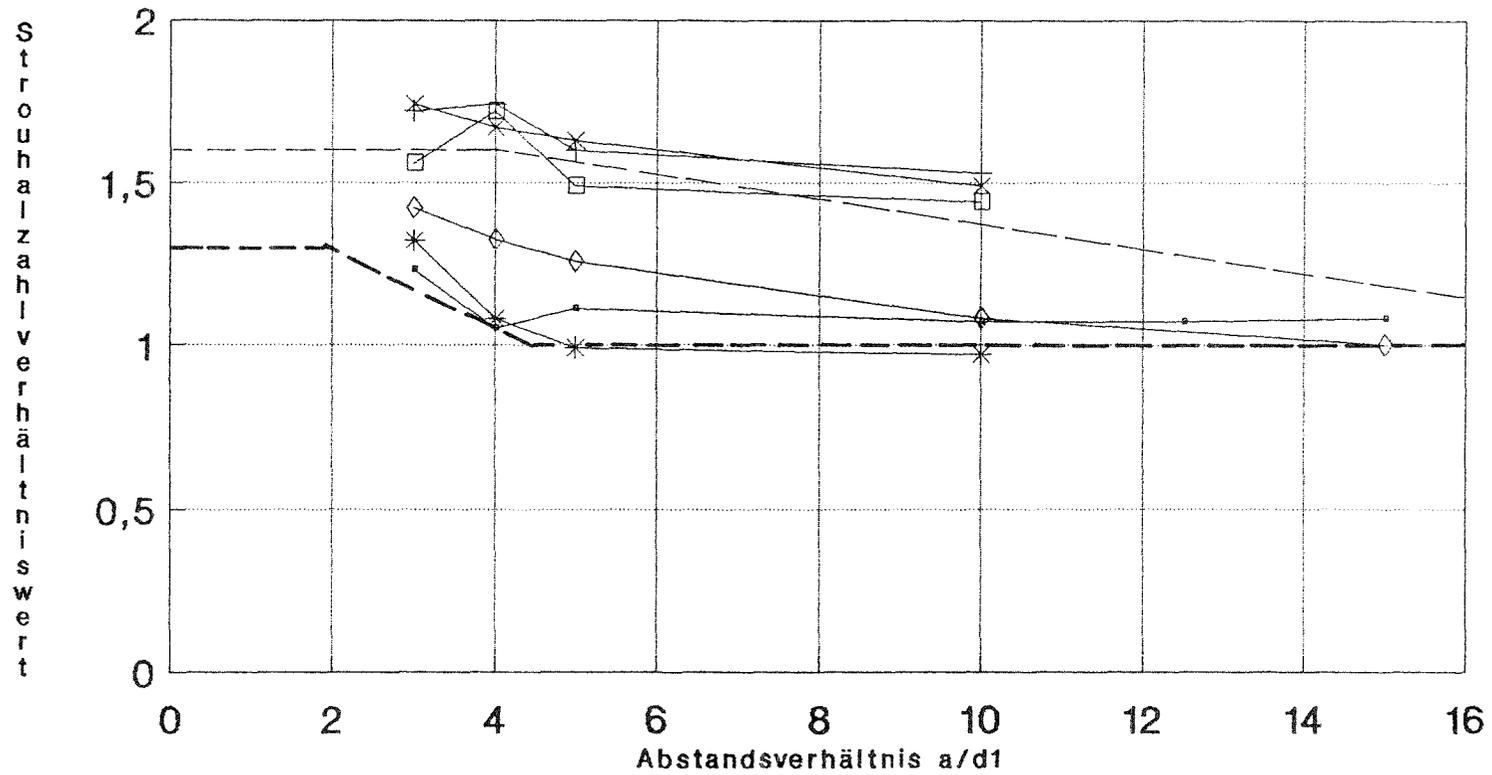
—*— 10ae/10ad-1;1.37

—□— 13ae/13ad-1.5;1.37

Einzelzylinder: $S_r = 0.243$; $c_q = 0.11$ ($\emptyset 1 + \emptyset 4$)
 $S_r = 0.232$; $c_q = 0.135$ ($1\emptyset a + 13a$)

Doppelanordnung-Strouhalzahlen

MD=63;unterkritisch;l/d1=15

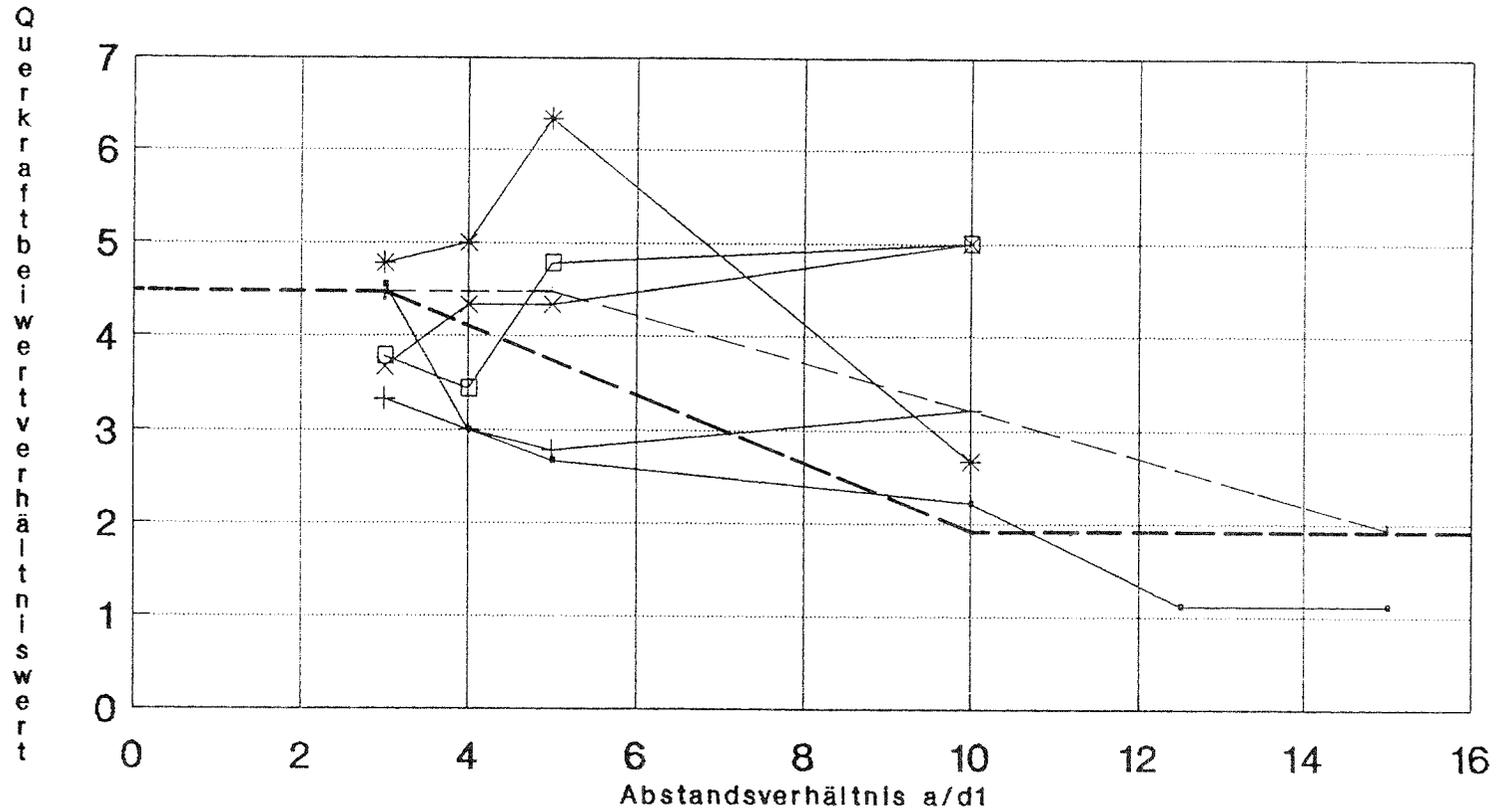


- 03e/03d-1;1 —+— 06e/06d-1.5;1 —*— 10e/10d-1;1.5
- 13e/13d-1.5;1.5 —x— 15e/15d-1.5;2 —◇— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.179; cq=0.09$

Doppelanordnung-Querkraftbeiwerte

MD=63;unterkritisch;l/d1=15



—○— 03e/03d-1;1

—+— 06e/06d-1.5;1

—*— 10e/10d-1;1.5

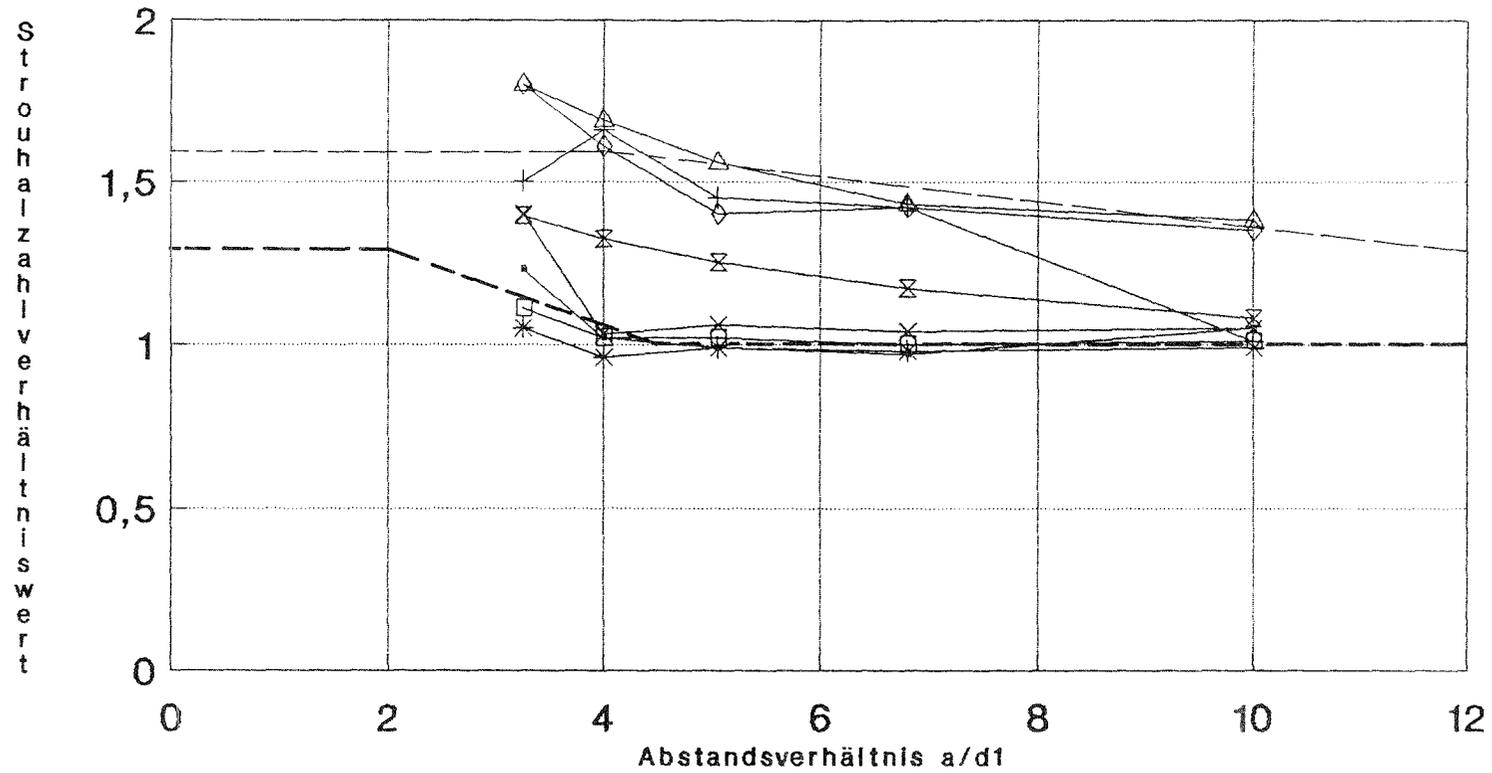
—□— 13e/13d-1.5;1.5

—×— 15e/15d-1.5;2

Einzelzylinder: $S_r=0.179$; $c_q=0.09$

Doppelanordnung-Strouhalzahlen

MD=26; unterkritisch; $l/d_1=15$



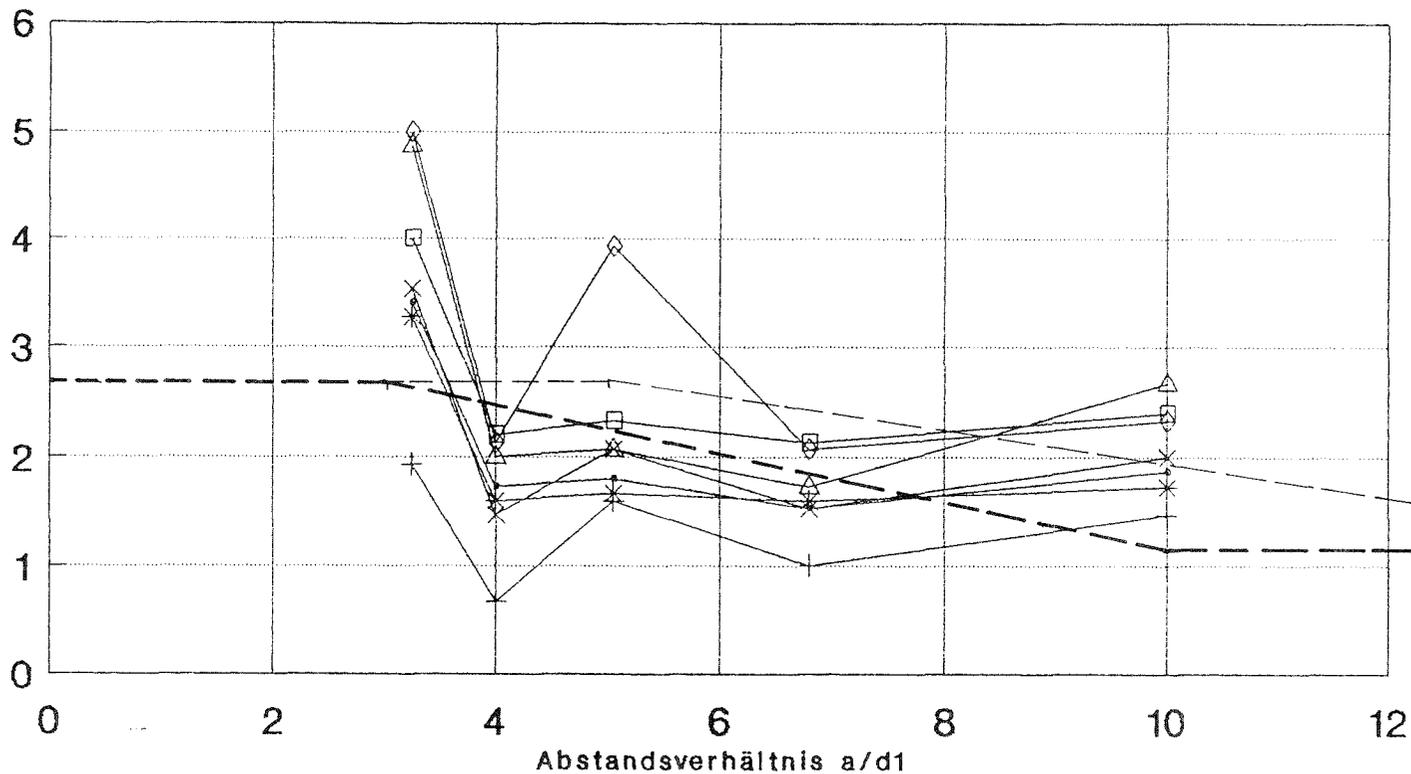
—●— 02e/02d-1;1 + 05e/05d-1.5;1 * 07e/07d-0.67;0.5 ○ 08e/08d-0.67;0.7
 × 09e/09d-0.67;1 ▽ 12e/12d-1.5;1.5 △ 14e/14d-1.5;2 ⊗ DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.176$; $cq=0.15$

Doppelanordnung-Querkraftbeiwerte

MD=26;unterkritisch;l/d1=15

Querkraftbeiwertverhältniswert

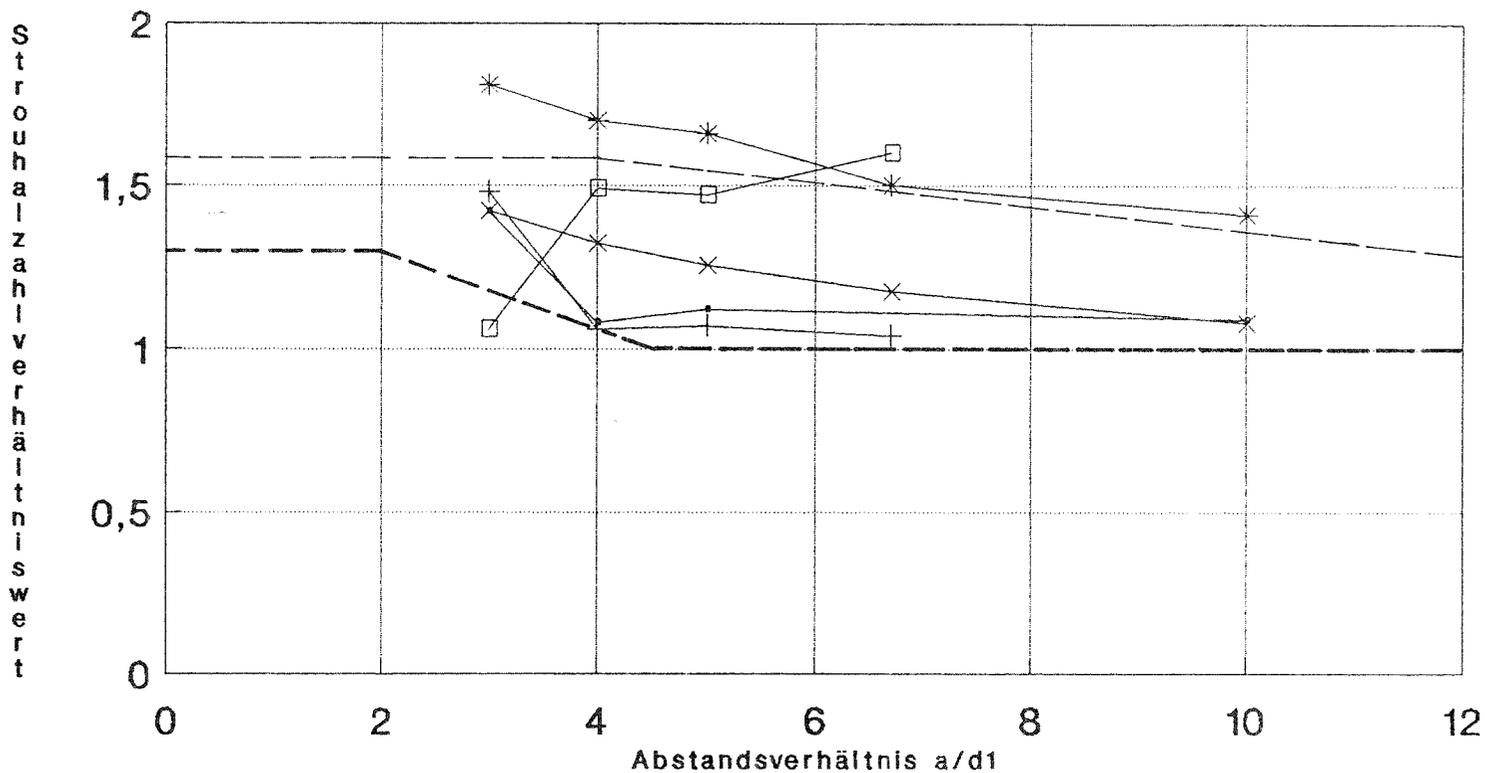


—○— 02e/02d-1;1 —+— 05e/05d-1.5;1 —*— 07e/07d-0.67;0.5 —□— 08e/08d-0.67;0.7
 —×— 09e/09d-0.67;1 —◇— 12e/12d-1.5;1.5 —△— 14e/14d-1.5;2

Einzelzylinder: $Sr=0.176$; $cq=0.15$

Dreieranordnung-Strouhalzahlen

MD=63;unterkritisch;l/d1=15



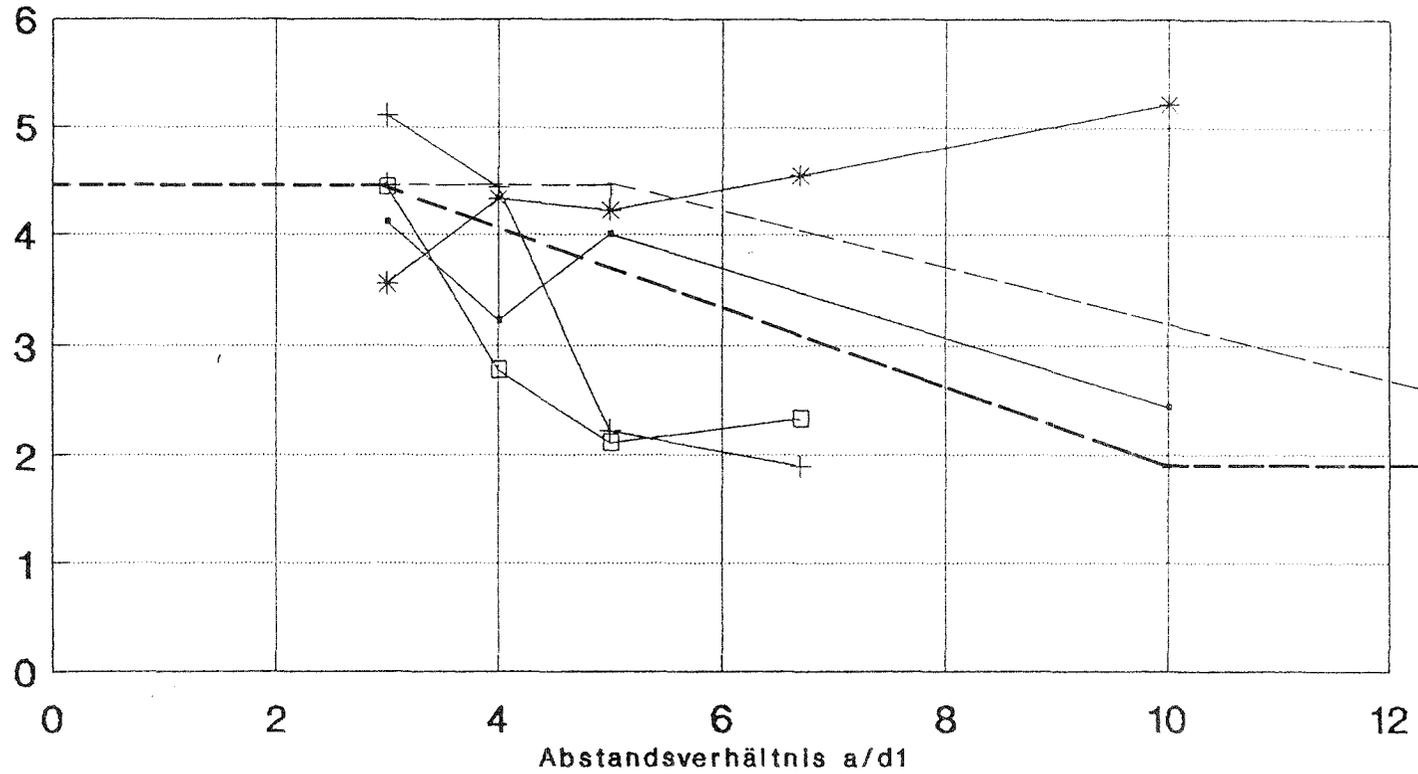
—●— 17e/17d-1;1;1 —+— 18e/18d-1;1;1 —*— 21e/21d-1.5;1.5;2;2
 —□— 23e/23d-1.5;1;2;1 —x— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.179$; $cq=0.09$

Dreieranordnung-Querkraftbeiwerte

MD=63;unterkritisch;l/d1=15

Querkraftbeiwertverhältniswert



—●— 17e/17d-1;1;1

—+— 18e/18d-1;1;1

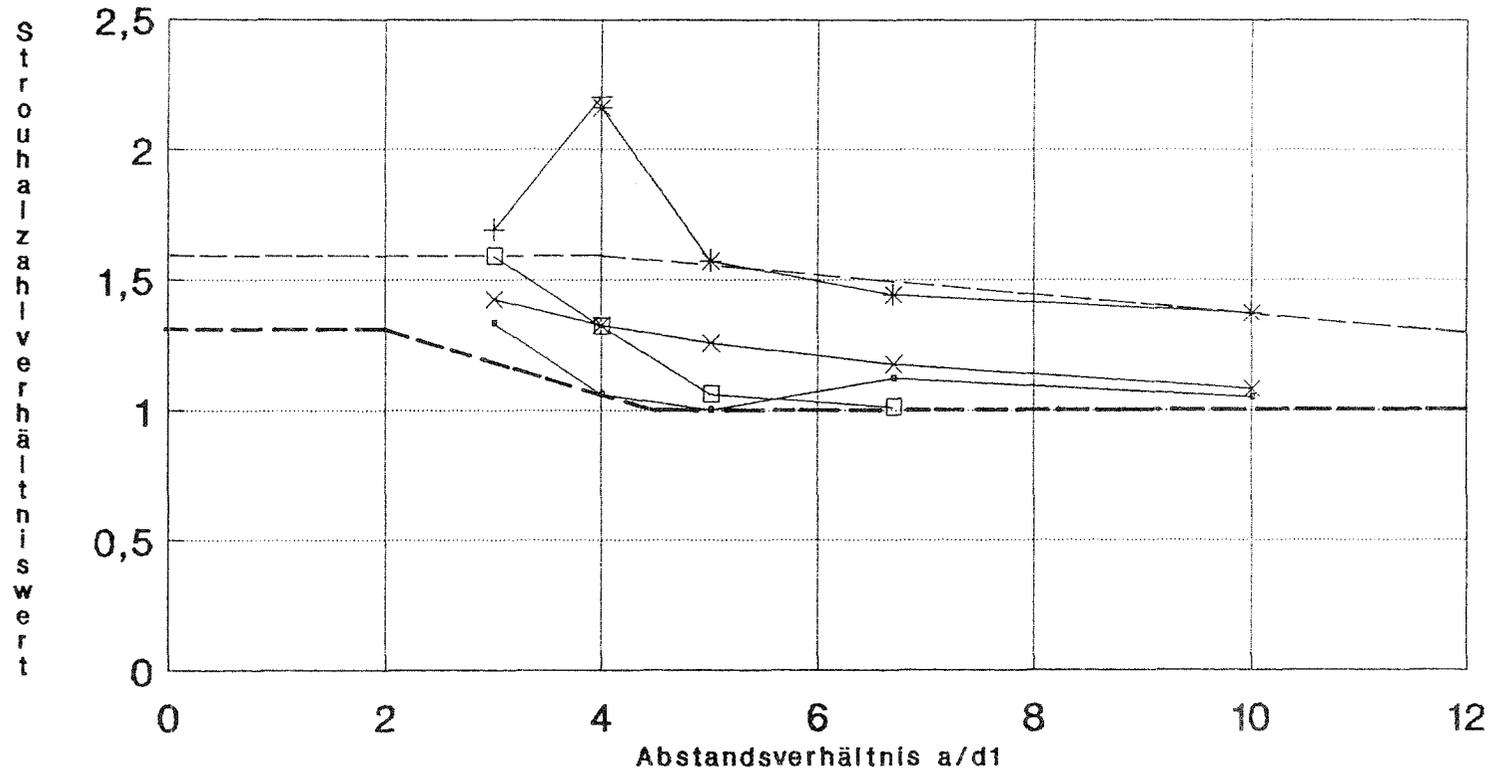
—*— 21e/21d-1.5;1.5;2

—□— 23e/23d-1.5;1;2;1

Einzelzylinder: $Sr=0.179; cq=0.09$

Dreieranordnung-Strouhalzahlen

MD=8;10;12;31-unterkritisch;l/d1=15

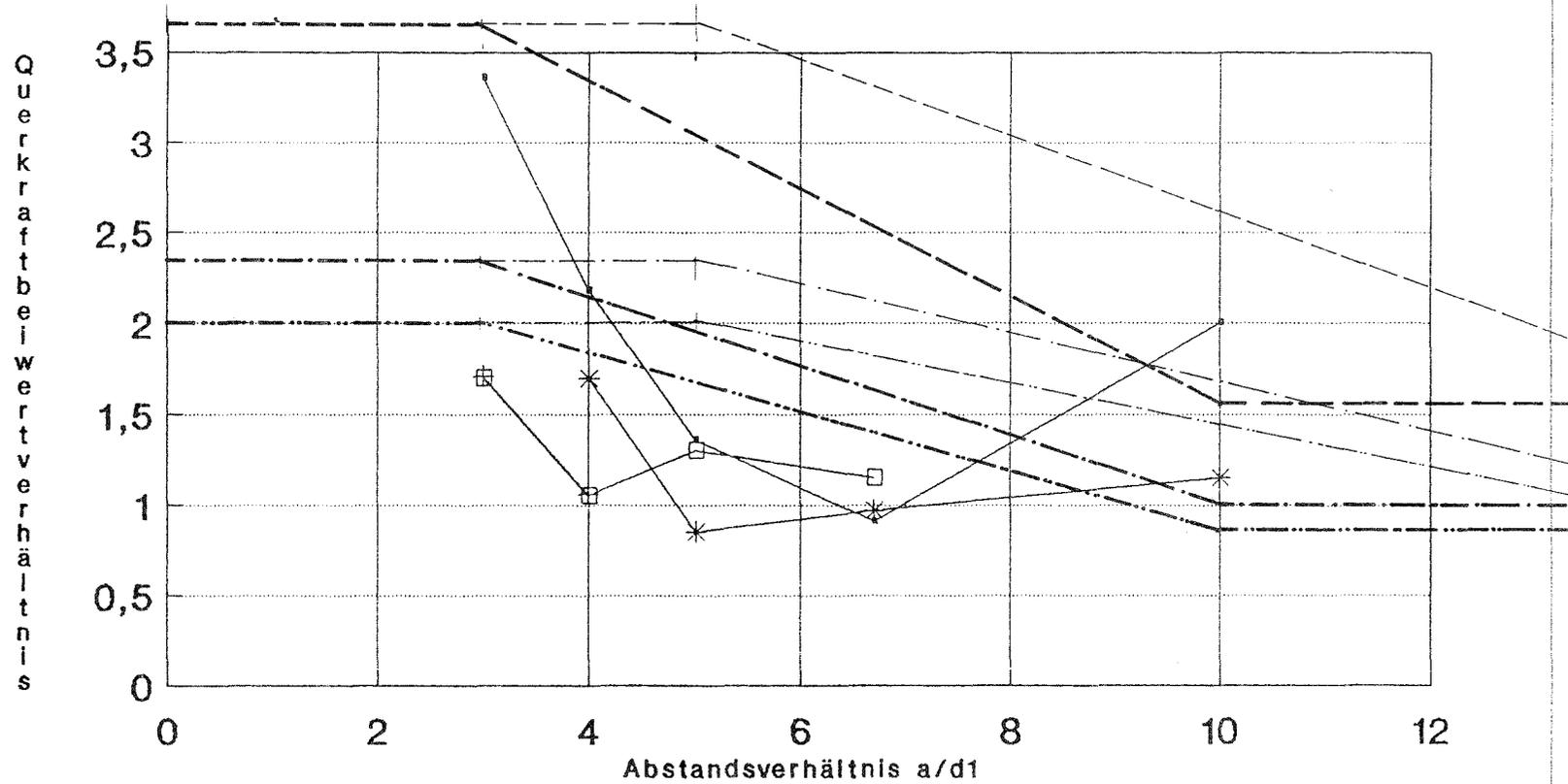


—○— 16e/16d-1;1;1;1 —+— 19e/19d-1.5;1.5;2;2 —*— 20e/20d-1.5;1.5;2;2
—□— 22e/22d-1.5;1;2;1 —×— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr = 0.173 \dots 0.177$

Dreieranordnung-Querkraftbeiwerte

MD=8;10;12;31-unterkritisch;l/d1=15



- +— 16e/16d-1;1;1
- *— 20e/20d-1.5;1.5;2;2
- +— 19e/19d-1.5;1.5;2;2
- 22e/22d-1.5;1;2;1

Einzelzylinder:cq=0,11...0,20

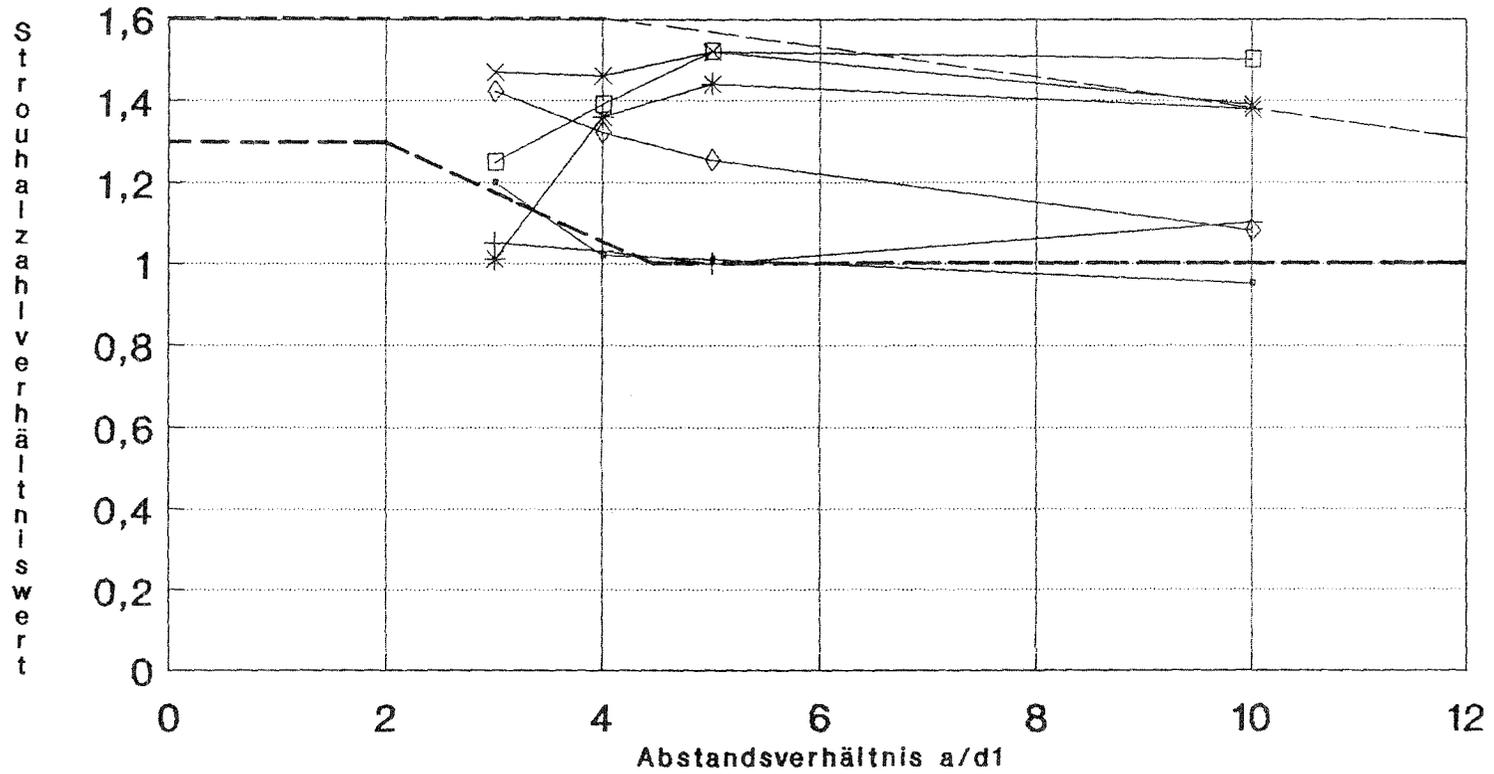
(16) cq=1,11 ————

(19+20) cq=0,17 -·-·-·-

(22) cq=0,20 -·-·-·-

Dreieckanordnung-Strouhalzahlen

MD=63;unterkritisch;l/d1=15;



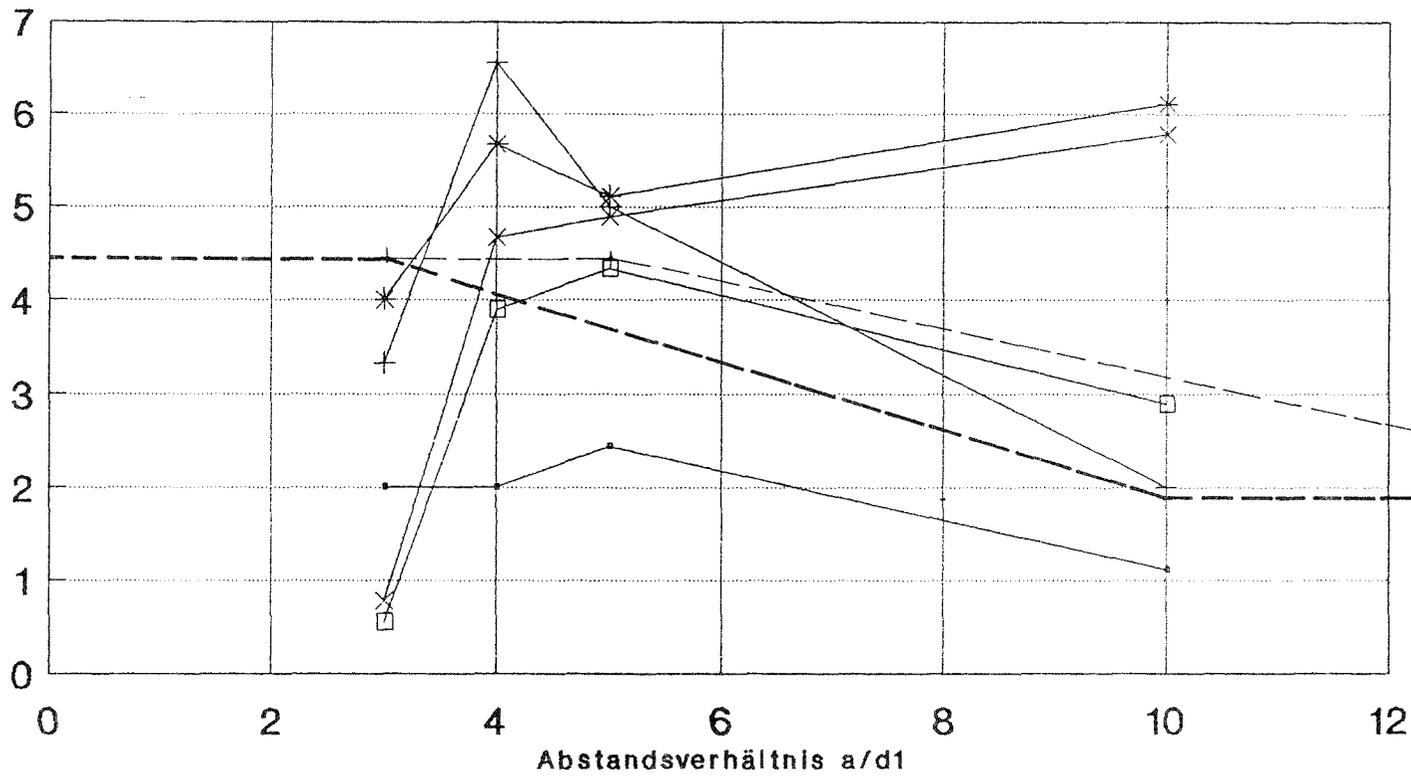
—+— 25e/25d-0.67;0.67;1 —+— 27e/27d-1;1;1 * 29e/29d-1.5;1.5;2;2
 —□— 31e/31d-1;1.5;1;1 —*— 33e/33d-1;1.5;1;2 ◇ DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.179; c_q=0.09$

Dreieckanordnung-Querkraftbeiwert

MD=63;unterkritisch;l/d1=15;

Querkraftbeiwertverhältniswert

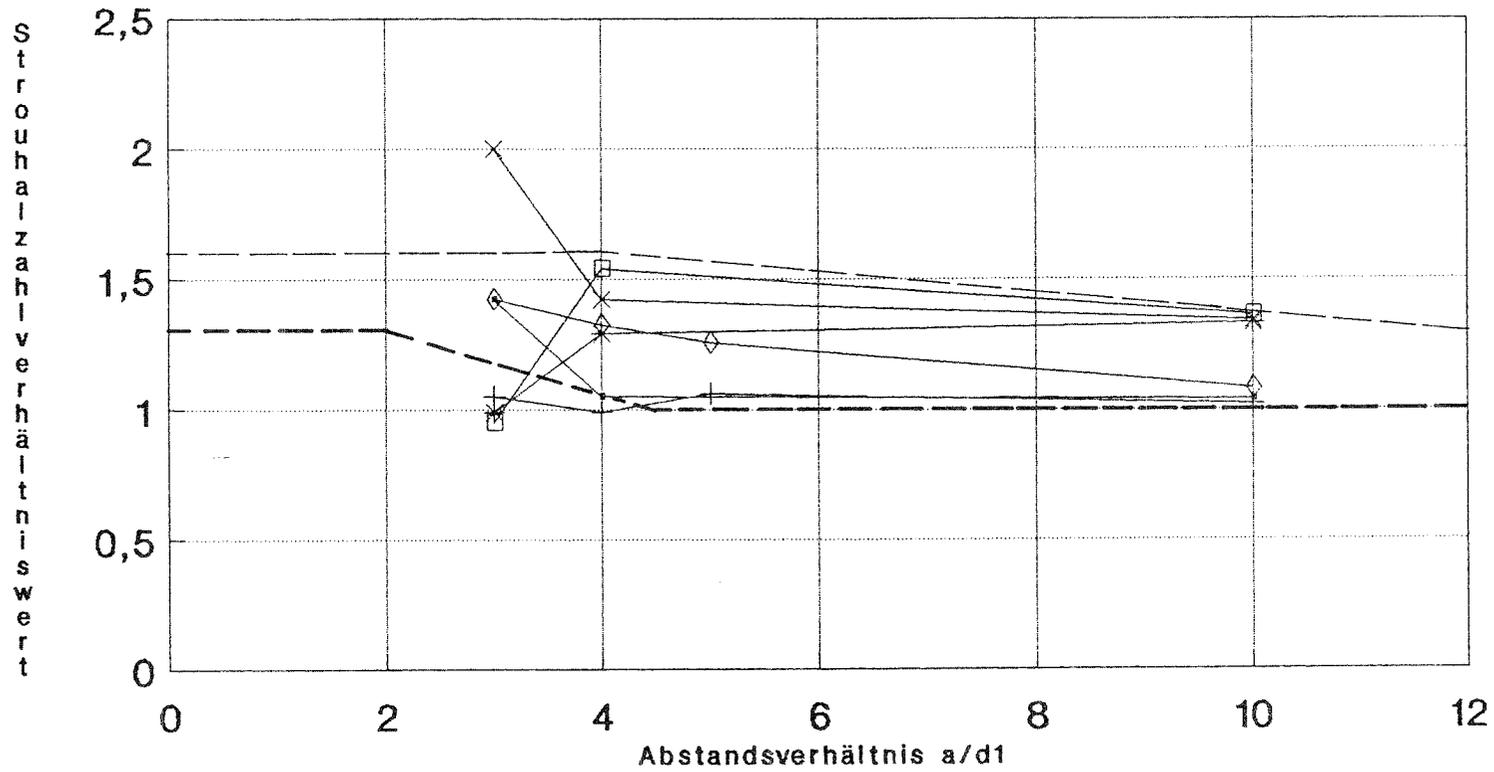


—●— 25e/25d-0.67;0.67;1 —+— 27e/27d-1;1;1;1 —✱— 29e/29d-1.5;1.5;2;2
 —□— 31e/31d-1;1.5;1;1 —✱— 33e/33d-1;1.5;1;2

Einzelzylinder: Sr=0.179; cq=0.09

Dreieckanordnung-Strouhalzahl

MD=27;28;31;unterkritisch;l/d1=15



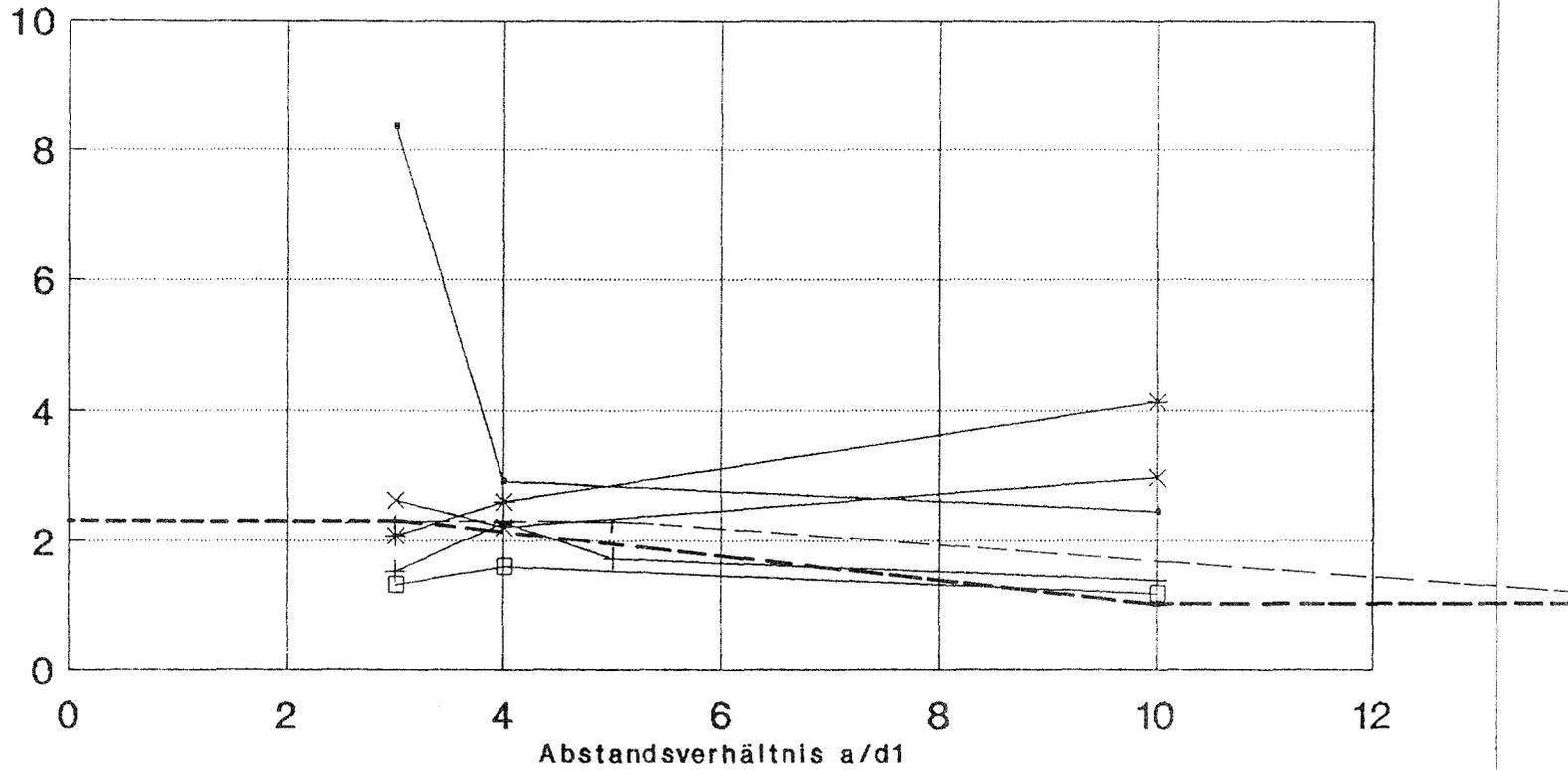
—•— 24e/24d-0.67;0.67;1 —+— 26e/26d-1;1;1 —*— 28e/28d-1.5;1.5;2;2
—□— 30e/30d-1;1.5;1;1 —x— 32e/32d-1;1.5;1;2 —◇— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.173...0.176$

Dreieckanordnung-Querkraftbeiwert

MD=27;28;31;unterkritisch;l/d1=15

Querkraftbeiwertverhältniswert

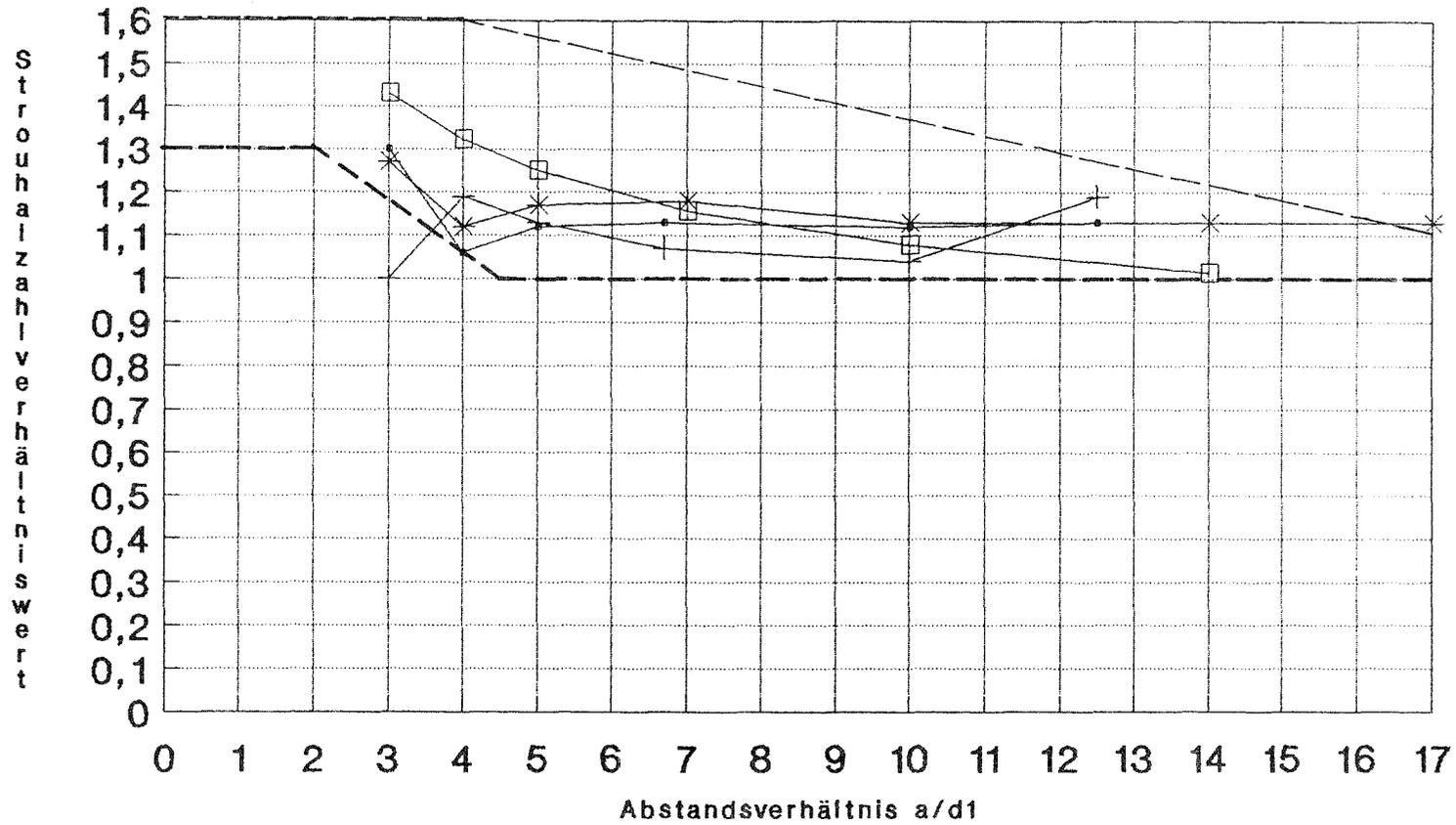


—●— 24e/24d-0.67;0.67;1
—+— 26e/26d-1;1;1;1
—*— 28e/28d-1.5;1.5;2;2
—□— 30e/30d-1;1.5;1;1
—■— 32e/32d-1;1.5;1;2

Einzelzylinder:cq=0.173...0.176

Vierer- u. Fünferanordnungen - Strouhalzahl

MD=59.2; unterkritisch; $l/d_1=15$



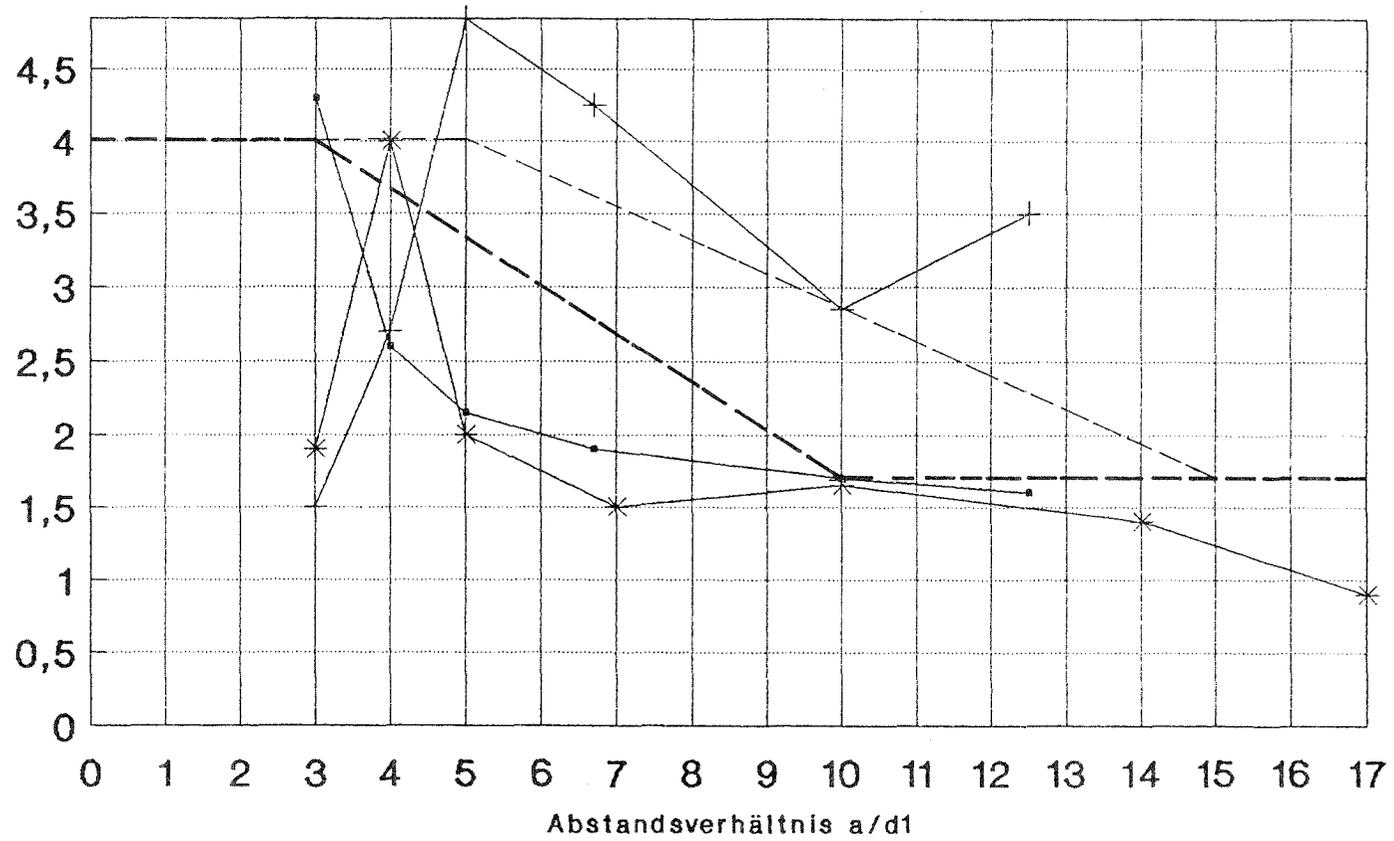
—•— 34e/34d-1;1 —+— 35e/35d-1;1 —*— 36e/36d-1;1 —□— DIN4133

Einzelzylinder: $Sr=0.187$; $cq=0.10$

Vierer- u. Fünferanord.-Querkräftebeiwerte

MD=59.2; unterkritisch; l/d1=15

Querkräftebeiwertverhältniswert



—•— 34e/34d-1;1

—+— 35e/35d-1;1

—*— 36e/36d-1;1

Einzelzylinder: Sr=0.187; cq=0.10

3. Aussagen zu Versuchsergebnissen an Einzelmodellen

Die Effektivwerte der Beanspruchungen in Querrichtung wurden nur beim jeweiligen Resonanzstaudruck ermittelt. Während die Resonanzstrouhalzahlen sich in Gesetzmäßigkeit einordnen lassen, streuen die Querkraftbeiwerte stark ($\tilde{c}_q \approx 0,05 \dots 0,5$). Es ist jedoch eine Tendenz erkennbar, daß große Auslenkungen oder logarithmische Dämpfungsdekrementen zu großen Querkraftbeiwerten führen. Die Querkraftbeiwerte nehmen mit steigenden ($m_{\text{G}} \cdot S_r^2$) beim Einzelzylinder ab und bei der Doppelanordnung zu.

Hauptgründe werden neben den Einflüssen der Modell- und Untersuchungsparameter die unterschiedlichen Korrelationen der Querkraft über die Länge, aber auch die Schwankung der Phase zwischen Querkraft und Bewegung sein. Es ist fraglich, ob z.B. einer bestimmten Amplitude allgemein eine bestimmte Korrelationslänge zugeordnet werden kann. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse für den Querkraftbeiwert (Verhältniswert Mehrfachanordnungen zum Einzelzylinder) können Fehler auftreten, die aus Unterschieden von Amplitude, Turbulenz und Wirbelfrequenz beim Einzelzylinder bzw. bei der Doppelanordnung herrühren. Diese Fehler sind nicht einschätzbar und darum nicht zu korrigieren.

Im Versuch wurden die Querkraftwerte ermittelt aus

- dynamischer Beanspruchung
- dazugehörigem Resonanzstaudruck
- zugeordnetem logarithmischem Dämpfungsdekrement

Für die Modelluntersuchungen wurden folgende Meßzylinder verwendet:

- unterkritischer Reynoldszahlbereich
Glasfaser-Laminat $\varnothing 30 \times 450$; Wandstärke 1,5 mm; mit oberer und untere Endscheibe
- modellierter transkritischer Reynoldszahlbereich
ohne Endscheiben; Aluminium $\varnothing 110 \times 1400$;
Wandstärke 5 mm

Die unterschiedlichen Dämpfungswerte wurden durch feinen Sand am oberen Zylinderende erzeugt.

Wiederholt und verteilt über den Versuchszeitraum wurden die resultierenden Beiwerte des Meßzylinders gemessen. Siehe hierzu auch Abb. 16 in Teil 3, Seite 44.

4. Zusammenstellung von Aussagen über winderregte Querschwingungsbeanspruchungen von Bauwerken in Gruppen- und Reihenanordnungen in Richtlinien oder Normen

4.1 DIN 4133, November 1991, Schornsteine aus Stahl

A.2.2.7 Wirbelerregte Schwingungen von in Reihe stehenden Schornsteinen

Bei in Reihe stehenden Schornsteinen können bei bestimmten Anströmwinden erhöhte Beanspruchungen aus Querschwingungen auftreten. Sofern kein genauere Nachweis geführt wird, ist bei Abständen $a < 15d$ der aerodynamische Erregerkraftbeiwert c_{1st} nach Abschnitt A.2.2.3 mit 1,5 zu multiplizieren und die Strouhalzahl S nach Bild A.7 anzunehmen.

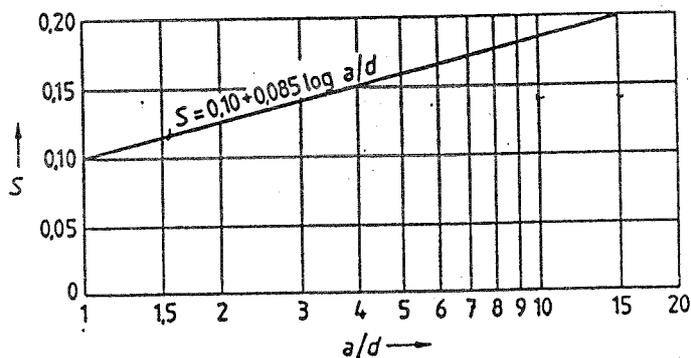


Bild A.7. Strouhalzahl S bei in Reihe stehenden Schornsteinen

4.2 Nieser, H.; Engel, V.: Industrieschornsteine in Massivbauweise - Kommentar zu DIN 1056, 1. Auflage 1986, Beuth Verlag GmbH

A.2.2.2.7 Schornsteine in Reihenordnung

Bei in Reihe stehenden Schornsteinen können bei bestimmten Anströmwindeln erhöhte Beanspruchungen aus Querschwingungen auftreten. Sofern kein genauere Nachweis geführt wird, ist bei Abständen $a < 15d$ der aerodynamische Erregerkraftbeiwert c_{LEI} nach Abschnitt A.2.2.2.4 mit 1,5 zu multiplizieren und die Strouhalzahl S nach Bild 62 anzunehmen.

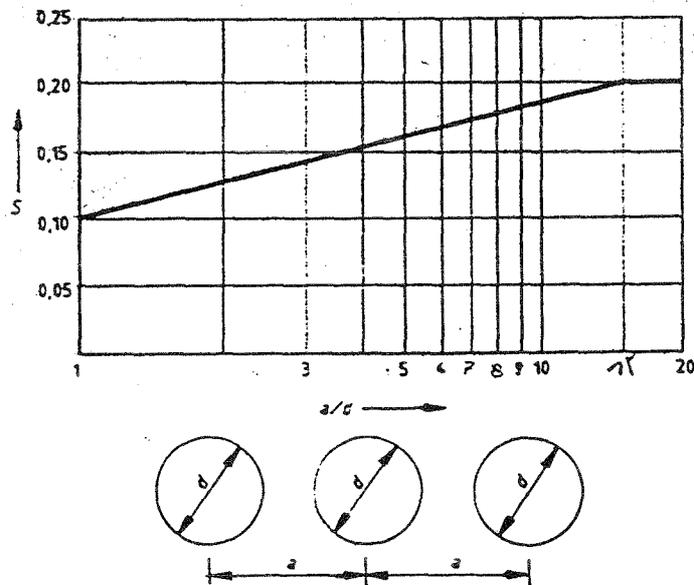


Bild 62. Strouhalzahl S bei in Reihe stehenden Schornsteinen

**4.3 CICIND Model Code for Steel Chimneys. Chimney Congress,
18.-20 Mai 1988, Brighton-England**

Die Strouhalzahl wird in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis A/d (a/d) bei Schornsteinen in Reihenanordnung festgelegt. Für $A/d > 15$ beträgt die Strouhalzahl 0,2.

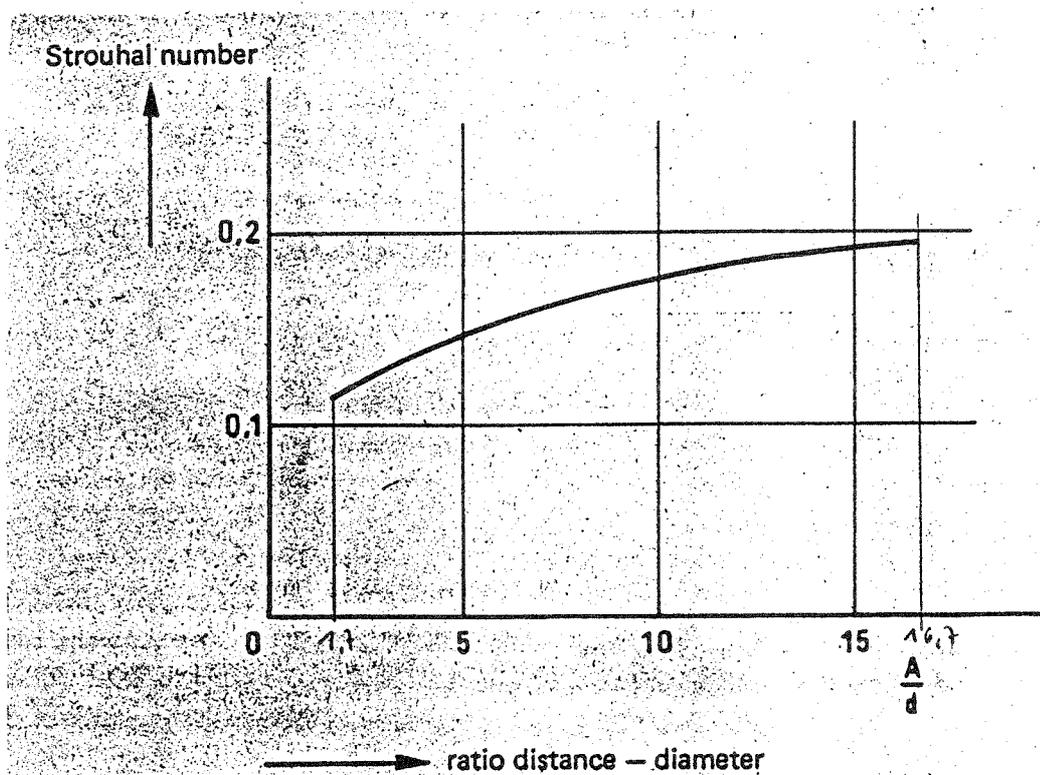


Figure 7.4. The reduction of the Strouhal number caused by a nearby chimney.

4.4 European Convention for Constructional Steelwork (E.C.C.S.)
Technical, Committee T. 12: Wind Effects, Recommendations
for the Calculation of Wind Effects on Buildings and
Structures, September 1978

3.3.3.2 a Gesamtschwingungen eines Einzelbauwerkes durch
senkrechte Biegung in Windrichtung (Querschwingungen
durch Resonanzregung)

b) Constructions identiques disposées en file

A partir de la deuxième construction, l'effet résultant est amplifié sous l'action des tourbillons provenant de constructions précédentes dans la file. Pour tenir compte de cette amplification, la pression équivalente Q , doit être multipliée par 2 si le pas de la file est inférieur à $7b$, et par un coefficient interpolé linéairement entre 2 et 1 si le pas est compris entre $7b$ et $14b$.

b) Gleichartige Bauwerke in Reihenanzordnung

Ab zweitem Bauwerk wird die sich ergebende Belastung durch die Einflüsse der Wirbel, die von den vorhergehenden Bauwerken in der Reihe kommen, vergrößert. Um diese Vergrößerung zu berücksichtigen, muß der äquivalente Druck Q mit zwei multipliziert werden, wenn das Abstandsverhältnis der Reihe bis $7b$ beträgt, und mit einem Koeffizienten zwischen 2 und 1 linear interpoliert werden, wenn das Abstandsverhältnis zwischen $7b$ und $14b$ liegt.

4.5 Schwingungen bei Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanzordnungen ohne Schwingungsdämpfer. IVS- Richtlinie 105, Mai 1991 -Stahlschornsteine

Bei in Reihe stehenden, nicht gekoppelten Schornsteinen kann die Berechnung der wirbelerregten Querschwingungen nach DIN 4133.A.2.2.7 durchgeführt werden. Bei Schornsteinen in Reihe

ohne Verbindung untereinander kann das sogenannte Interferenz-Galloping auftreten. Bei einem Abstandsverhältnis $a/d \leq 3$ ist eine Überprüfung nach dieser Vorschrift erforderlich. In dieser Richtlinie sind auch Angaben über gekoppelte Schornsteine enthalten.

4.6 DIN 1055 Teil 40 (Vornorm) Vorlage Juli 1990

Lastannahmen für Bauten; Windwirkungen auf Bauwerken

A 4.5 Wirbelerregte Schwingungen von in Reihe stehenden Kreiszyllindern

Bei in Reihe stehenden Kreiszyllindern können bei bestimmten Anströmwinkeln erhöhte Beanspruchungen aus Querschwingungen auftreten. Sofern kein genauere Nachweis geführt wird, ist bei Abständen $a \leq 15 d$ der aerodynamische Erregerkraftbeiwert c_{jat} nach Abschnitt 7.1.2.3 mit 1,5 zu multiplizieren und die Strouhalzahl S nach Bild A.6 anzunehmen.

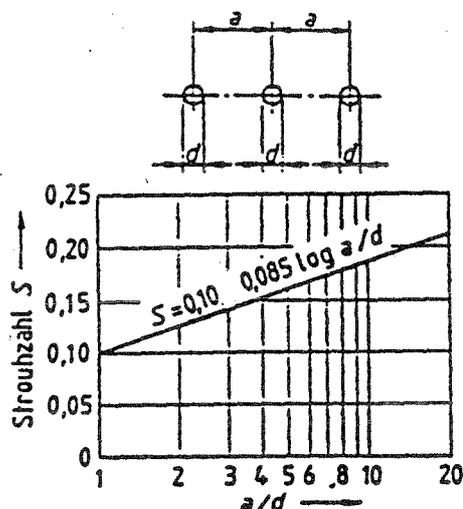


Bild A.6 Strouhalzahl S bei in Reihe stehenden Kreiszyllindern

4.7 Actions du vent sur les Constructions Effets Dynamiques du vent sur les Constructions flexibles

NBN B 03-002-2; 2edèd; decembre 1988 Institut

Belge Normalisation 29, Av de la Brabanconne -1010 Bruxelles

(Windlasten an Bauwerken; Dynamische Windlasten an flexiblen Bauwerken)

10.3.1 Oscillations transversales des constructions verticales
 d) Dans le cas de plusieurs constructions ou éléments verticaux identiques disposés en file, l'effet des tourbillons de von

Karman peut être amplifié par l'action des tourbillions provenant des constructions ou éléments précédents de la file lorsque le vent souffle parallèlement à celle-ci. Cette amplification peut être évaluée en fonction de la distance entre axes d_f des constructions ou éléments de la file de la façon suivante:

- si $d_f \leq 10b$: multiplier a_y par 2
- si $d_f \geq 20b$: pas d'amplification
- si $10b < d_f < 20b$: multiplier a_y par $2 \left[\frac{d_f}{10b} - 1 \right]$

(Druckfehler, wahrscheinlich $2 - \left[\frac{d_f}{10b} - 1 \right]$)

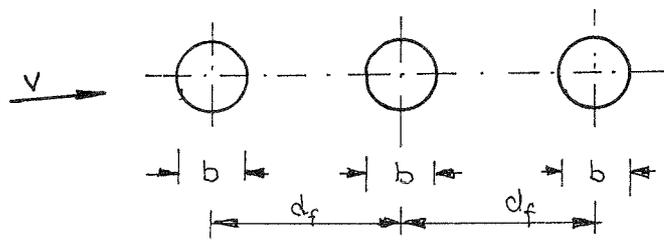
Sind vertikale, gleichartige Elemente in einer Reihe angeordnet, kann die Wirkung der Karman-Wirbel (Beanspruchungen aus Querschwingungen) erhöht werden. Die Erhöhungen können in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis d_f/b angesetzt werden:

- $d_f \leq 10 \cdot b$ Multiplikation von a_y mit 2
- $d_f \geq 20 \cdot b$ keine Erhöhung
- $10 \cdot b < d_f < 20 \cdot b$ Multiplikation von a_y mit $2 - \left[\frac{d_f}{10b} - 1 \right]$

Dabei bedeuten: a_y = Querschwingungsamplitude an der Spitze des Bauwerkes

b = Bauwerksdurchmesser

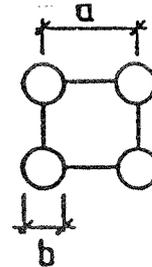
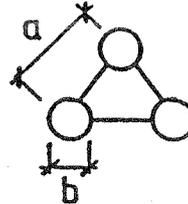
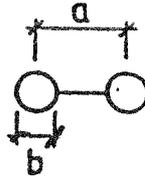
d_f = Achsabstand



4.8 Eurocode 1; Basis of design and Actions on Structures; volumes 1; Actions on structures; part 2.7 Wind loads; Static and dynamics actions
Draft of project Team P5, February 1992 Annex C

- C 5 Interferenzwirkungen bei Querschwingungsverhalten.
Unterschieden wird bei schlanken kreiszylindrischen Bau-

werken in Reihen- oder Gruppenanordnungen zwischen gekoppelten und ungekoppelten Systemen.



In Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis können folgende Erregerwerte erzeugt werden:

- Wirbelresonanzerrregung
- Interferenzgalloping
- Klassisches Galloping

- C 5.2 Wirbelresonanzerrregung für freistehende, ungekoppelte Kreiszyylinder in Reihenordnung

$$C_{lat} = 1,5 * C_{lat}(single)$$

$$S_r = 0,1 + 0,085 * \log(a/b) \quad \text{für } 1 \leq a/b \leq 15$$

$$S_r = 0,2 \quad \text{für } a/b > 15$$

- C 5.3 Interferenzgalloping sollte behandelt werden, bei ungekoppelten Zylindern in Reihenordnung mit Abstandsverhältnissen $a/d < 3$

5. Zusammenstellung von Ergebnissen der Literaturlauswertung

Im vorliegenden Abschnitt sind Ergebnisse der Literaturlauswertung Teil 1 (November 1991) und Ergänzung zum Teil 1 (März 1992) zusammengestellt, die bei der Aufstellung von Lastannahmen für winderregte Querschwingungsbeanspruchungen von Stahlbetonschornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung von Bedeutung sind. Auf die Literaturstelle wird mit Teil 1 bzw. Ergänzung/Seitenzahl des Berichtes hingewiesen.

Die Literaturangaben beziehen sich weitgehend auf Windkanaluntersuchungen, die mit Modellen durchgeführt wurden, deren Massendämpfungsparameter Stahlkonstruktionen angepaßt wurden. In Ergänzung/121-125 sind Ergebnisse von experimentellen Untersu-

chungen enthalten, die mit Modellen erzielt wurden, deren Mas- sendämpfungsparameter zwischen Stahl- und Stahlbetonbauwerken liegen. Da es sich hier um aufschlußreiches Material handelt, wurden Vergleiche mit Angaben der DIN 4133 und den Empfehlungen im Abschnitt 7 des Berichtes durchgeführt.

- Teil 1/11:

Wenn einmal Schwingungen mit einer Amplitude $> 0,02 d$ ausgelöst wurden, tendiert die Wirbelfrequenz dazu, sich an die Eigenfrequenz des Zylinders auch dann anzuschließen, wenn die Strömungsgeschwindigkeit um $\pm 20\%$ schwankt.

- Teil 1/15:

Der Rauchaustritt an Schornsteingruppen erhöht das Seitenverhältnis eine Gruppe. Modellversuche ohne Berücksichtigung des Rauchaustrittes können die Wirbelerregung unterschätzen. Im allgemeinen ist die Wirbelerregung eines konischen Zylinders kleiner als die eines parallelen Zylinders. Bei einem Zylinder mit sich stufenweise änderndem Durchmesser zeigt die Wirbelerregung einen Gipfel bei der kritischen Geschwindigkeit für jeden Durchmesser.

- Teil 1/17:

Bei Zylindern, die der freien Strömung ausgesetzt sind, kann die Strouhalzahl um 50% höher sein als der in der unterkritischen Strömung gemessene Wert. Dies kann zu einer Überschätzung der kritischen Wirbelgeschwindigkeit führen.

- Teil 1/13:

Eine Zylindergruppe tendiert dazu, sich bei Abständen $\leq 1,25 d$ wie ein geschlossenes Objekt zu verhalten. Dann gibt es nur einen Nachlauf und eine Wirbelresonanzanordnung mit einer Strouhalzahl, die eher auf die Querströmung der Gruppe als auf den Durchmesser eines einzelnen Zylinders bezogen ist.

- Teil 1/21:

Die Daten für Zylinderpaare zeigen, daß das absolute Maximum der Wirbelresonanzregung beim nachgeordneten Zylinder bei Abständen $a/d = 3...6$ und Anström winkeln $\beta = 12...25$ liegt. Im Gegensatz zu den Daten für Zylinderpaare lassen die Daten für längere Reihen vermuten, daß der Gipfel der Beanspruchung bei $\beta = 0^\circ$ liegt.

- Teil 1/26:

Bei gleichmäßiger Luftströmung liegt der unterkritische Reynoldszahlbereich bei $300 < Re < 2 \cdot 10^5$ und der transkritische Reynoldszahlbereich bei $Re > 3,5 \cdot 10^6$.

- Teil 1/27:

Die Wirbel werden in Höhenbereichen (Zellen) erzeugt, die mit Korrelationslänge bezeichnet werden. Die Korrelationslänge hängt ab von der Reynoldszahl, der Turbulenz, dem Längen-Durchmesser-Verhältnis, der Oberflächenrauigkeit und der Auslenkung. Bei Amplituden über dem 0,5-fachen Durchmesser tritt eine Senkung des Querkraftbeiwertes ein, die bei Amplituden von 1,5 bis 2*Durchmesser den Wert Null erreicht.

- Teil 1/28:

Der transkritische Reynoldszahlbereich ist in Modellversuchen nur in geringem Umfang untersucht worden. Sehr gute experimentelle Untersuchungen wurden von Schewe durchgeführt. Im Teil 1/29-30 sind die Ergebnisse dargestellt.

- Teil 1/31:

Bei der Doppelanordnung hängen die Strouhalzahlen und die Querkraftbeiwerte im unterkritischen Bereich von der Reynoldszahl, der Zylinderanordnung und den upstream Strömungsverhältnissen ab. Im Allgemeinen sind die Wirbelfrequenzen hinter beiden Zylindern unterschiedlich.

- Teil 1/33:

Die Erregermechanismen können klassifiziert werden als Wirbelablösung, Buffeting und strömungselastische Instabilitäten. Auf Fig. 9.12 und 9.17 sind Abhängigkeiten der Strouhalzahl und des Erregerkraftbeiwertes von der Reynoldszahl aufgezeichnet.

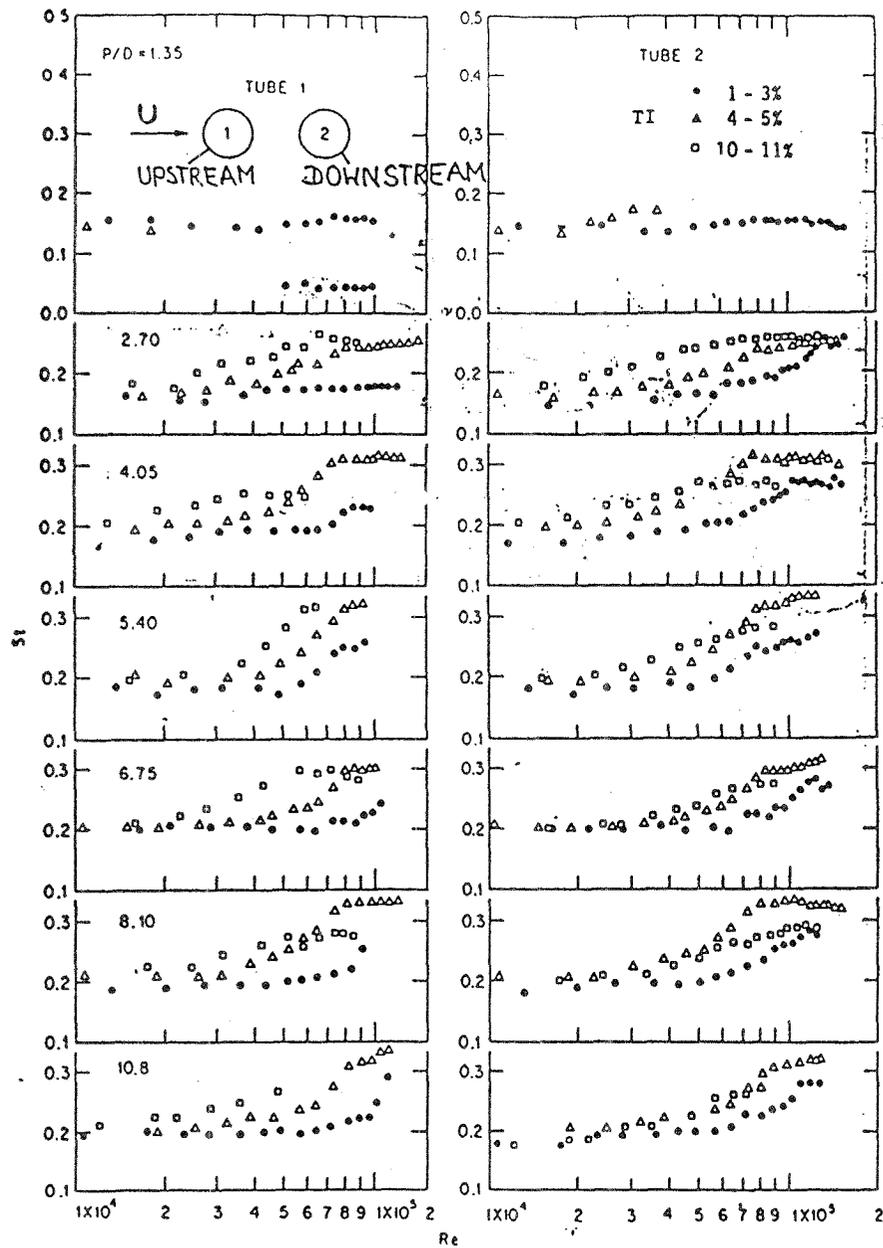


FIGURE 9.12. Strouhal number for two cylinders in tandem (Jendrzejczyk and Chen 1986). Einzelzylinder $St \sim 0.2$

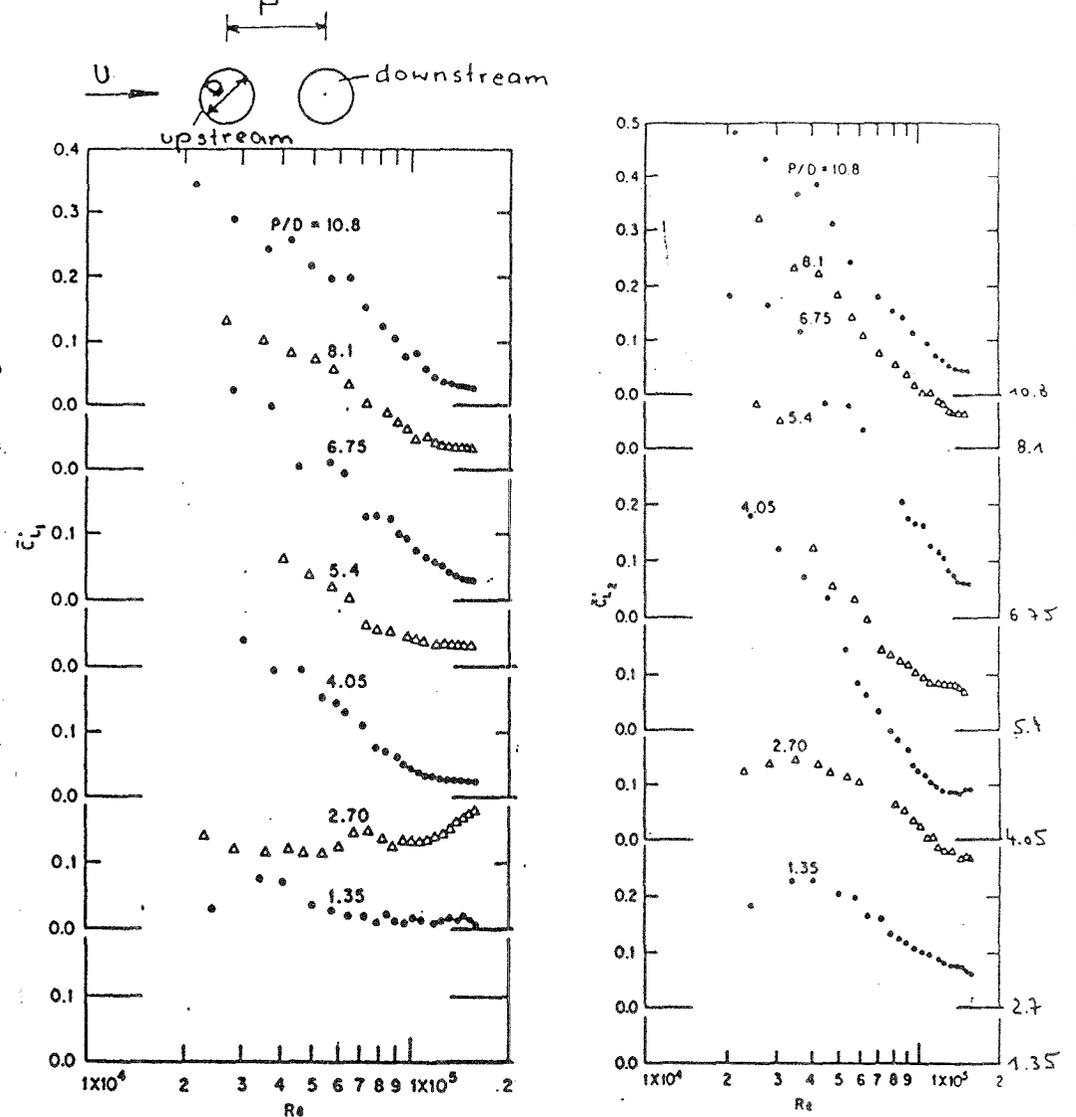


FIGURE 9.17. Fluctuating lift coefficient for two cylinders in tandem downstream tube with $TI = 1 \sim 3\%$ (Jendrzejczyk and Chen 1986)

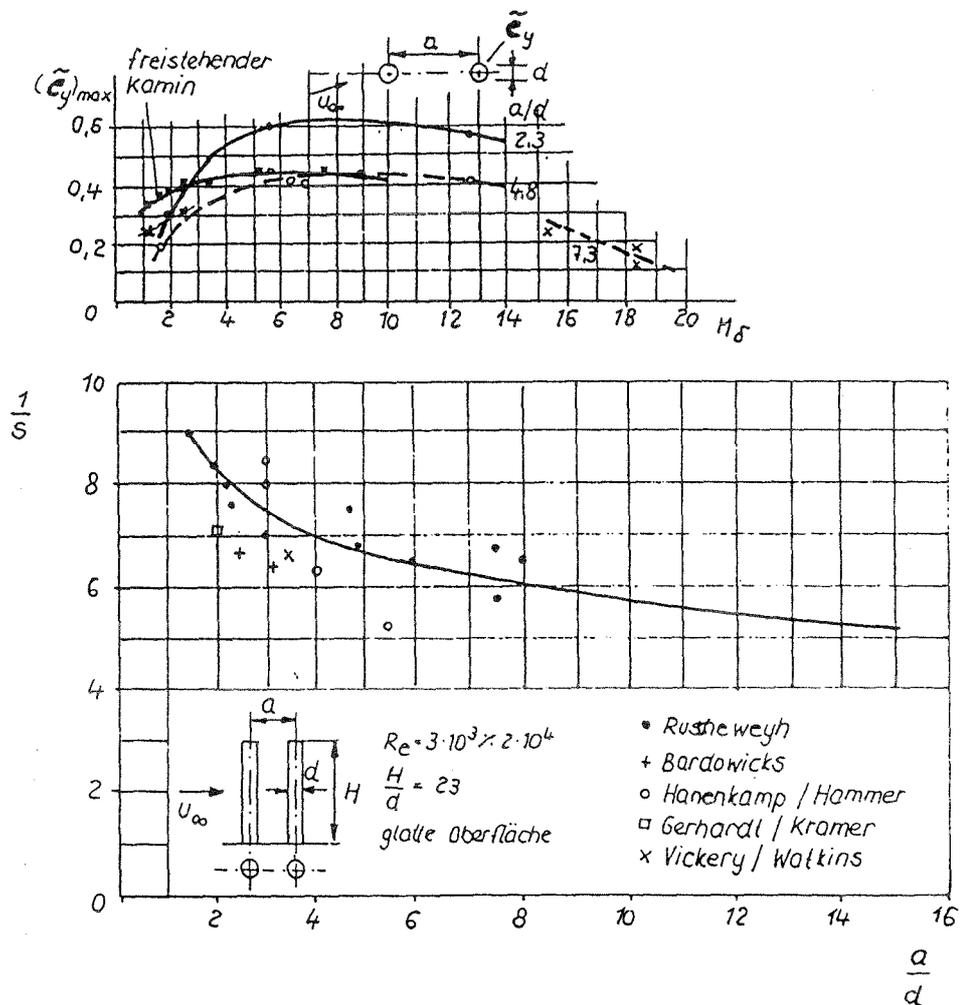
FIGURE 9.16. Fluctuating lift coefficient for two cylinders in tandem, upstream tube with $TI = 1 \sim 3\%$ (Jendrzejczyk and Chen 1986)

- Teil 1/34:

Die Vorausberechnung der dynamischen Antwort von Schornsteinen in Reihen- und Gruppenanordnung ist ohne Kenntnis aerodynamischer Daten nicht möglich. Diese Daten können nur aus Experimenten gewonnen werden. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen im Windkanal an Modellen mit kleiner Reynoldszahl auf Originalschornsteine ist nicht unproblematisch.

- Teil 1/38:

Meßwerte von Erregerkraftbeiwerten und vom Kehrwert der Strouhalzahl bei Doppelanordnung.



- Teil 1/43:

Es gibt zwei Windrichtungen, bei denen der vordere Kamin stärker schwingt als die hintere, aber bei den ungünstigsten Anströmrichtungen ist die Schwingung des hinteren Kamins stets größer als die größte Schwingung des vorderen Kamins. Mit größer werdendem Massendämpfungsparameter trennt sich der Interferenzgallopingbereich vom Wirbelresonanzbereich. Wird der kritische Anströmwinkel von $\beta=10^\circ$ fühlbar überschritten, tritt scheinbar kein Interferenzgalloping, sondern nur noch wirbelinduzierte Schwingungen auf. Ist das Abstandsverhältnis $a/d \geq 3,5$, wird das Interferenzgalloping-Phänomen im Versuch nicht mehr beobachtet.

- Teil 1/44:

Ermittelte Erregerkraftbeiwerte bei unterschiedlichen Massendämpfungsparametern:

	Massendämpfungsparameter	max. \tilde{C}_q	
Einzelzylinder	1,42	0,355	
	1,75	0,38	
	4,53	0,4	
	20,6	0,1	
Doppelanordnung Abstandsverhältnis $a/d = 4,8$ $a/d = 7,3$	1,6	0,33	bei $\beta=10^\circ$
	6,9	0,36	20°
	12,9	0,42	20°
	1,5	0,24	10°
	15,3	0,29	0°

- Teil 1/50:

Messungen in glatter Windkanalströmung sind ausreichend, um das Schwingungsverhalten von Kaminen, die in nur wenig bebautem offenen Gelände errichtet werden sollen, vorherzusagen. Bei vier hintereinander stehenden Kaminen, die nicht miteinander gekoppelt sind, treten die größten Schwingungsamplituden für die zwei leeseitigen Kamine auf.

- Teil 1/51-57:

Zur Klärung der gegenseitigen Beeinflussung von Stahlkaminen in Reihe wurden Windkanalversuche mit aeroelastischen zylindrischen Modellen in turbulenter Anströmung durchgeführt.

Massendämpfungsparameter = 8,5 für Querschwingungsamplitudenmessungen

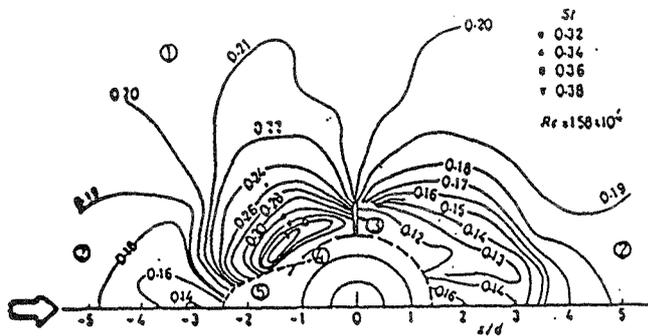
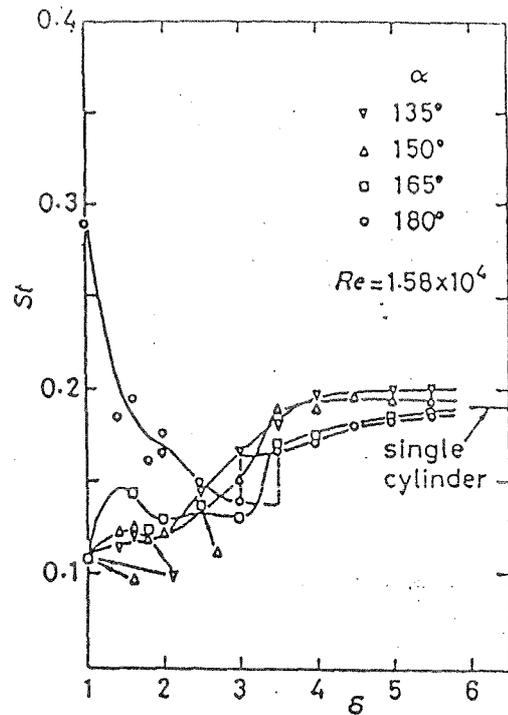
= 19,1 für Messungen der Querdrücke

In der Tabelle sind die Vergrößerungsfaktoren der Querschwingungsamplituden der Reihenanzahl zum Einzelzylinder aufgeführt.

Tabelle 5.1

Anordnung	Abstand	Anströmwinkel $\beta = 0^\circ$			
		Zylinder Nr.			
		1	2	3	4
2 Zylinder	a = 2d	1,16	2,23		
	a = 3d	1,15	1,90		
	a = 4d	0,96	0,90		
3 Zylinder	a = 2d	1,83	1,76	0,67	
	a = 3d	1,25	2,00	1,16	
	a = 4d	1,16	0,93	1,06	
4 Zylinder	a = 2d	1,90	2,26	0,56	0,56
	a = 3d	1,33	1,86	0,56	0,40
	a = 4d	1,26	0,96	1,20	0,45
		Anströmwinkel $\beta = 0-10^\circ$			
2 Zylinder	a = 2d	1,16	2,23		
	a = 3d	1,15	1,90		
	a = 4d	0,96	0,90		
3 Zylinder	a = 2d	1,83	1,83	2,33	
	a = 3d	1,25	2,00	1,62	
	a = 4d	1,16	0,93	1,06	
4 Zylinder	a = 2d	1,90	2,26	2,62	0,90
	a = 3d	1,33	1,98	1,42	0,80
	a = 4d	1,26	0,96	1,20	0,56

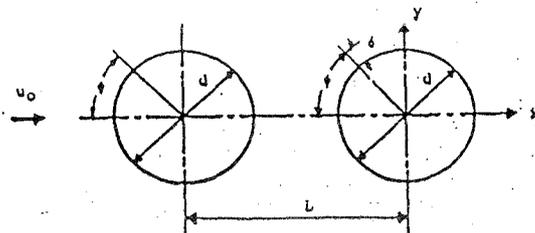
Strouhalzahlen vom
Zylinder A für $\alpha = 135^\circ$,
150, 165 und 180°



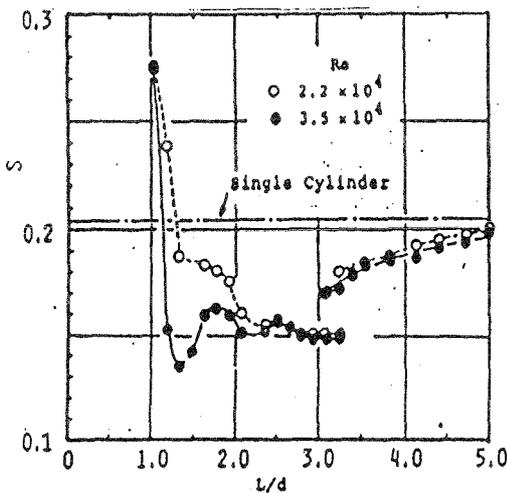
Strouhalzahlen für alle Anordnungen

Ergänzung/108:

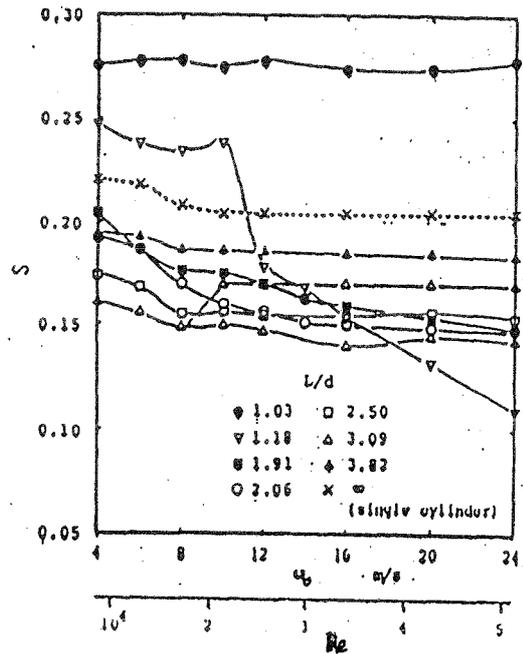
Die experimentellen Untersuchungen hatten das Ziel, die Strömungsverhältnisse von zwei Zylindern in Tandemanordnung bei unterschiedlichen Reynoldszahlen und Abstandsverhältnissen zu untersuchen.



Strouhalzahl
hinter dem downstream
Zylinder



Strouhalzahl
in Abhängigkeit von
der Reynoldszahl



- Ergänzung/109:

Die Strömungserscheinungen von zwei Zylindern in Tandemanordnung können in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis und der Reynoldszahl dargestellt werden.

- Ergänzung/111:

Diskontinuierliche Strömungserscheinungen wurden bei Abstandsverhältnissen $a/d = 3,5$ bis $3,8$ erzeugt. Dieser Bereich wird als kritischer Abstand bezeichnet. Diskontinuierliche Veränderungen des Strömungsbildes können große Amplituden bei bestimmten hohen Windgeschwindigkeiten erzeugen.

- Ergänzung/120:

Bei der Tandemanordnung wurde der diskontinuierliche Bereich bei Abstandsverhältnissen $a/d \approx 3,5$ gefunden. Bei der side by side Anordnung trat dieser Effekt bei $T/dD \approx 2$ auf. Der dritte diskontinuierliche Bereich wurde bei staggered Anordnung bei $a/d = 3$ und $T/d = 1/4$ gefunden. Die Existenz dieser diskontinuierlichen Bereiche kann strömungsinduzierte Schwingungen mit großen Amplituden erzeugen.

- Ergänzung/121-125:

Interferenzerscheinungen von zwei Zylindern in verschiedenen Anordnungen führen zu kontinuierlichen und diskontinuierlichen Veränderungen in der Wirbelablösung. Die resultierenden Schwingungserscheinungen der Zylinder hängen von der Anordnung der beiden Zylinder ab. Im folgenden Bild ist eine Klassifizierung der Strömungszustände der beobachteten Zylinderanordnungen enthalten.

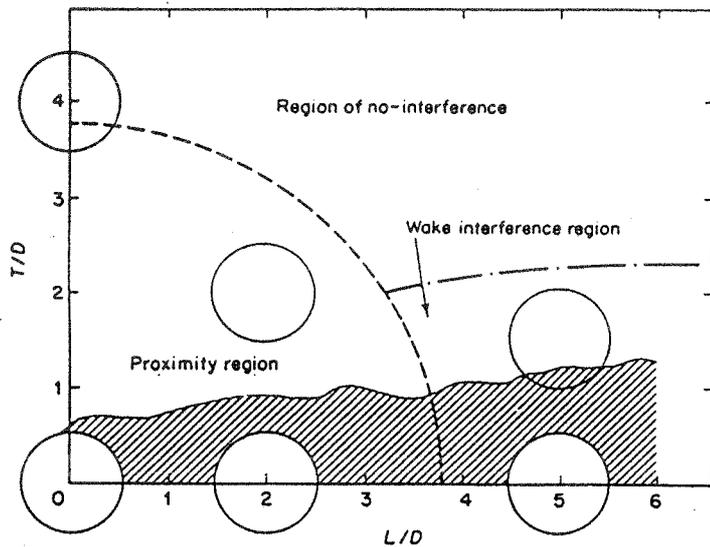


Figure 1. Classification of interference regions.

Figure 1 zeigt schematisch die Bereiche no-interference (keine Interferenz), proximity- und wake-interference (engstehender- und Nachlaufbereich).

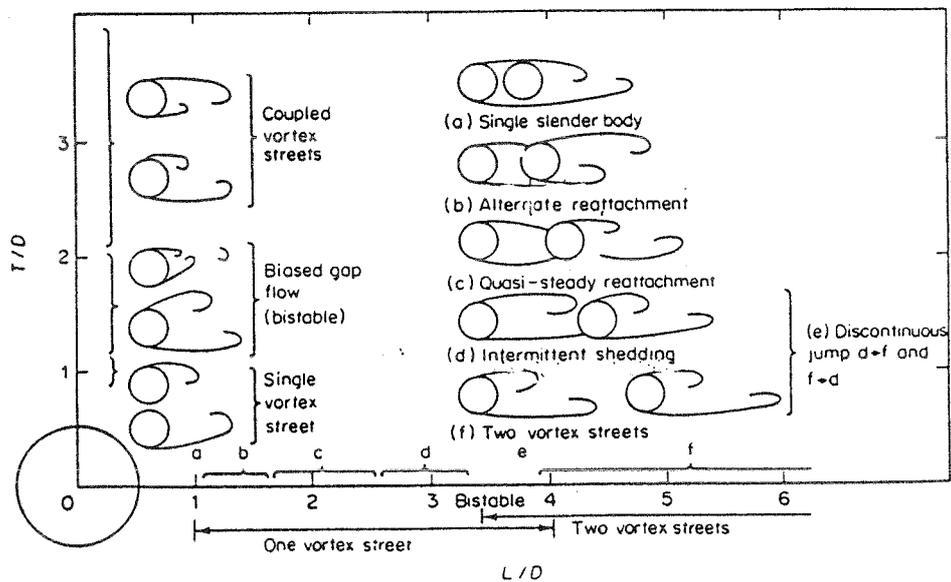


Figure 2. Classification of flow regimes in side-by-side and tandem arrangements for stationary cylinders.

In Figure 2 sind die Strömungsbilder für side-by-side- und Tandemanordnung dargestellt.

Die wirbelerregten Schwingungen wurden in einem $0,3 \times 0,6 \text{ m}^2$ Windkanal bei Strömungsgeschwindigkeiten von $6 - 36 \text{ m/s}$ untersucht. Die Turbulenzintensität betrug ca. 2% . Beide Zylinder wurden aus Aluminium hergestellt. Durchmesser und Höhe der Zylinder betragen $25,3$ bzw. 296 mm . Die Frequenz betrug 71 Hz , das logarithmische Dämpfungsdekrement $0,013$, der Massendämpfungsparameter 23 und der Reynoldszahlbereich 1×10^4 bis 8×10^4 .

In Figure 3 sind Untersuchungsergebnisse im proximity-interference, wake-interference und no-interference Bereich dargestellt.

Im Kreis ist die Standortnummer des downstream Zylinders, die reduzierten Geschwindigkeiten $W = v/(n_c \cdot D)$ ($v =$ frei Strömungsgeschwindigkeit, $n_c =$ Eigenfrequenz des Zylinders, $D =$ Zylinderdurchmesser), die Anfangs- und Endgeschwindigkeit im Synchronisationsbereich und die kritische Windgeschwindigkeit (Kehrwert der Resonanzstrouhalzahl), bei der die maximale Amplitude auftrat (Klammerwert), dargestellt.

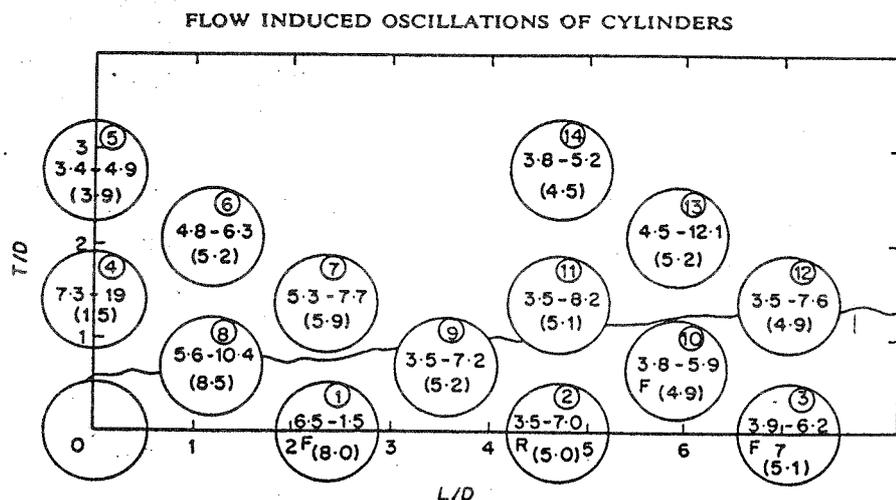


Figure 3. Arrangements tested for the vortex shedding excited oscillation.

In Figure 4 sind die erhaltenen Schwingungsbilder des Frontzylinders F (upstream) und des hinteren (rear) Zylinders R (downstream) für die maximale Amplitude bei Wirbelerregung angegeben. Keine Interferenzwirkungen treten bei Anordnung 14 auf. Die maximale Antwort wurde bei der Anordnung 10 gefunden, wo der Zylinder vollständig im Nachlaufbereich stand. Die Amplitudenwerte der Zylinder sind im Bild auf das 10-fache vergrößert dargestellt.

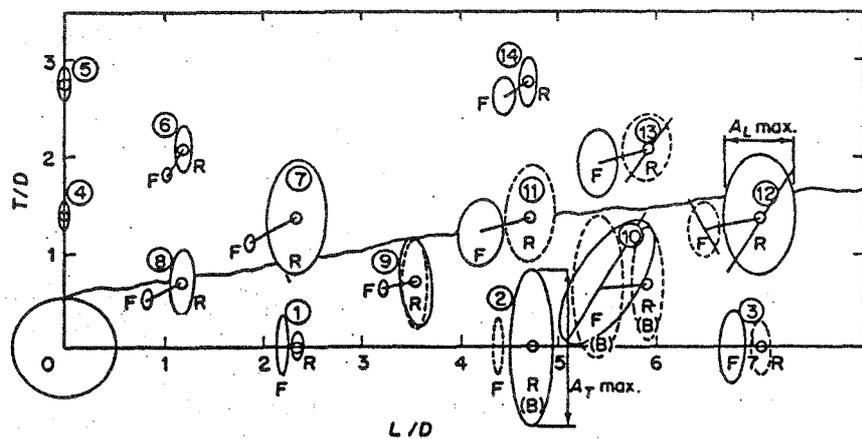


Figure 4. Typical oscillation loops at maximum amplitude for vortex-shedding excitation. The responses of all front cylinders, F, are shown next to those of rear ones, R. The amplitudes of cylinder tips are magnified 10 times.

Aus den veröffentlichten Untersuchungsergebnissen wurde der Nachlaufbereich der proximity und wake interference Region in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis a/d (L/D) und vom Winkelmaß β ermittelt.

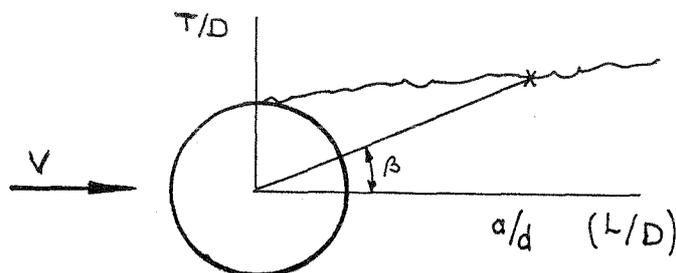


Tabelle 5.3

a/d (L/D)	Nachlauf β	Proximity region	Wakeinterference region
1	< 34...35°	0°	
2	< 22...24°	< 37°	
3	< 17...18°	< 58°	< 31°
4	< 14...15°	< 75°	< 27°
5	< 13...14°		< 24°
6	< 12...13°		< 21°
7	< 10...11°		
8	< 9...10°		

Die maximalen Vergrößerungsfaktoren Doppelanordnung/Einzelzylinder für den Kehrwert der Strouhalzahl und den maximalen Amplituden in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis wurden aus Figure 4 entnommen und in Tabellen- bzw. in Diagrammform (Seite 58) dargestellt. Als Vergleichswerte wurden die Angaben der DIN 4133 und die Empfehlungen im Abschnitt 6 dieses Berichtes gegenübergestellt (Tabelle 5.4)

Tabelle 5.4

Vergleich der Verhältnisswerte Doppelanordnung/Einzelzylinder von Literaturangaben (Zdravkovich) mit Vorschriftenfestlegungen DIN 4133; Empfehlungen im Abschnitt 6 dieses Berichtes

Anordnungs Nr. n. Fig. 3	a/d	V _{r max}	max. Amplitude (Meßwert)	Zdravkovich Doppel-/Einzelzylinder Bezugswert Anordnung 14	
				Strouhal- zahl	Amplitude
4,5	0	3,9	0,45	0,87	0,69
6,8	1,14	8,5	0,88	1,89	1,35
7,1	2,59	8,0	1,50	1,78	2,31
9	3,52	5,2	1,20	1,16	1,85
14,11,2	4,68	5,1	2,10	1,13	3,23
13, 10	5,88	5,2	1,90	1,16	2,92
12,3	7,05	5,1	1,60	1,13	2,46
Bezugsw. 14(Einzel- zylinder)		4,5	0,65		

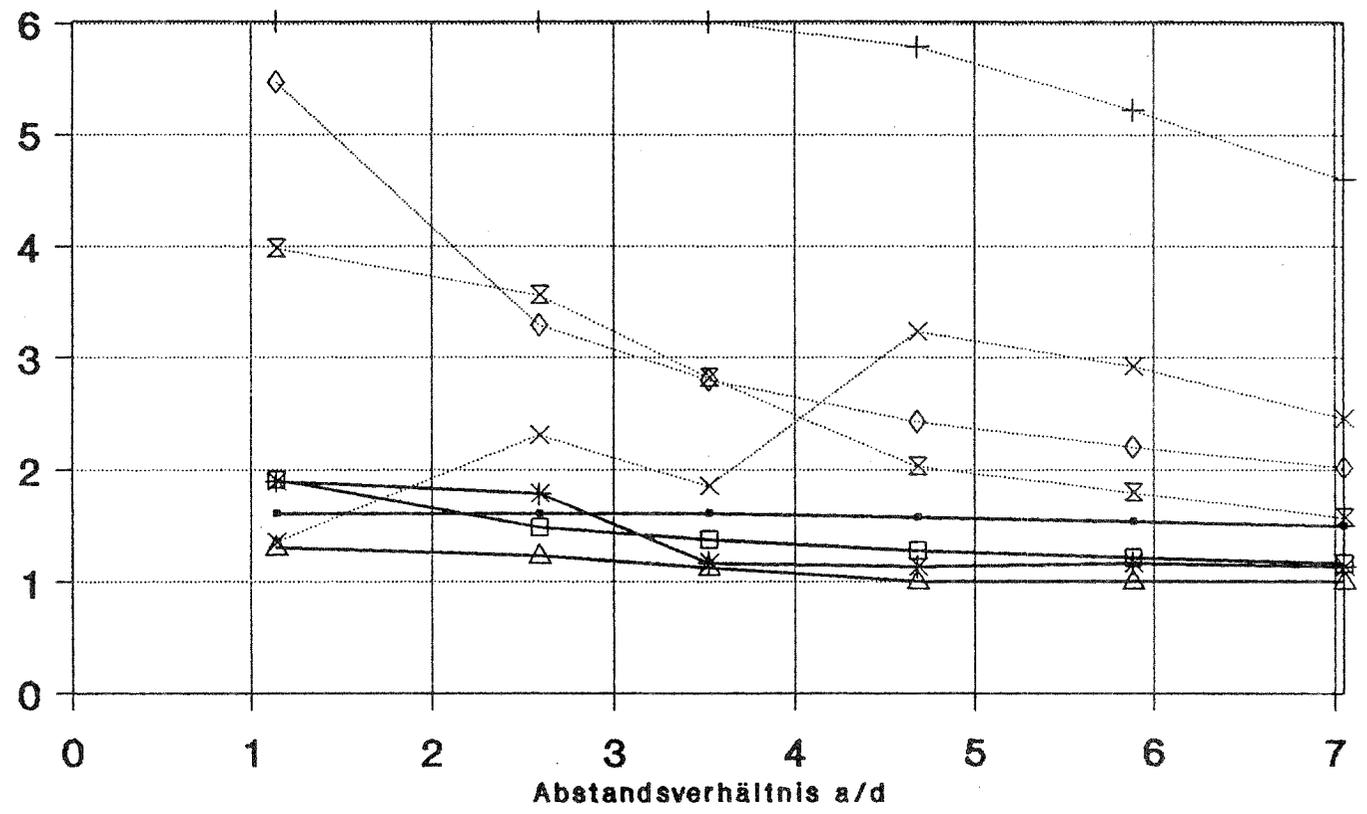
Anordnungs Nr. n. Fig. 3	DIN 4133 Doppel-/Einzelzyl.		Empf. Abschn. 6 Doppel-/ Einzelzyl.			
	Strouhalz.	Amplitude	d ₂ /d ₁ = 1		d ₂ /d ₁ = 1,5	
			Strouhalz.	Amplitude *)	Strouhalz.	Amplitude *)
6,8	1,91	5,47	1,30	3,98	1,6	6,02
7,1	1,48	3,29	1,23	3,56	1,6	6,02
9	1,37	2,80	1,12	2,82	1,6	6,02
14,11,2	1,27	2,43	1,00	2,03	1,57	5,79
13,10	1,21	2,20	1,00	1,79	1,53	5,22
12,3	1,16	2,02	1,00	1,57	1,49	4,60

$$*) \eta_d / \eta_e = (\tilde{C}_{Q, d} / \tilde{C}_{Q, e}) * (S_{r, e} / S_{r, d})^2$$

(Bedeutung der Bezeichnung siehe Seite 64)

Literaturvergleich; Doppel-/Einzelanordn.
 ZDRAVKOVICH-DIN4133-Empfehlung 7. Abschn.

Strouhalzahl - Amplitudenverhältniswert



- * Str./ZDRAV. □ Str./DIN4133 x Am./ZDRA. ◇ Am./DIN4133
- △ St/Em.d2/d1=1 ⊗ Am/Em.d2/d1=1 † S/E.d2/d1=1,5 + A/E.d2/d1=1,5

STROUHALZAHL, AMPLITUDE

6. Empfehlungen für die praktische Anwendung

Auf Grund der Meßergebnisse der durchgeführten Windkanaluntersuchungen und unter Berücksichtigung der Angaben aus Literaturveröffentlichungen werden Lastannahmen für winderregte Querschwingungsbeanspruchungen von Stahlbetonschornsteinen in Gruppen- und Reihenanordnungen vorgeschlagen. In Anlehnung an vorhandene Vorschriften und Empfehlungen werden Abminderungs- und Erhöhungsfaktoren der Strouhalzahl und des Erregerkraftbeiwertes im Vergleich zum einzelnen Stahlbetonschornstein, der keinen Interferenzeinflüssen ausgesetzt ist, angegeben.

Die Strouhalzahlen streuen wenig, so daß aus den vorliegenden Meßwerten und den Verhältniszahlen des Einzelschornsteines zur Reihen- oder Gruppenanordnung Beziehungen in Abhängigkeit vom Abstandsverhältnis ermittelt werden konnten. Bei den Meßwerten dienen die Ergebnisse des transkritisch modellierten Reynoldszahlbereiches als Grundlage.

Aus den Diagrammen Seite 22 bis 34 ist ersichtlich, daß die vorgeschlagenen Annahmen für die Strouhalzahlen auch den unterkritischen Reynoldszahlbereich weitgehend mit abdecken.

Die Meßwerte für den Querkraftbeiwert sind für praktische Lastannahmen über den Verhältniswert aus Reihen- oder Gruppenanordnung zum Einzelschornstein nur mit großen Schwierigkeiten aufzubereiten. Wie im Abschnitt 1 näher erläutert, werden deshalb für den Einzelzylinder feste, nicht streuende Vorschriftenwerte angesetzt.

In den vorhandenen Vorschriften wird für den Einzelzylinder im transkritischen Reynoldszahlbereich ($Re < 10^7$) die Strouhalzahl $St = 0,2$ und der Erregerkraftbeiwert $c_{1at} = 0,3$ angegeben. Der Effektivwert des Erregerkraftbeiwertes folgt aus $\tilde{c}_q = 0,3/\sqrt{2} = 0,21$, da harmonischer Kraftverlauf auftritt. Der Korrelationslängenfaktor ist bei Stahlbetonschornsteinen hoch und kann mit $K_w \approx 0,80$ angenommen werden (300m Stahlbetonschornstein Boxberg $K_w = 0,78$, 150m Stahlbetonschornstein Boxberg $K_w = 0,80$, Modell $K_w = 0,84$). Bei den Windkanalversuchen wurden Querkraftbeiwerte c_q ermittelt, die aus Kraftmessungen bei Ansatz eines Korrelationslängenfaktors $K_w = 1,0$ berechnet werden. Aus diesen Annahmen kann für den Vorschriftenwert des Einzelzylinders mit c_{1at}

= 0,3 ein Bezugswert für den Einzelzylinder der Windkanalmeßwerte $\tilde{c}_q = (0,3/\sqrt{2}) * 0,8 = 0,17$ bestimmt werden. Dieser Wert wird für die Reihen- oder Gruppenanordnung bei den Abstandsverhältnissen angesetzt, bei denen Erhöhungen aus den Interferenzeinflüssen nicht mehr auftreten. Als Maximalwert, der in Lastannahmenempfehlungen einfließen sollte, wird $\tilde{c}_q = 0,40$ ($\hat{=} c_{lat} = 0,40 * \sqrt{2} * (1/0,8) = 0,71$) betrachtet. Die Meßergebnisse der Windkanaluntersuchungen zeigen, daß dieser Wert nur in wenigen Fällen überschritten wurde. Auch die Vorschriftenwerte für Stahlbetonschornsteine und die Literaturangaben wurden bei der Festlegung dieses Wertes berücksichtigt. Aus diesen Extremwerten wurden, unter Einbeziehung der vorliegenden Meßwerte, Angaben für den Erregerkraftbeiwert bei Reihen- oder Gruppenanordnung in Abhängigkeit vom Durchmesser- und Abstandsverhältnis ausgearbeitet.

Die Auswertung der Messungen zeigt, daß ein Längeneinfluß der Zylinder sowohl bei gleichen als auch bei ungleichen Durchmessern für die Strouhalzahl nicht nachweisbar ist. Beim Querkraftbeiwert sind Vergrößerungen erkennbar. Eine explizite Berücksichtigung an der Empfehlung für die Anwendung ist jedoch nicht erforderlich, da Durchmesser- und Längenverhältnis stark positiv korreliert sind. Höhere Schornsteine haben größere Durchmesser und kleinere Schornsteine haben geringere Durchmesser. So wird indirekt die Schornsteinhöhe annähernd über das Durchmesser- und Längenverhältnis mit erfaßt. Liegen in Ausnahmefällen umgekehrte Längenverhältnisse vor, so liegen die Lastannahmen auf der sicheren Seite.

6.1 Empfehlungen für die praktische Anwendung

Bei kreiszylindrischen Schornsteinen in Massivbauart in Gruppen- oder Reihenanordnung können bei bestimmten Anströmwinkeln erhöhte Beanspruchungen aus winderregten Querschwingungen auftreten. Sofern kein genauer Nachweis geführt wird, sind für den einzel stehenden Schornstein in Massivbauart angegebene Erregerkraftbeiwerte c_{lat} und Strouhalzahlen S_r wie folgt im Abhängigkeit von Durchmesser- und Abstandsverhältnis zu verändern.

Verhältniswerte der Strouhalzahl:

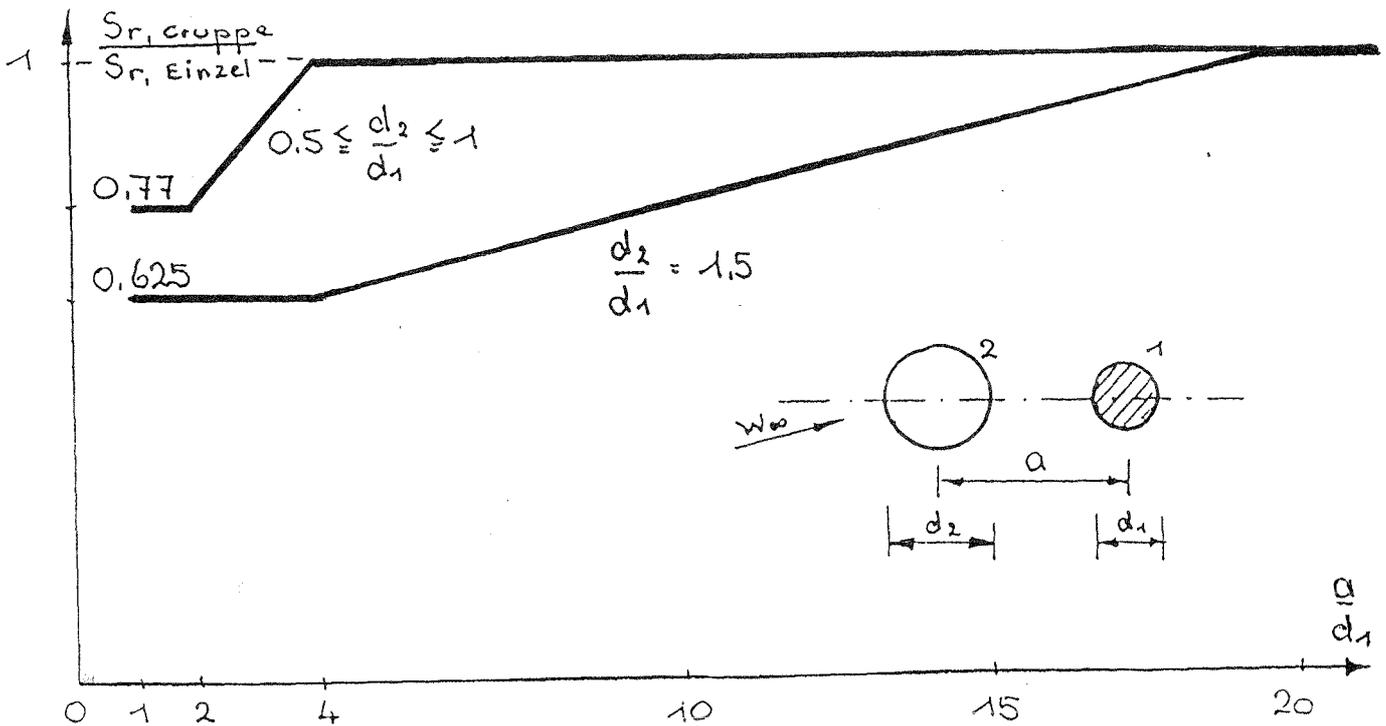
Für $0,5 \leq d_2/d_1 \leq 1$:

$$\frac{Sr_{Gruppe}}{Sr_{Einzel}} = \begin{cases} 0,770 & \text{für } a/d_1 \leq 2 \\ 0,115 \cdot a/d_1 + 0,540 & \text{für } 2 < a/d_1 \leq 4 \\ 1 & \text{für } 4 < a/d_1 \end{cases}$$

Für $d_2/d_1 \geq 1,5$:

$$\frac{Sr_{Gruppe}}{Sr_{Einzel}} = \begin{cases} 0,625 & \text{für } a/d_1 \leq 4 \\ 0,0234 \cdot a/d_1 + 0,531 & \text{für } 4 < a/d_1 \leq 20 \\ 1 & \text{für } 20 < a/d_1 \end{cases}$$

Für $1 < d_2/d_1 < 1,5$: Lineare Interpolation.



Verhältniswert des Erregerkraftbeiwertes C_{lat} :

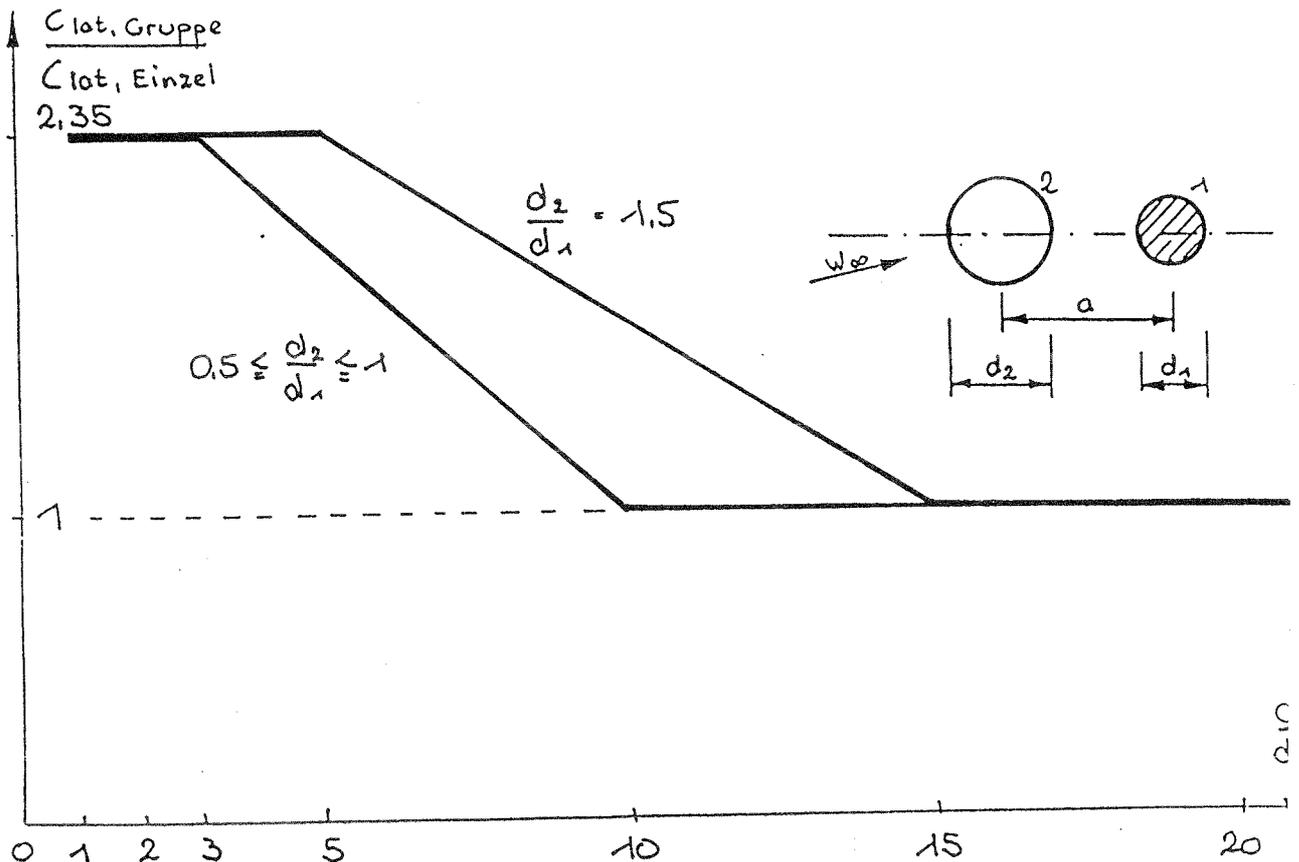
Für $0,5 \leq d_2/d_1 \leq 1,0$:

$$\frac{C_{lat, Gruppe}}{C_{lat, Einzel}} = \begin{cases} 2,35 & \text{für } a/d_1 \leq 3 \\ 2,929 - 0,193 \cdot a/d_1 & \text{für } 3 < a/d_1 \leq 10 \\ 1,0 & \text{für } 10 \leq a/d_1 \end{cases}$$

Für $d_2/d_1 \geq 1,5$:

$$\frac{C_{lat, Gruppe}}{C_{lat, Einzel}} = \begin{cases} 2,35 & \text{für } a/d_1 \leq 5 \\ 3,025 - 0,135 \cdot a/d_1 & \text{für } 5 < a/d_1 \leq 15 \\ 1,0 & \text{für } 15 \leq a/d_1 \end{cases}$$

Für $1 < d_2/d_1 < 1,5$: Lineare Interpolation.



Ist die Schornsteinhöhe $h_2 < 0,5 \cdot h_1$ oder erfolgt eine Abminderung des Erregerkraftbeiwertes c_{1at} auf Grund zu hoher kritischer Windgeschwindigkeiten, so daß $(c_{1at}/Sr^2)_{\text{Einzel}} \geq (c_{1at}/Sr^2)_{\text{Gruppe}}$ wird, sind die Strouhalzahlen und Erregerkraftbeiwerte des Einzelschornsteins maßgebend.

Gruppen- und Reihenanordnungen aller Art können näherungsweise durch Zweieranordnungen ersetzt werden.

6.2 Vergleich der Empfehlungen mit den Meßergebnissen

In die Diagramme des Abschnittes 2.2, in denen die Verhältniswerte der Meßwerte für Einzelanordnung und Doppelanordnung dargestellt sind, ist auch die Empfehlung des Abschnittes 6.1 mit eingetragen. Dabei ist zu beachten, daß durch den Bezug der Empfehlungen auf den Vorschriftenwert des Einzelzylinders die Linien für Vorschriften modifiziert erscheinen. Man beachte auch, daß beim Strouhalzahlverhältnis die Verhältniswerte Einzelanordnung/Mehrfachanordnung eingetragen sind.

In Tabelle 5.4 und im Diagramm aus Seite 58 sind die Empfehlungen den Angaben von DIN 4133 und veröffentlichten Meßwerten von Zdravkovich bei gleichen Zylinderdurchmessern und -höhen gegenübergestellt.

Im folgenden werden die Amplitudenverhältnisse Mehrfachanordnung/Einzelanordnung verglichen. Die Amplitudenvergleiche haben insofern besondere Bedeutung, als sie der Beanspruchung proportional sind und in ihnen sowohl Querkraftbeiwert als auch Strouhalzahl eingehen.

Aus den Meßergebnissen der Windkanaluntersuchungen wurde der Maximalwert der Mehrfachanordnung η_a für jedes Abstandsverhältnis ausgewählt und dem Meßwert für den Einzelzylinder η_e gegenübergestellt.

Die Amplitudenverhältnisse der Empfehlungen wurden ermittelt aus der Beziehung $(\tilde{c}_{Q,a}/\tilde{c}_{Q,e}) \cdot (Sr_e/Sr_a)^2$. Diese Verhältniswerte wurden nur an den Unstetigkeitsstellen bestimmt.

($d_2/d_1 < 1$ bei $a/d_1 = 2;3;4;5,10$ und $d_2/d_1 > 1,5$ bei $a/d_1 = 4;5;15;20$). Zwischen diesen Werten erfolgt eine geradlinige Verbindung.

In Tabelle 6.1 und den Diagrammen Seite 74 bis 83 bedeuten:

- A. Nr. = Anordnungsnummer (t=transkr.model.Re-Bereich)
Windkanalmeßwert
- A. Nr. ...1 = Anordnungsnummer, berechnete Größen aus den Empfehlungen des Abschnittes 6.1
- e...d/e...e = Amplitudenverhältniswert der aus Windkanaluntersuchungen ermittelten Meßwerte von Mehrfachanordnungen/Einzelzylinder für Anordnungsnummern...
- $\tilde{C}_{Q,e}$ = Meßwert des Effektivwertes des Querkraftbeiwertes für den Einzelzylinder, ermittelt mit Windkanaluntersuchungen
- $\tilde{C}_{Q,d}$ = Effektivwert des max. Querkraftbeiwertes für Mehrfachanordnungen. Berechnet aus den Empfehlungen im Abschnitt 6.1. $\tilde{C}_{Q,d} = C_{1at,d} / C_{1at,e} * 0,17$
- $S_{r,e} / S_{r,d}$ = Verhältniswert der Strouhalzahlen Einzelzylinder/Mehrfachanordnung. Festlegungen in den Empfehlungen im Abschnitt 6.1

In den Diagrammen S.74 bis 83 ist $empf.cq = \tilde{C}_{Q,d} / \tilde{C}_{Q,e} * (S_{r,e} / S_{r,d})^2$

Durch den Bezug auf den Vorschriftenwert des Einzelschornsteines erscheinen, wie in der Einführung näher erläutert, die Empfehlungswerte des Abschnittes 6.1 modifiziert. Je nach Meßwert für den Einzelschornstein erhält man verschiedene Kurven für die Empfehlungen. Die Meßwertverhältnisse sind original.

In der Tabelle 6.2 und 6.3 und den Diagrammen auf den Seiten 86 bis 89 ist das Verhältnis

$$(\tilde{C}_{Q,d,Me\beta w.} / \tilde{C}_{Q,e,Empf.}) * (S_{r,e,Me\beta w.} / S_{r,d,Me\beta w.})^2$$

($C_{Q,e,Empf.} = 0,17$)

mit den Amplitudenverhältniswerten der Empfehlung des Abschnittes 6.1 verglichen. In dieser Darstellung erscheinen die Verhältniswerte der Empfehlungen original (es erscheint dadurch nur jeweils eine Kurve für die Empfehlungen im Diagramm für $d_2/d_1 \leq 1,0$ bzw. $d_2/d_1 \geq 1,5$) und die Verhältnisse der Meßwerte sind modifiziert.

Wie erwähnt, besteht zwischen beiden Darstellungsformen kein wesentlicher Unterschied. Zu vergleichende Kurven erscheinen nur in einem anderen Maßstab.

Tabelle 6.1

Vergleich der in Windkanalversuchen ermittelten Amplitudenverhältniswerte Mehrfachanordnung/Einzelzylinder mit den in Abschnitt 6.1 angegebenen Empfehlungen für die praktische Anwendung.

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 1 e_{01d} / e_{01e} $\tilde{C}_{Q,e} = 0,11$ $d_2/d = 1$	A. Nr. 1.1 $(\tilde{C}_{Q,d} / \tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S_{r,e}^2 / S_{r,d}^2)$	A. Nr. 2 e_{02d} / e_{02e} $\tilde{C}_{Q,e} = 0,15$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 21 $(\tilde{C}_{Q,d} / \tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S_{r,e}^2 / S_{r,d}^2)$
2		6,15		4,51
3	6,17	5,05		3,71
3,25			5,08	
4	1,55		1,67	
4,5		3,18		2,33
5	1,19			
5,05			1,63	
6,8			1,38	
7	1,17			
10	1,05	1,55	1,96	1,13

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 3 e_{03d}/e_{03e} $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 31 $(\tilde{C}_{Q,d} / \tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S_{r,e}^2 / S_{r,d}^2)$
2		7,51
3	7,11	6,18
4	3,27	
4,5		3,89
5	3,27	
10	2,50	1,89
12,5	1,35	
15	1,35	

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 4 e_{04d} / e_{04e} $\tilde{c}_{0r} = 0,11$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 41 $(\tilde{c}_{0,d} / \tilde{c}_{0,e}) *$ $(S^2_{r,e} / S^2_{r,d})$	A. Nr. 5 e_{05d} / e_{05e} $\tilde{c}_{0r} = 0,15$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 51 $(\tilde{c}_{0,d} / \tilde{c}_{0,e}) *$ $(S^2_{r,e} / S^2_{r,d})$
3	1,26			
3,25			4,33	
4	1,31	9,31	1,71	6,83
5	2,90	8,85		6,49
5,05			3,21	
6,8			1,79	
7	2,12			
10	1,86		1,46	
12	1,93			
15		2,19		1,60
20		1,85		1,13

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 6 e_{06d} / e_{06e} $\tilde{c}_{0r} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 61 $(\tilde{c}_{0,d} / \tilde{c}_{0,e}) *$ $(S^2_{r,e} / S^2_{r,d})$
3	10,0	
3,25		
4	9,23	11,38
5	7,12	10,82
10	7,50	
15		2,67
20		1,89

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 7 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,15$ $d_z/d_1 = 0,67$	A. Nr. 8 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,15$ $d_z/d_1 = 0,67$	A. Nr. 9 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,15$ $d_z/d_1 = 0,67$	A.Nr.7.1-9.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2				4,51
3				3,71
3,25	3,25	4,46	6,13	
4	1,38	2,13	1,46	
4,5				2,33
5,05	1,50	2,25	2,17	
6,8	1,42	2,00	1,54	
10	1,58	2,33	2,13	1,13

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 11 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_z/d_1 = 0,67$	A. Nr. 11.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2		7,51
3	3,85	6,18
4	6,35	
4,5		3,89
5,05	6,35	
10	5,96	1,89

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 10 $\tilde{c}_{Q,e}=0,09$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 10.1 $(\tilde{c}_{Q,d}/\tilde{c}_{Q,e}) *$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$	A. Nr. 10a+ $\tilde{c}_{Q,e}=0,135$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 10a.1 $(\tilde{c}_{Q,d}/\tilde{c}_{Q,e}) *$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2		7,51		5,01
2,55			0,73	
2,80			1,43	
3	8,46	6,18	1,91	4,12
3,2			1,87	
3,5			1,61	
4	5,96		1,18	
4,5		3,89		2,59
5	6,35		1,18	
7			1,18	
10	2,50	1,89	1,12	1,26
14			1,12	

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 12 $\tilde{c}_{Q,e}=0,15$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 14 $\tilde{c}_{Q,e}=0,15$ $d_2/d_1 = 1,5$	A.Nr.12.1+14.1 $(\tilde{c}_{Q,d}/\tilde{c}_{Q,e}) *$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3,25	15,58	15,04	
4	5,08	5,33	6,83
5			6,49
5,05	7,25	4,67	
6,8	3,79	3,29	
10	4,0	4,79	
15			1,60
20			1,13

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 13 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 15 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A.Nr.13.1+15.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e}) *$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	9,23	11,35	
4	10,38	12,11	11,38
5	10,96	11,73	10,82
10	10,38	11,35	
15			2,67
20			1,89

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 13a $\tilde{C}_{Q,e} = 0,135$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 13a.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e}) *$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	1,32	
4	1,47	7,59
5	1,76	7,21
5,5	1,91	
6	1,76	
7	1,61	
10	1,32	
15	1,23	1,78
20		1,26

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 16 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,11$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 16.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2		6,15
3	5,72	5,05
4	2,41	
4,5		3,18
5	1,31	
6,7	1,10	
10	2,21	1,55

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 17 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 18 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1$	A.Nr.17.1+18.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2			7,51
3	8,46	11,35	6,18
4	3,85	5,00	
4,5			3,89
5	5,00	2,50	
6,7		2,12	
10	2,88		1,89

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 19 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,17$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 20 $\tilde{C}_{Q,e} = 0,17$ $d_2/d_1 = 1,5$	A.Nr.19.1+20.1 $(\tilde{C}_{Q,d}/\tilde{C}_{Q,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	4,81		
4	5,18	6,00	6,02
5		2,07	5,73
6,7		1,96	
10		2,19	
15			1,42
20			1,00

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 21 $\tilde{c}_{0,e} = 0,9$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 23 $\tilde{c}_{0,e} = 0,9$ $d_2/d_1 = 1,5$	A.Nr.21.1+23.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	11,73	5,00	
4	12,50	6,35	11,38
5	11,73	4,62	10,82
6,7	10,38	5,96	
10	10,38		
15			2,67
20			1,89

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 22 $\tilde{c}_{0,e} = 0,20$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 22.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	4,31	
4	1,79	5,1
5	1,44	4,87
6,7	1,16	
15		1,20
20		0,85

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 24 $\tilde{c}_{0,e} = 0,11$ $d_2/d_1 = 0,67$	A. Nr. 24.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2		6,15
3	16,69	5,05
4	3,17	
4,5		3,18
10	2,62	1,55

Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 25 $\tilde{c}_{0,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 0,67$	A. Nr. 27 $\tilde{c}_{0,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1$	A.Nr.25.1+27.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2			7,51
3	2,88	3,85	6,18
4	2,11	7,12	
4,5			3,89
5	2,50	5,00	
10	0,96	2,50	1,89

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 26 $\tilde{c}_{0,e} = 0,145$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 26.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2		4,66
3	1,66	3,83
4	2,20	
4,5		2,41
5	2,00	
10	1,41	1,17

Abstands- verhältn. a/d_1	A. Nr. 28 $\tilde{c}_{0,e} = 0,15$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 30 $\tilde{c}_{0,e} = 0,145$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 32 $\tilde{c}_{0,e} = 0,145$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr.28.1+ 30.1+32.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e})^*$ $(S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	2,05	1,22	10,29	
4	4,43	3,76	4,49	6,83
5				6,49
10	7,38	2,20	5,22	
15				1,60
20				1,13

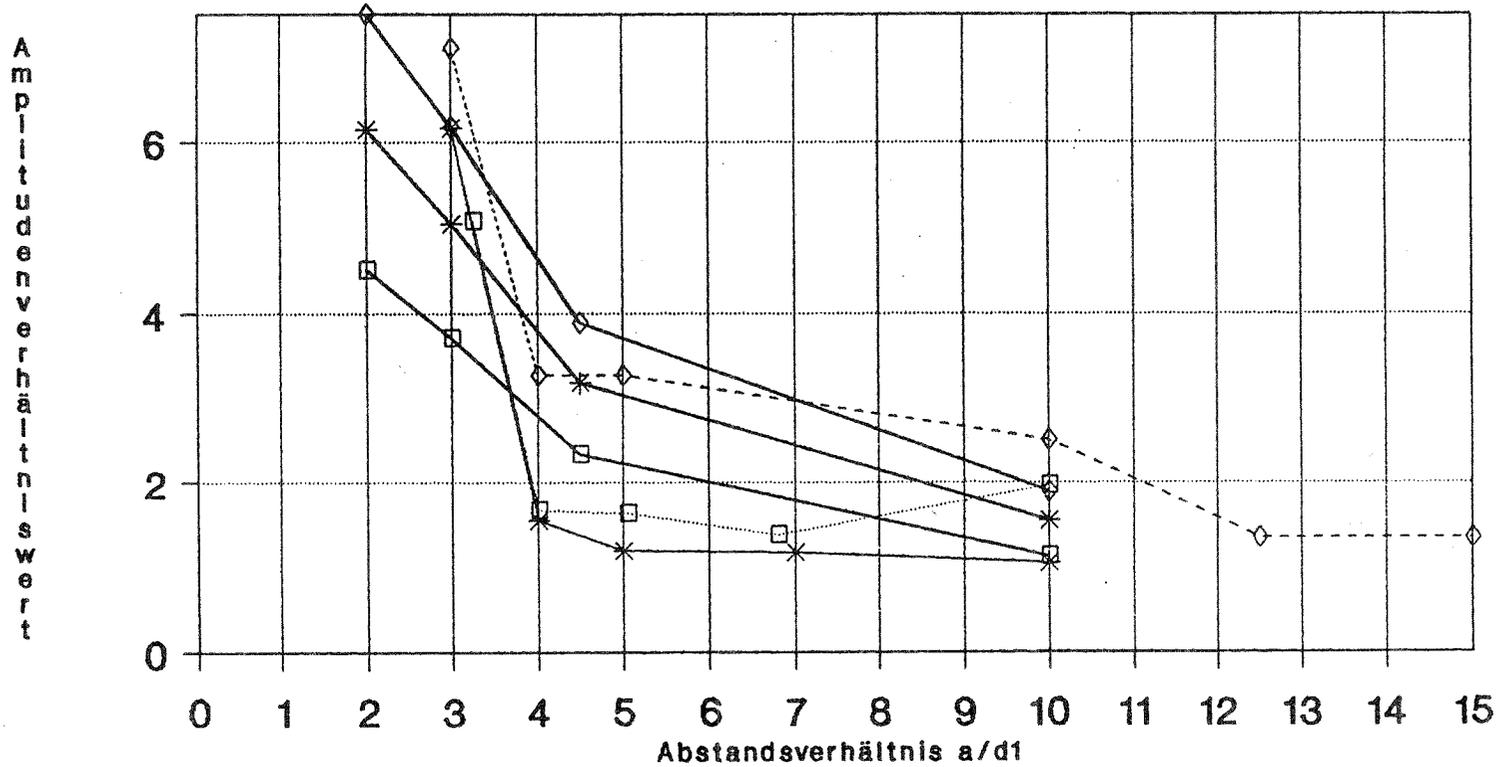
Fortsetzung Tabelle 6.1

Abstands- verhältn. a/d ₁	A. Nr. 29 $\tilde{c}_{0,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 31 $\tilde{c}_{0,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 33 $\tilde{c}_{0,e} = 0,09$ $d_2/d_1 = 1,5$	A. Nr. 29.1+ 31.1+33.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e}) * (S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
3	4,23	0,77	1,73	
4	10,38	7,50	10,00	11,38
5	10,96	10,00	11,35	10,82
10	11,73	6,73	11,35	
15				2,67
20				1,89

Abstands- verhältn. a/d ₁	A. Nr. 34 $\tilde{c}_{0,e} = 0,10$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 35 $\tilde{c}_{0,e} = 0,10$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 36 $\tilde{c}_{0,e} = 0,10$ $d_2/d_1 = 1$	A. Nr. 34.1+ 35.1+36.1 $(\tilde{c}_{0,d}/\tilde{c}_{0,e}) * (S^2_{r,e}/S^2_{r,d})$
2				6,76
3	7,24	1,54	3,04	5,56
4	3,04	4,20	4,93	
4,5				3,50
5	2,66	5,70	2,90	
6,7	2,43	4,93	2,13	
10	2,13	3,04	2,06	1,70
12,5	1,99	4,93		
14			1,75	
17			1,54	

Doppelanordnung-d2/d1=1-Amplitudenvergl.

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte



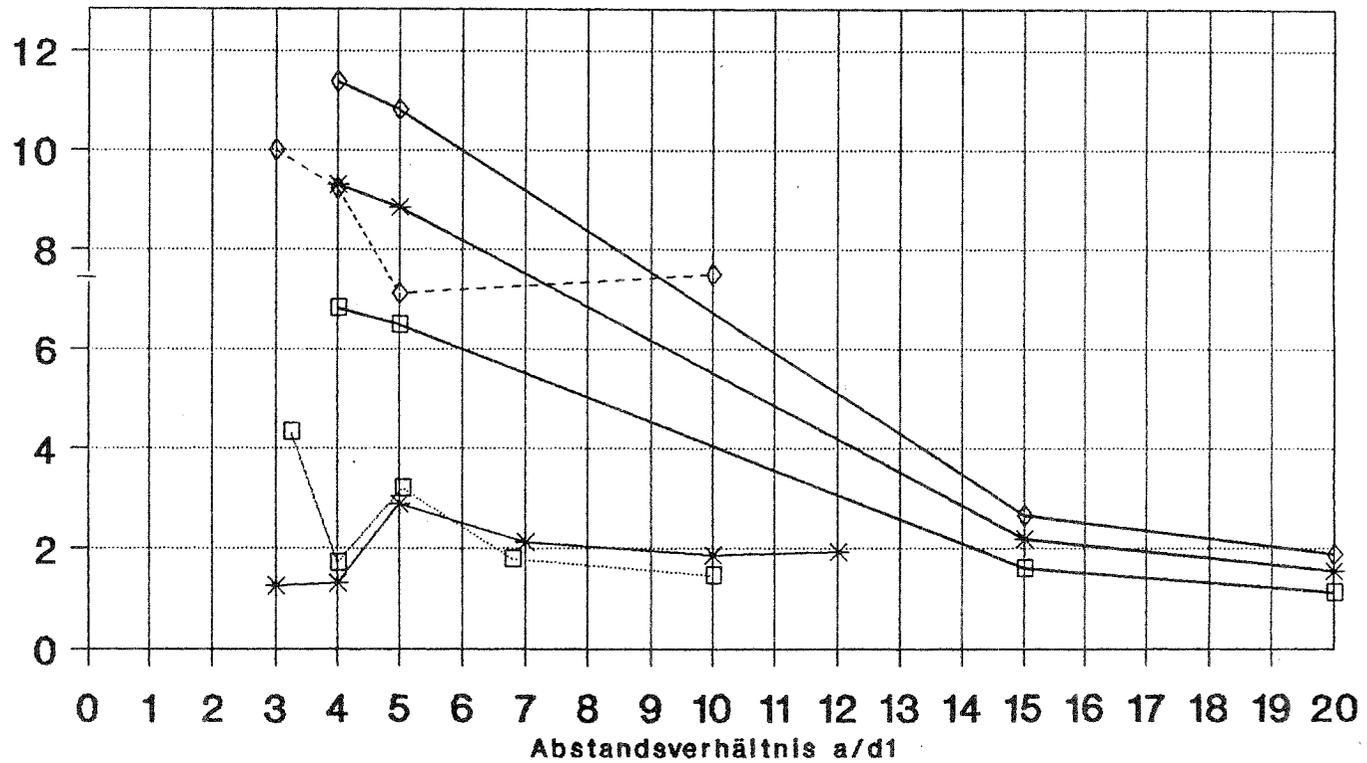
* e01d/e01e * empf.cq=0,11 □ e02d/e02e
 □ empf.cq=0,15 ◇ e03d/e03e ◇ empf.cq=0,09

Einzelzyl.Nr/cq(01/0,11;02/0,15;03/0,09)

Doppelanordnung-d2/d1=1,5-Ampl.vergleich

Vergleich-Empfehlung7.Abschn./Meßwerte

Amplitudenverhältniswert

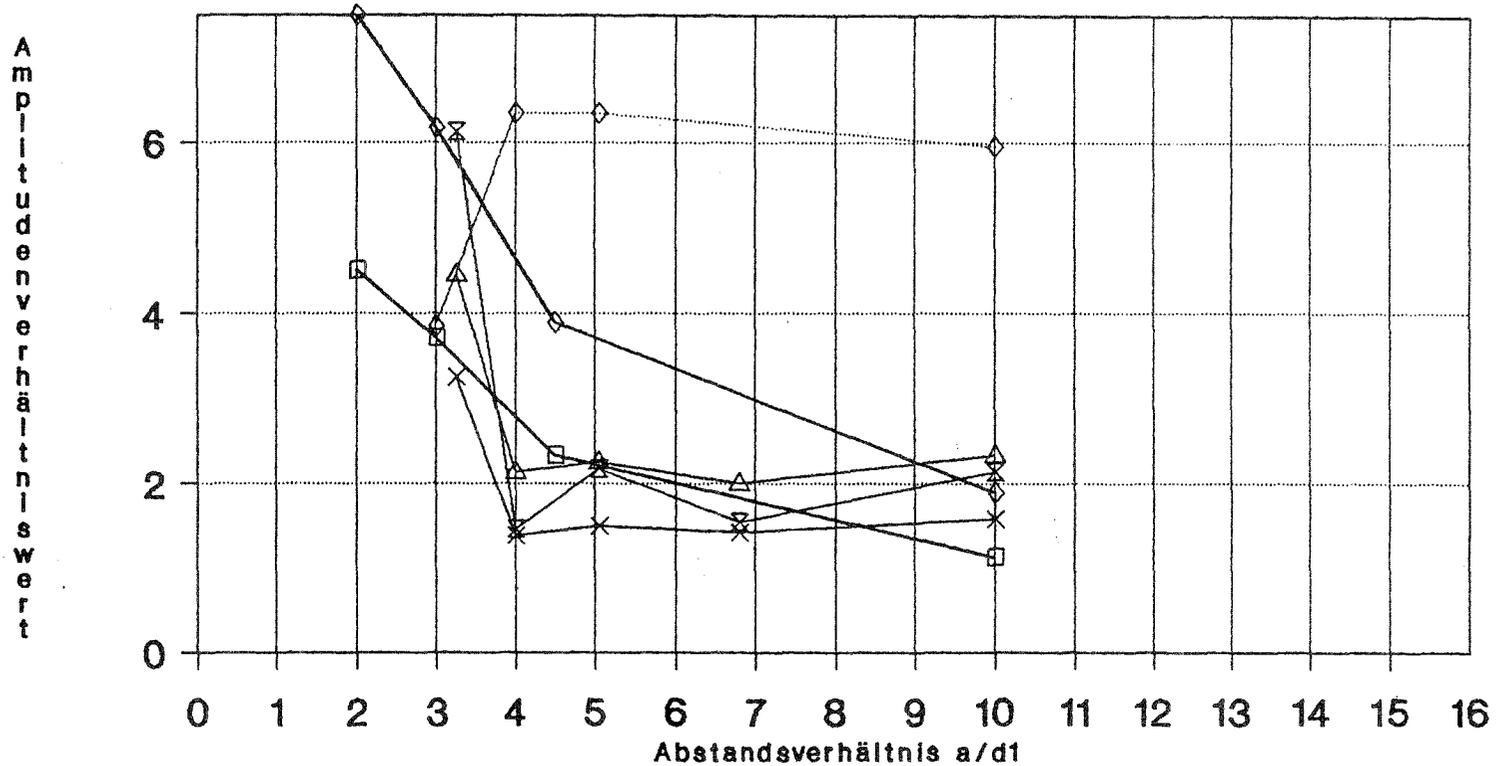


- * e04d/04e * empf.cq=0,11 □ e05d/e05e
- empf.cq=0,15 ◇ e06d/e06e ◇ empf.cq=0,09

Einzelzyl.Nr/cq(04/0,11;05/0,15;06/0,09)

Doppelan.- $d_2/d_1=0,67$ -Amplitudenvergleich

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte



—x— e_{07d}/e_{07e}

—△— e_{08d}/e_{08e}

—x— e_{09d}/e_{09e}

—□— empf.cq=0,15

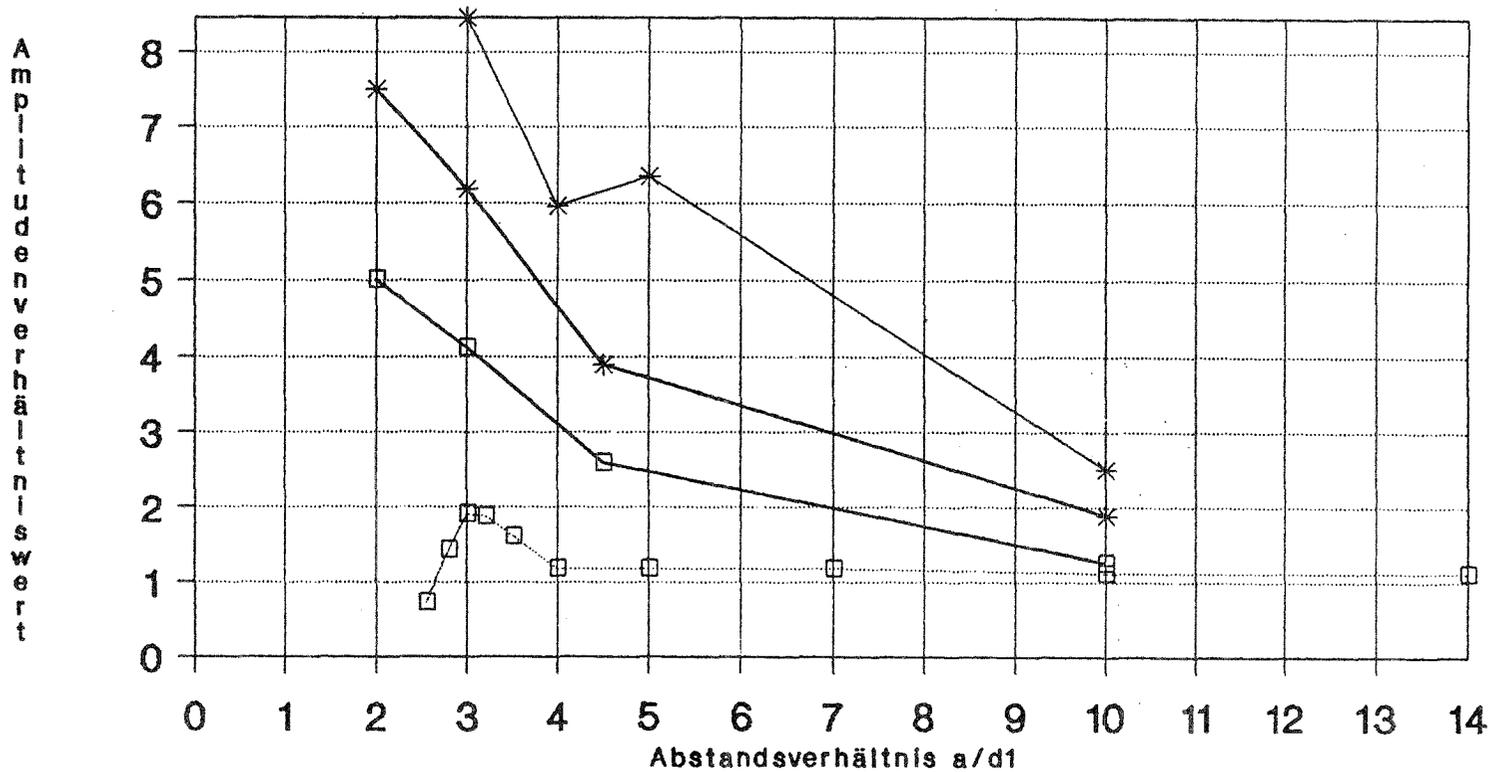
—◇— e_{11d}/e_{11e}

—◇— empf.cq=0,09

Einzelzyl.Nr/cq(07,08,09/0,15;11/0,09)

Doppelanordnung-d2/d1=1-Amplitudenvergl.

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte



* e10d/10e

□ e10ad/10ae

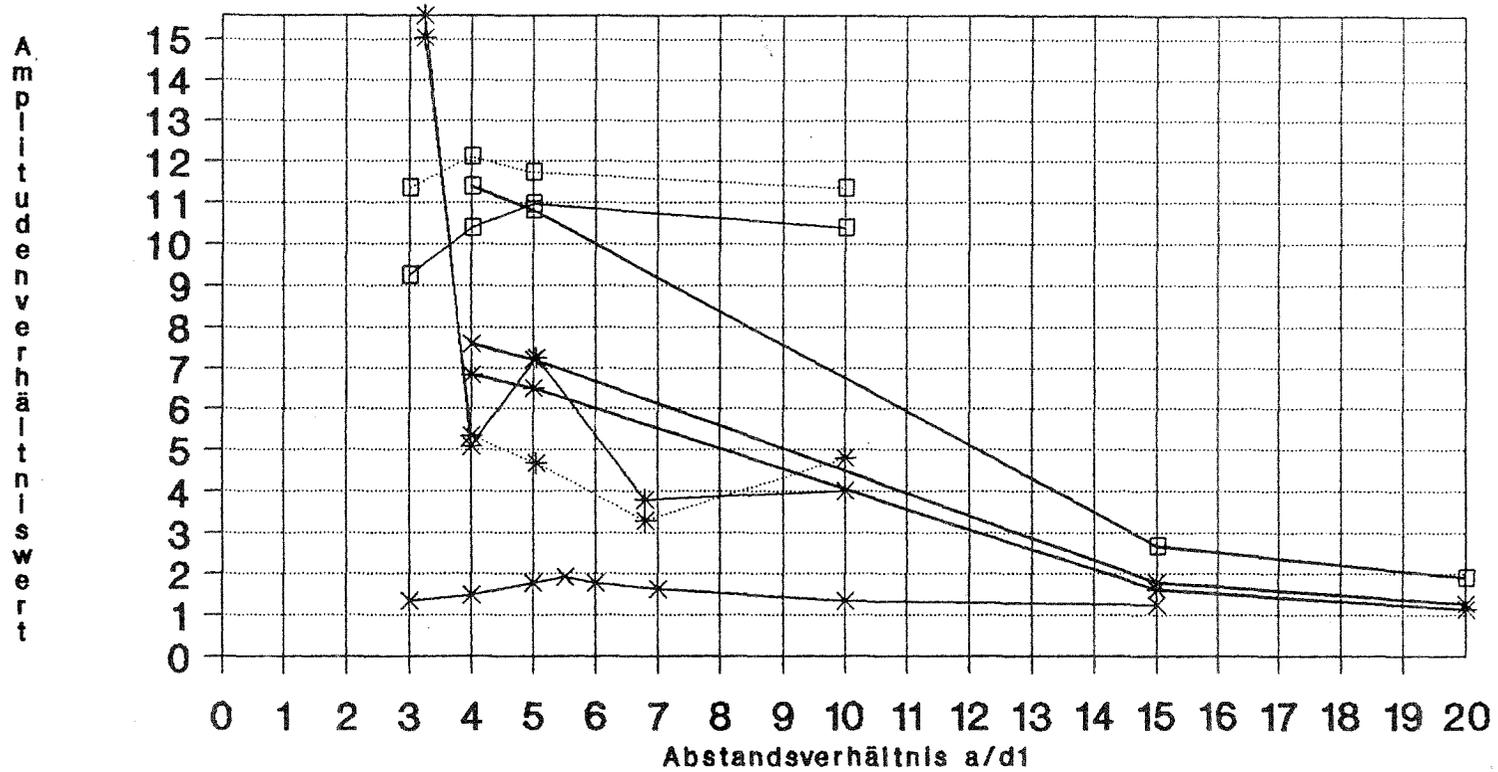
* empf.cq=0,09

□ empf.cq=0,135

Einzelzyl.Nr/cq(10/0,09;10a/0,135)

Doppelanordnung-d2/d1=1,5-Ampl.vergleich

Vergleich-Empfehlung7.Abschn./Meßwerte

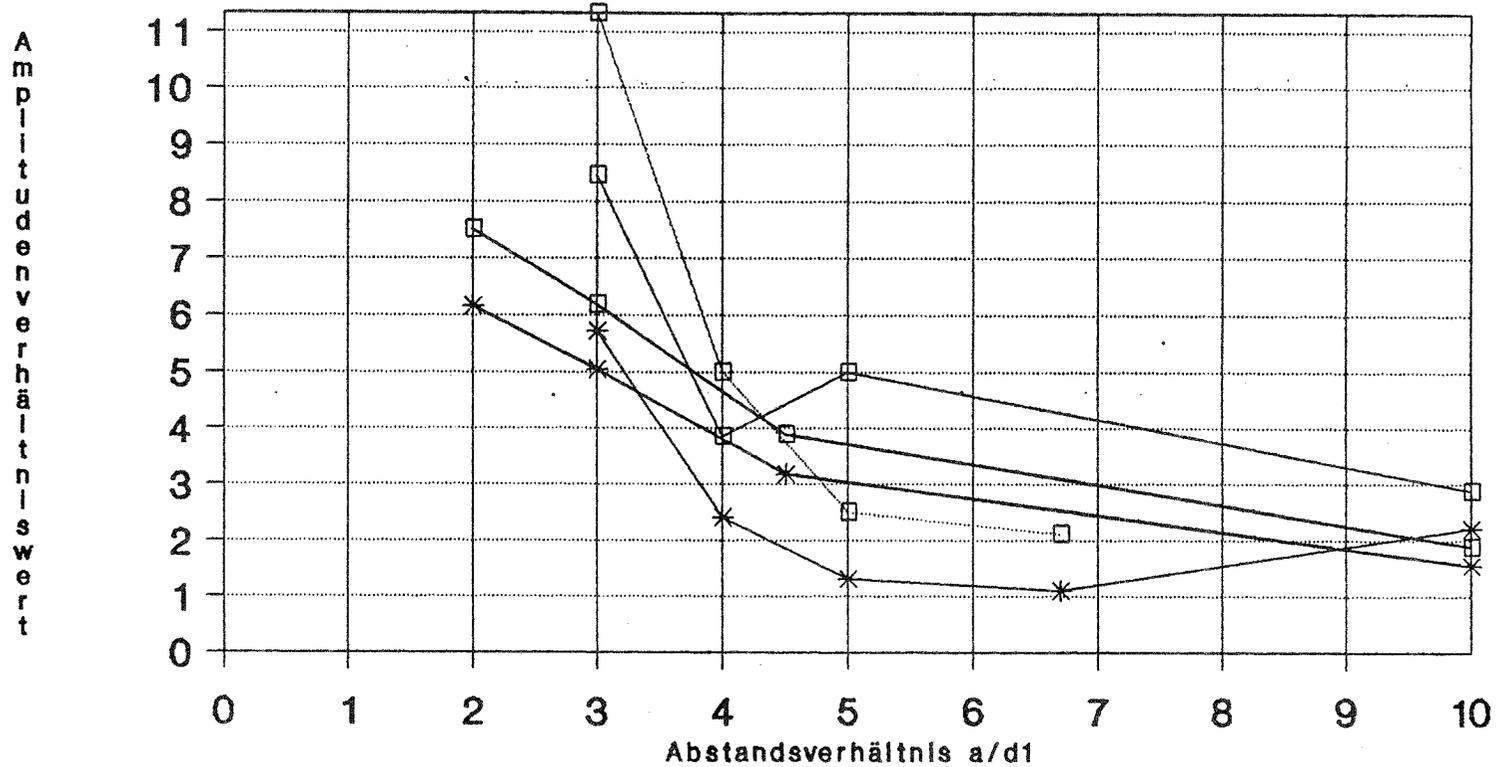


* e12d/12e * e14d/14e * empf.cq=0,15 □ e13d/13e
 □ e15d/e15e □ empf.cq=0,09 * e13ad/13ae * empf.cq=0,135

E.Nr./cq(12,14/0,15;13,15/0,09;13a/0,13)

Dreieranordnung-d2/d1=1-Amplitudenvergl.

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte

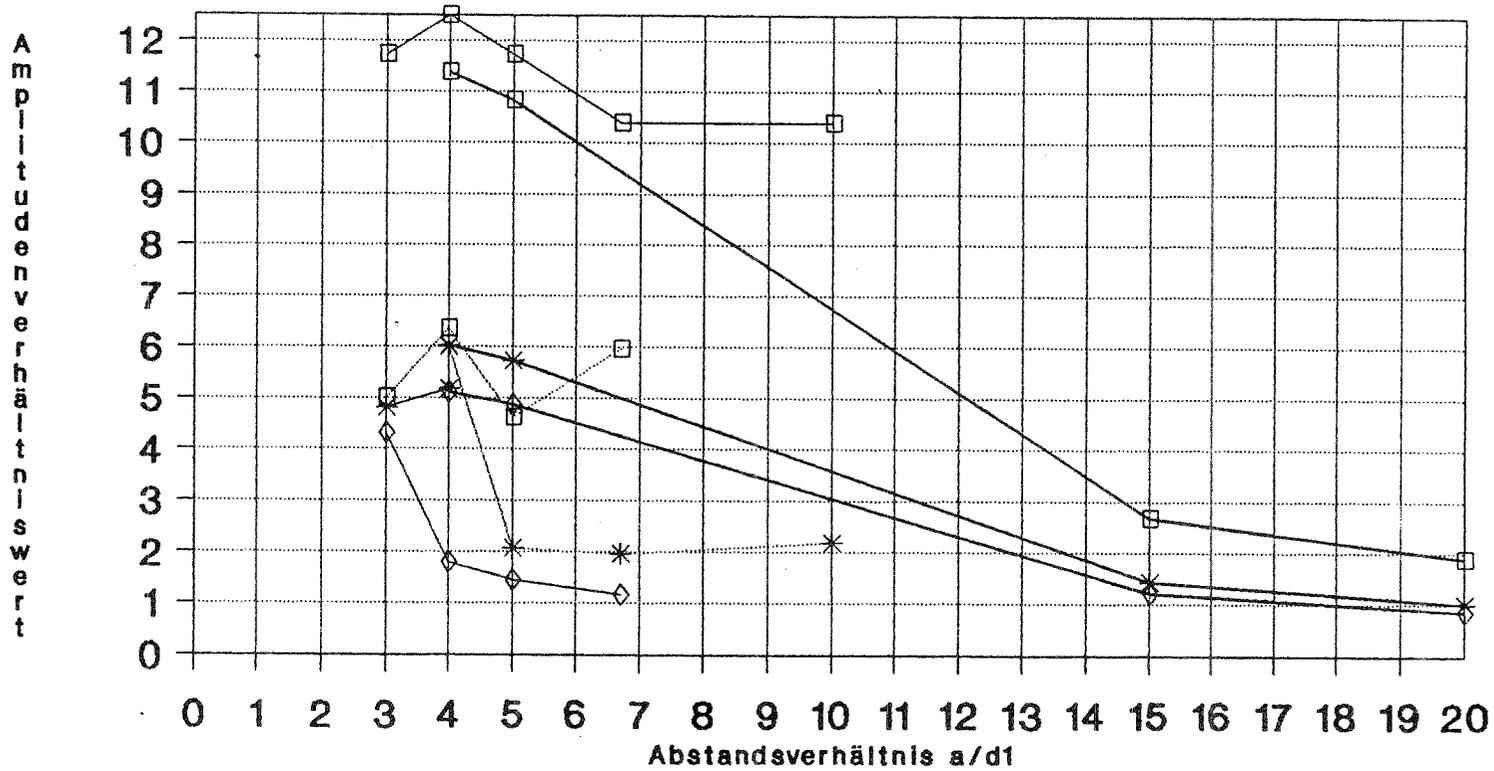


* e_{16d}/e_{16e} * empf.cq=0,11 □ e_{17d}/e_{17e}
 □ e_{18d}/e_{18e} □ empf.cq=0,09

Einzelzyl.Nr/cq(16/0,11;17,18/0,09)

Dreieranordnung- $d_2/d_1=1,5$ -Ampl.vergleich

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte

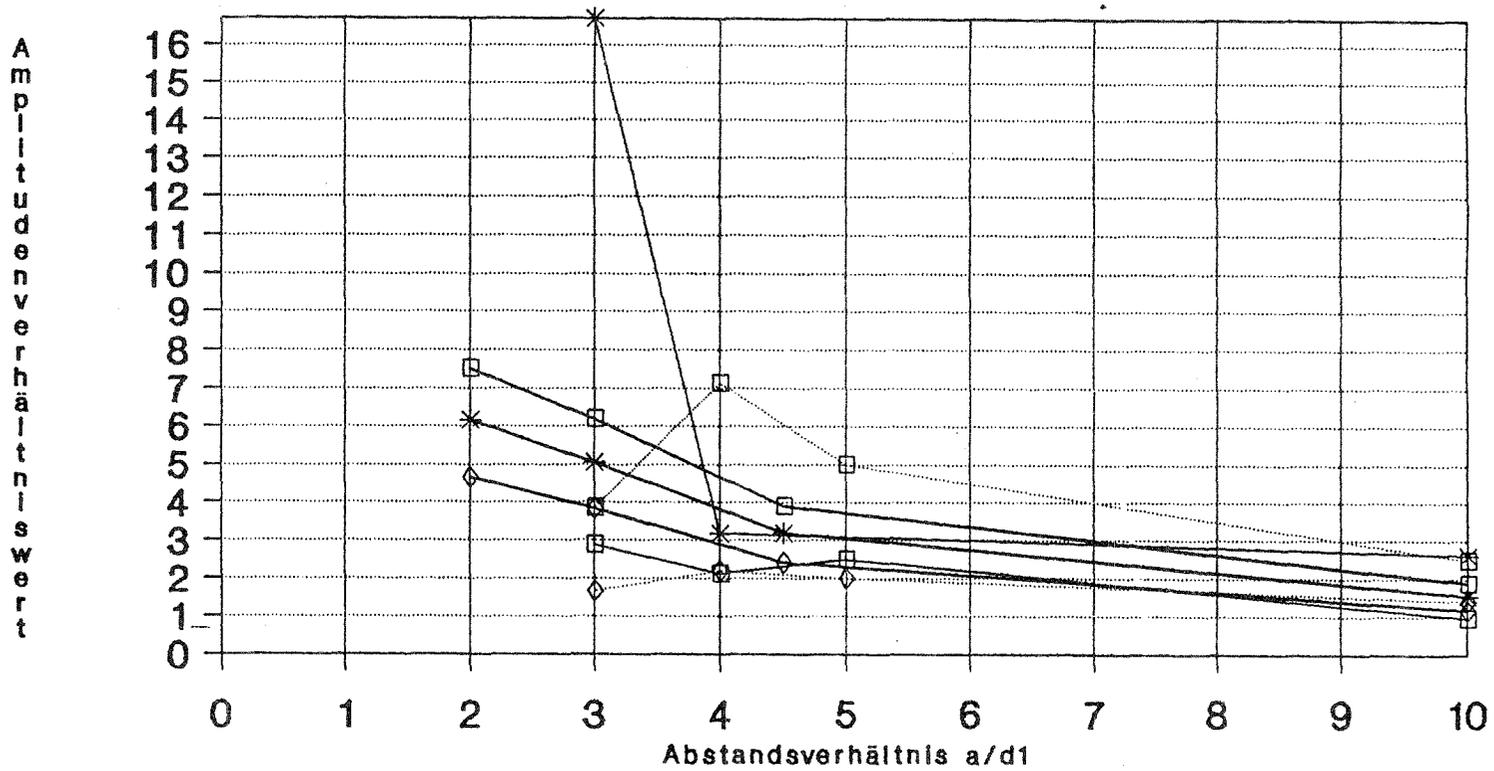


* e19d/19e * e20d/20e * empf.cq=0,17 □ e21d/21e
 □ e23d/e23e □ empf.cq=0,09 ◇ e22d/22e ◇ empf.cq=0,20

E.Nr./cq(19,20/0,17;21,23/0,09;22/0,20)

Dreieckanord. $d_2/d_1 \leq 1$ - Amplitudenvergl.

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte

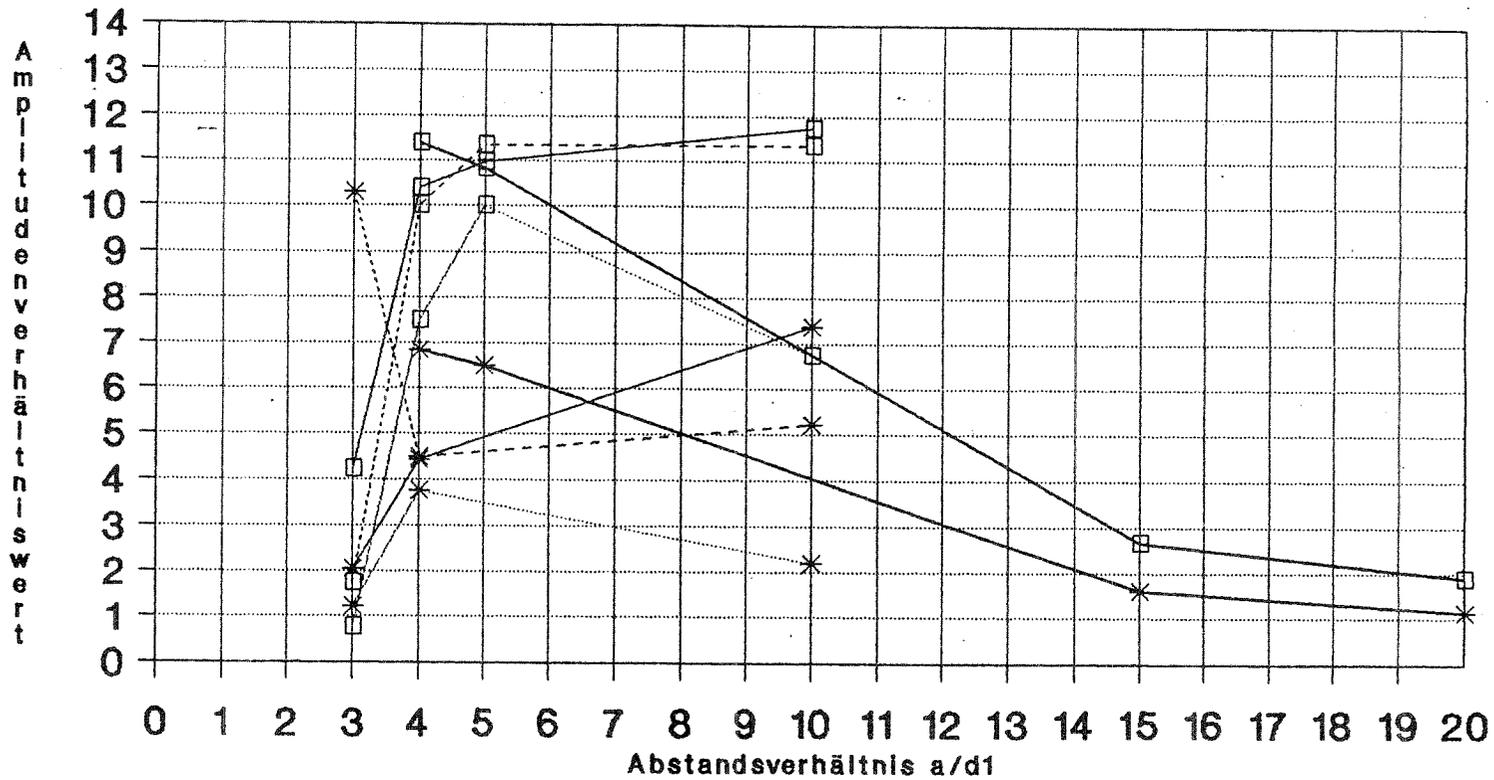


* e_{24d}/e_{24e} * empf.cq=0,11 □ e_{25d}/e_{25e} □ e_{27d}/e_{27e}
 □ empf.cq=0,09 ◇ e_{26d}/e_{26e} ◇ empf.cq=0,145

E.-Nr.cq(24/0,11;25,27/0,09;26/0,145)

Dreieckan.d2/d1=1,5-Amplitudenvergleich

Vergleich-Empfehlung 7. Abschn./Meßwerte

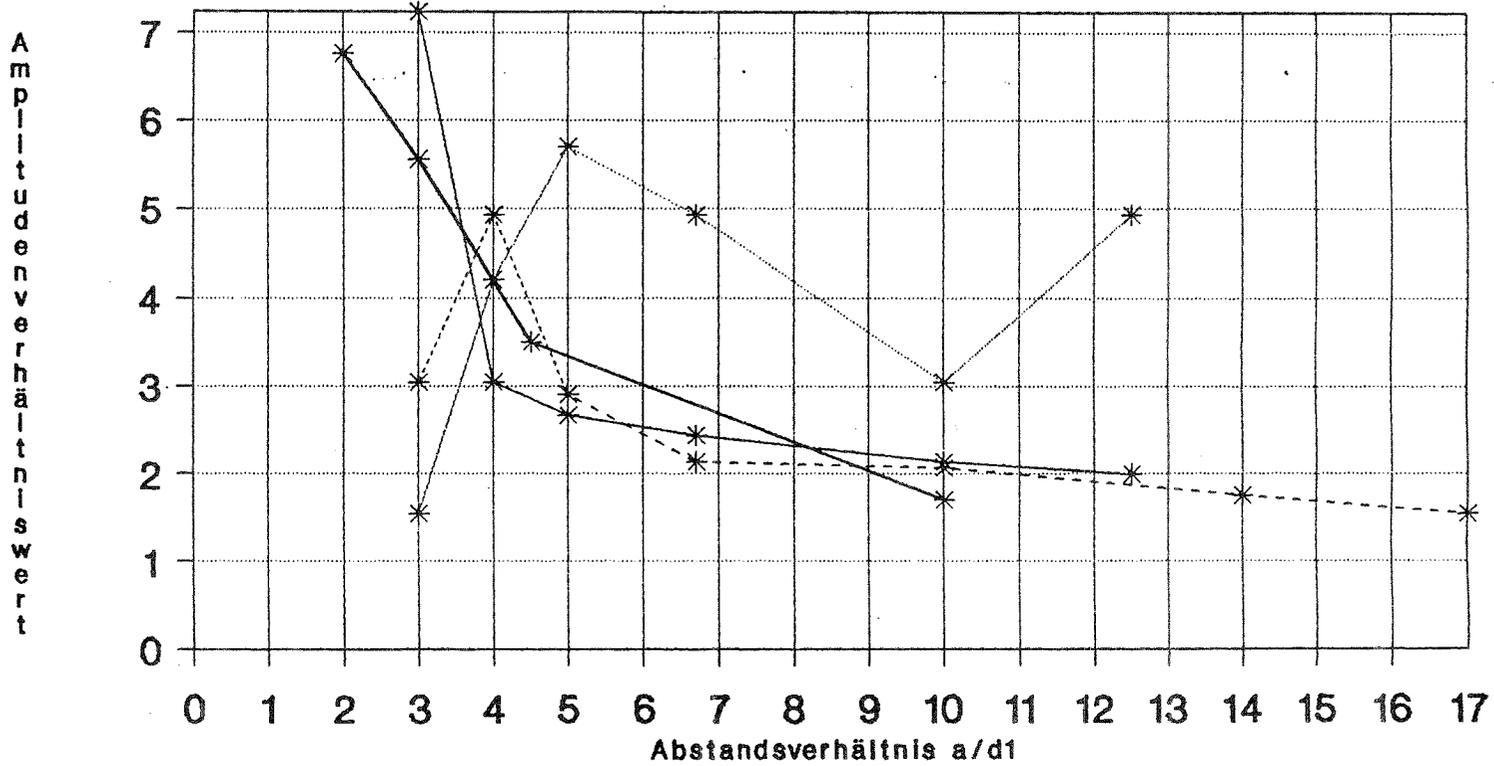


* e28d/e28e * e30d/e30e *- e32d/e32e * empf.cq=0,15
 □ e29d/e29e □ e31d/e31e -□- e33d/e33e □ empf.cq=0,09

E.-Nr.cq(28,30,32/0,15;29,31,33/0,09)

4-er+5-erAnordn.d2/d1=1-Amplitudenvergl.

Vergleich-Empfehlung7.Abschn./Meßwerte



—*— e_{34d}/e_{34e}

····*···· e_{35d}/e_{35e}

-*- e_{36d}/e_{36e}

-·-·- $empf.cq=0,10$

Einzelzyl.Nr.cq(34,35,36/0,10)

Tabelle 6.2

Modifizierter Amplitudenvergleich , Meßwerte und Empfehlungen für Doppelanordnung

Abstands- verhältn. a/d ₁	Anordnungsnummer								
	01	02	03	07	08	09	10	10a	11
2,57								0,58	
2,80								1,17	
3	3,98		3,68				4,38	1,51	1,96
3,20								1,44	
3,25		4,54		3,20	4,38	6,08			
3,5								1,27	
4	0,98	1,60	1,75	1,31	2,01	1,37	3,12	1,27	3,29
5	0,75		1,75				3,28	0,93	3,33
5,05		1,55		1,45	2,16	2,05			
6,8		1,28		1,33	1,88	1,45			
7	0,78							0,93	
10	0,66	1,81	1,34	1,51	2,17	1,96	1,34	0,88	3,09
12,5			0,68						
14								0,88	
15			0,69						

Abstands- verhältn. a/d ₁	Anordnungsnummer							
	04	05	06	12	13	13a	14	15
3	0,82		5,23		4,85	1,04		5,86
3,25		3,86		14,22			13,85	
4	0,86	1,62	4,80	4,91	5,40	1,16	5,05	6,42
5	1,95		3,76		5,63	1,39		6,07
5,05		2,99		6,77			4,42	
5,5						1,50		
6						1,39		
6,8		1,78		3,67			3,13	
7	1,35					1,27		
10	1,24	1,31	3,99	3,77	5,52	1,05	4,45	5,89
12	1,27							
14						0,97		

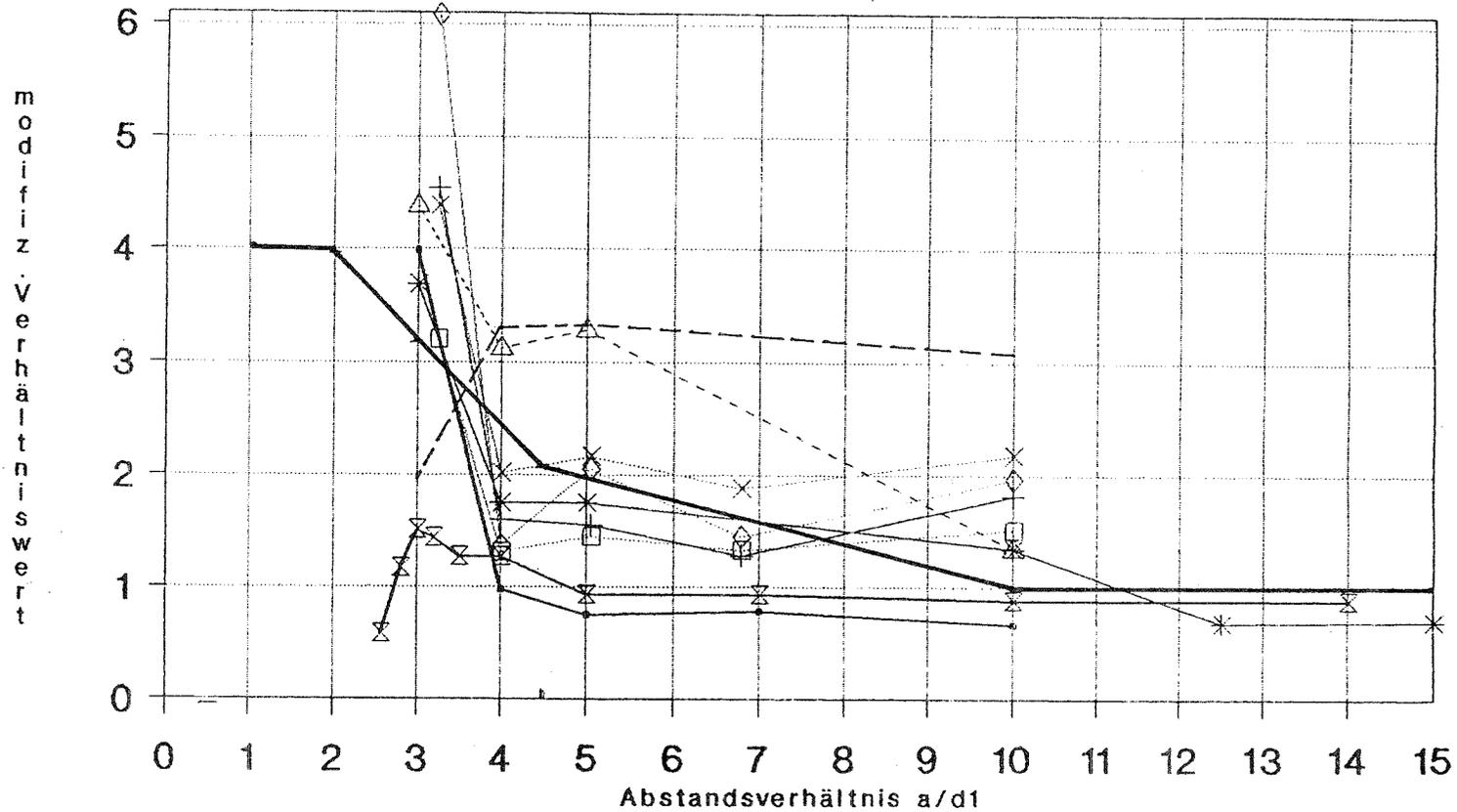
Tabelle 6.3

Modifizierte Amplitudenvergleiche, Meßwerte und Empfehlungen für Dreier-, Vierer- und Fünferanordnung

Abstands- $(C_{Q,d,Meßw.} / C_{Q,Empf.})$ * $(S_{r,e,Meßw.} / S_{r,d,Meßw.})^2$ verhältn.										
a/d ₁	Anordnungsnummer									
	16	17	18	24	25	26	27	34	35	36
3	3,85	4,39	5,92	10,89	1,53	1,44	1,96	4,27	0,89	1,78
4	1,59	1,98	2,64	2,07	1,10	1,90	3,72	1,79	2,28	2,95
5	0,88	2,65	1,35		1,32	1,65	2,65	1,57	3,63	1,71
6,7	0,74		1,08					1,42	2,92	
7										1,22
10	1,44	1,54		1,70	0,53	1,23	1,29	1,25	1,78	1,21
12,5									2,92	
12,6								1,21		
14										1,05
17										0,88

Abstands- $(C_{Q,d,Meßw.} / C_{Q,Empf.})$ * $(S_{r,e,Meßw.} / S_{r,d,Meßw.})^2$ verhältn.											
a/d ₁	Anordnungsnummer										
	19	20	21	22	23	28	29	30	31	32	33
3	4,87		6,15	5,08	2,64	1,78	2,17	1,01	0,46	8,94	0,89
4	5,14	7,76	6,67	2,16	3,27	3,81	5,52	3,22	3,96	3,79	5,23
5		2,02	6,14	1,72	2,41		5,64		5,28		5,96
6,7		1,95	5,46	1,38	3,15						
10		2,10	5,49			6,43	6,13	1,86	3,46	4,57	5,89

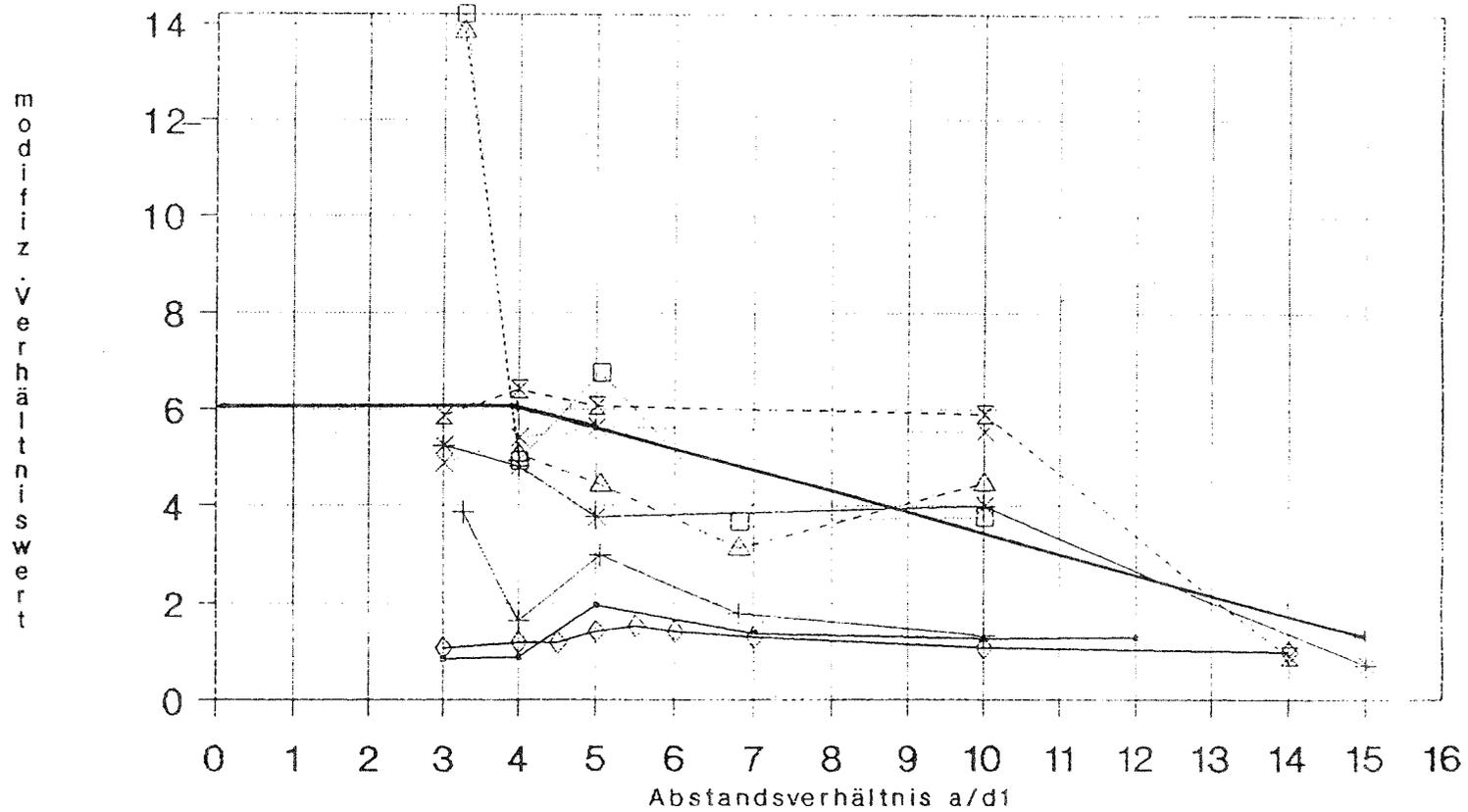
Doppelanordn.-d2/d1=1-modifiz.Amplitude



- Anordn.01 + Anordn.02 * Anordn.03 □ Anordn.07
- ×— Anordn.08 ◇ Anordn.09 -△- Anordn.10 ⊠ Anordn.10a
- Anordn.11
- Verhältnisswert Abschnitt 6.1 Erregerkraftbeiwert/Quadrat Strouhalzahl

Anordn. bedeutet: $\frac{\text{Meßwert Querkraftbeiwert Doppelanordn./0,17}}{\text{Meßwert Strouhalzahl (Doppelanordn./Einzelzyl.)}^2}$

Doppelanordn.- $d_2/d_1=1,5$ modifiz. Amplitude

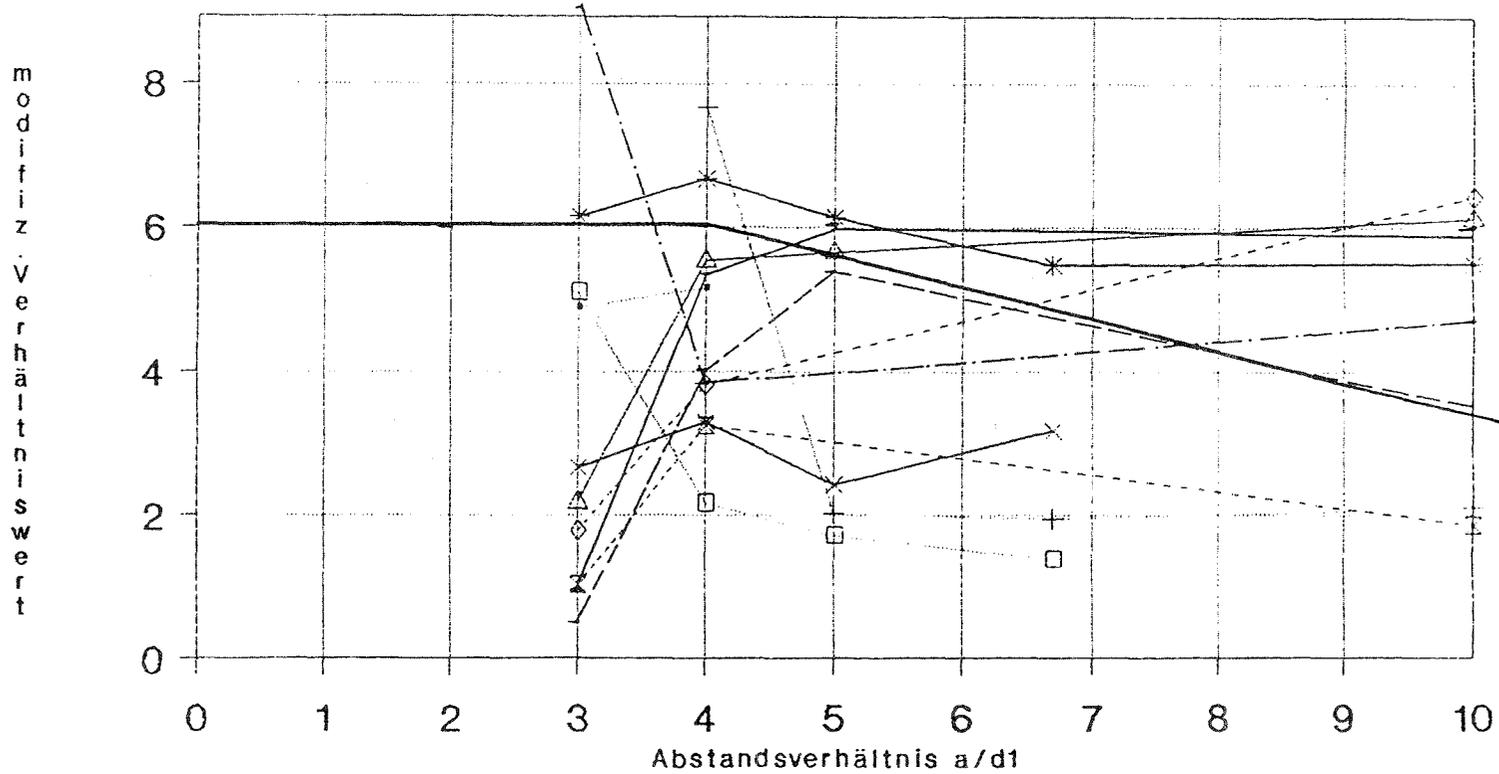


—●— Anordn.04 + Anordn.05 * Anordn.06 □ Anordn.12
 × Anordn.13 ◇ Anordn.13a -△- Anordn.14 -⊗- Anordn.15

Verhältnisswert Abschnitt 6.1 Erregerkraftbeiwert/Quadrat Strouhalzahl

Anordn. bedeutet: $\frac{\text{Meßwert Querkraftbeiwert Doppelanordn.}/0,17}{\text{Meßwert Strouhalzahl (Doppelanordn./Einzelzyl.)}^2}$

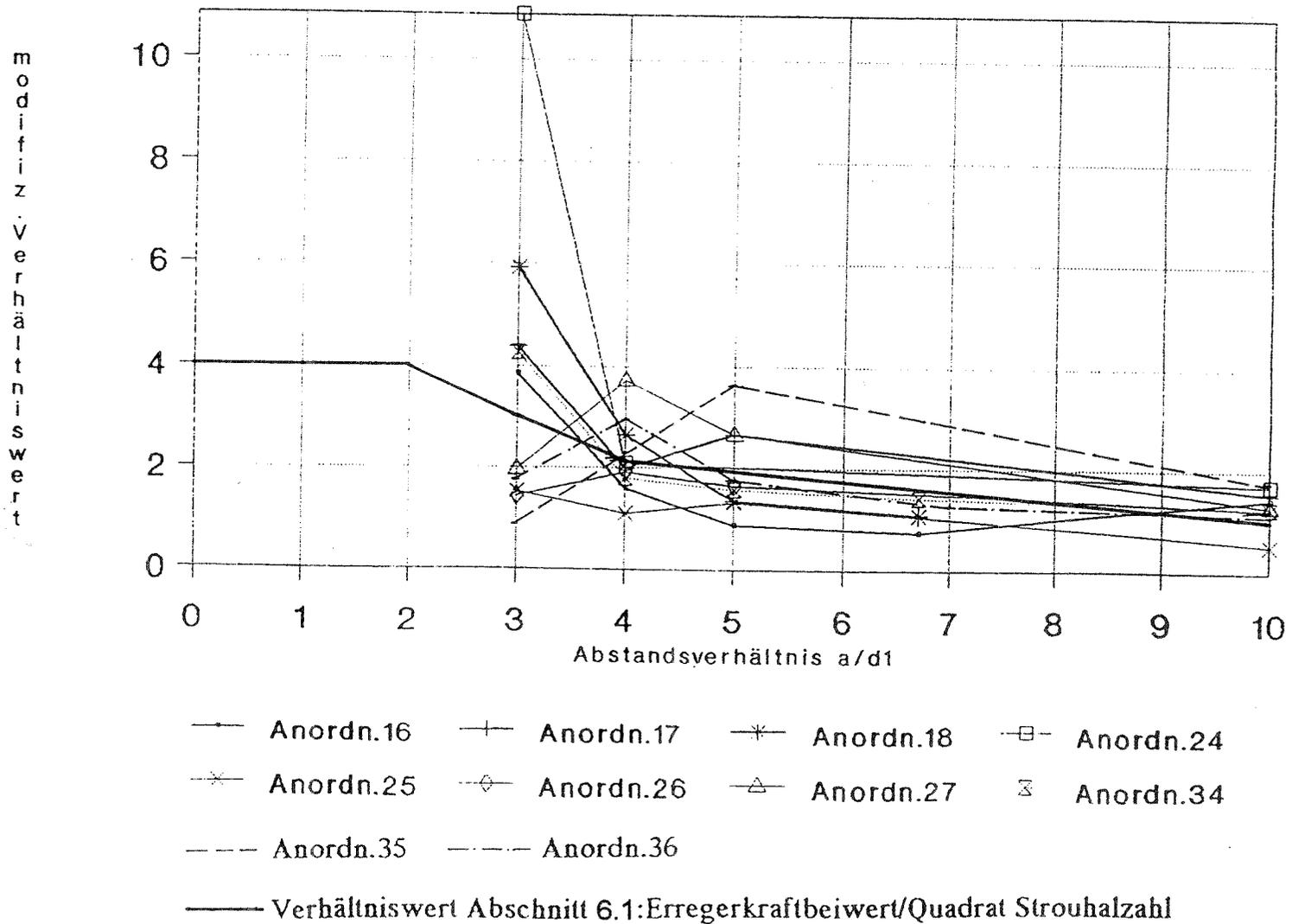
Dreieranordnung- d_2/d_1 bzw. $d_2'/d_1=1,5$ modifiziertes Amplitudenverhältnis



- Anordn. 19 + Anordn. 20 * Anordn. 21 □ Anordn. 22
- × Anordn. 23 ◇ Anordn. 28 △ Anordn. 29 ⊠ Anordn. 30
- Anordn. 31 - - - - Anordn. 32 — Anordn. 33
- Verhältniswert Abschnitt 6.1: Erregerkraftbeiwert/Quadrat Strouhalzahl

Anordn. bedeutet: $\frac{\text{Meßwert Querkraftbeiwert Doppelanordn.}/0,17}{\text{Meßwert Strouhalzahl (Doppelanordn./Einzelzyl.)}^2}$

Dreier-, Vierer- und Fünferanordnungen d2/d1=1-modifiziertes Amplitudenverh.



Anordn. bedeutet: $\frac{\text{Meßwert Querkraftbeiwert Doppelanordn.}/0,17}{\text{Meßwert Strouhalzahl (Doppelanordn./Einzelzyl.)}^2}$

7. STATISTISCHE AUSWERTUNG DER ABSTANDSVERHÄLTNISSE DER IN DEN OSTDEUTSCHEN LÄNDERN VORHANDENEN SCHORNSTEINGRUPPEN

Um einen Überblick über die Häufigkeit der real auftretenden Abstandsverhältnisse zu erhalten, wurden die in den Tabellen des Teils 2 zusammengestellten Einzelwerte statistisch ausgewertet. Als wichtigster Parameter wurde das Verhältnis $a/d_1 = \text{Abstand} / \text{mittlerer Durchmesser}$ klassiert und Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe berechnet. Die Auswertung erfolgte zweimal, einmal für alle Schornsteingruppen und einmal für die Massivschornsteine allein.

Bei Schornsteingruppen mit mehr als zwei Schornsteinen wurden die Abstände mehrfach gezählt. Bei zwei unterschiedlichen Schornsteindurchmessern wurde der größere berücksichtigt. Der Stichprobenumfang war 178 im ersten Fall und 162 im zweiten Fall.

Die Auswertung für alle Schornsteine ergab

Mittelwert = 6,128
Standardabweichung = 2,876
Schiefe = 1,105

und für die Massivschornsteine allein

Mittelwert = 6,117
Standardabweichung = 2,798
Schiefe = 1,084

Die Häufigkeiten lassen sich recht gut an eine logarithmische Normalverteilung mit den gleichen Parametern anpassen. In den folgenden Tabellen und in den anschließenden Diagrammen sind die klassierten Häufigkeiten dargestellt und mit dem theoretischen Modell der logarithmischen Normalverteilung verglichen. Die Verteilung hat eine ausgesprochen positive Schiefe, was plausibel ist, da Werte $a/d_1 < 1$ physikalisch nicht denkbar sind. Zwischen den beiden klassierten Stichproben zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede.

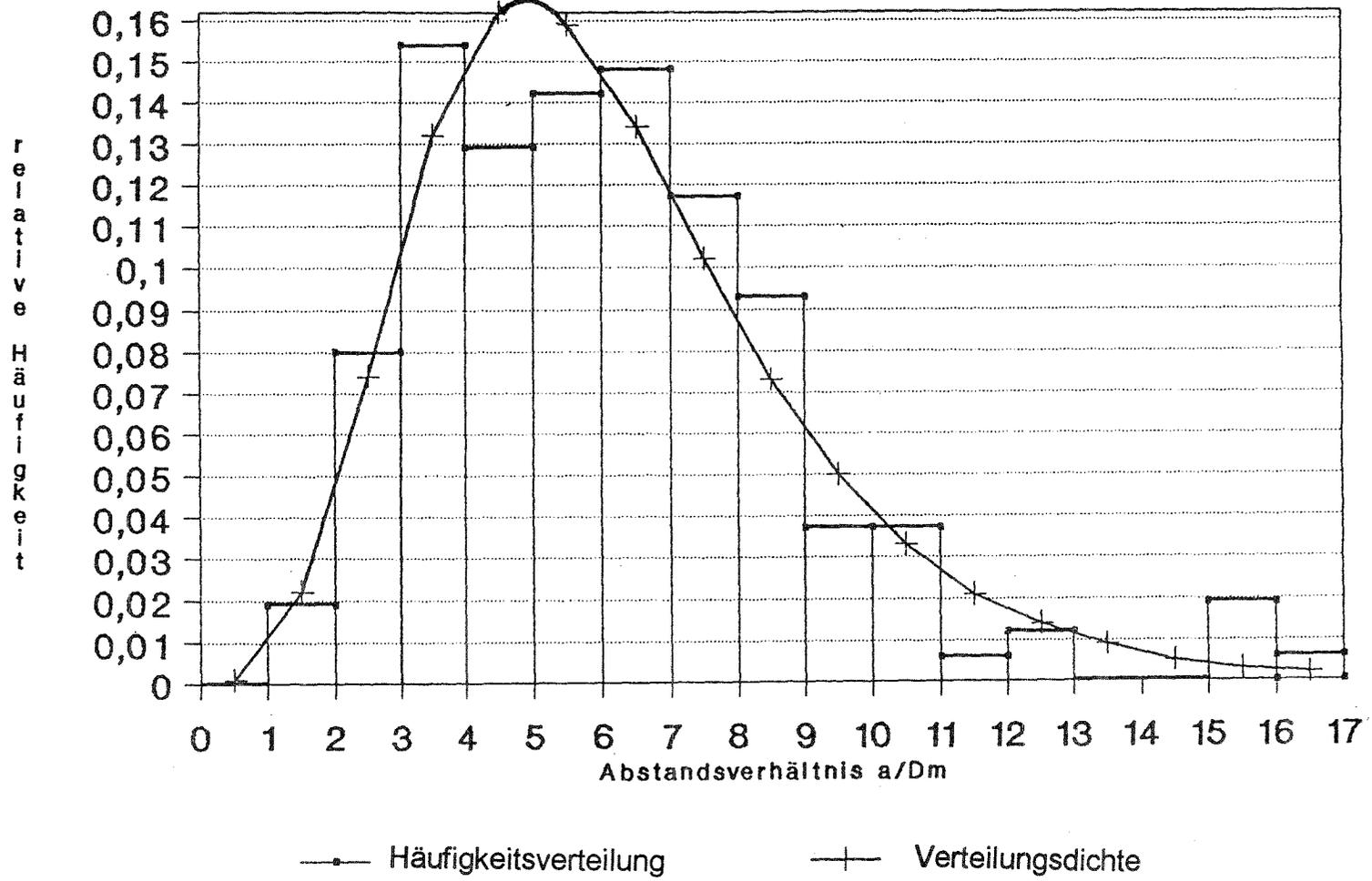
Statistische Auswertung der Abstandsverhältnisse a/d_1 für alle Bauweisen und Anpassung an die logarithmischen Normalverteilung.

Klassen grenzen a/d_1	absol. Häufigk.	absolute Summenh.	relat. Häufigk.	relative Summenh.	$f(x)$	$F(x)$
0 - 1	0	0	0	0	0,002	0,003
1 - 2	6	6	0,034	0,034	0,025	0,029
2 - 3	13	19	0,073	0,107	0,078	0,106
3 - 4	25	44	0,140	0,247	0,132	0,238
4 - 5	23	67	0,129	0,374	0,159	0,396
5 - 6	27	94	0,152	0,528	0,156	0,550
6 - 7	24	118	0,135	0,663	0,131	0,680
7 - 8	23	141	0,129	0,792	0,101	0,781
8 - 9	16	157	0,090	0,882	0,072	0,854
9 -10	7	164	0,039	0,921	0,052	0,904
10 -11	6	170	0,034	0,955	0,034	0,938
11 -12	1	171	0,006	0,961	0,022	0,960
12 -13	2	173	0,011	0,972	0,014	0,975
13 -14	0	173	0	0,972	0,009	0,984
14 -15	0	173	0	0,972	0,006	0,990
15 -16	3	176	0,017	0,989	0,004	0,994
16 -17	2	178	0,011	1	0,002	0,996

Statistische Auswertung der Abstandsverhältnisse a/d_1 für Massivschorensteine (Stahlbeton und Mauerwerk) und Anpassung an die logarithmischen Normalverteilung.

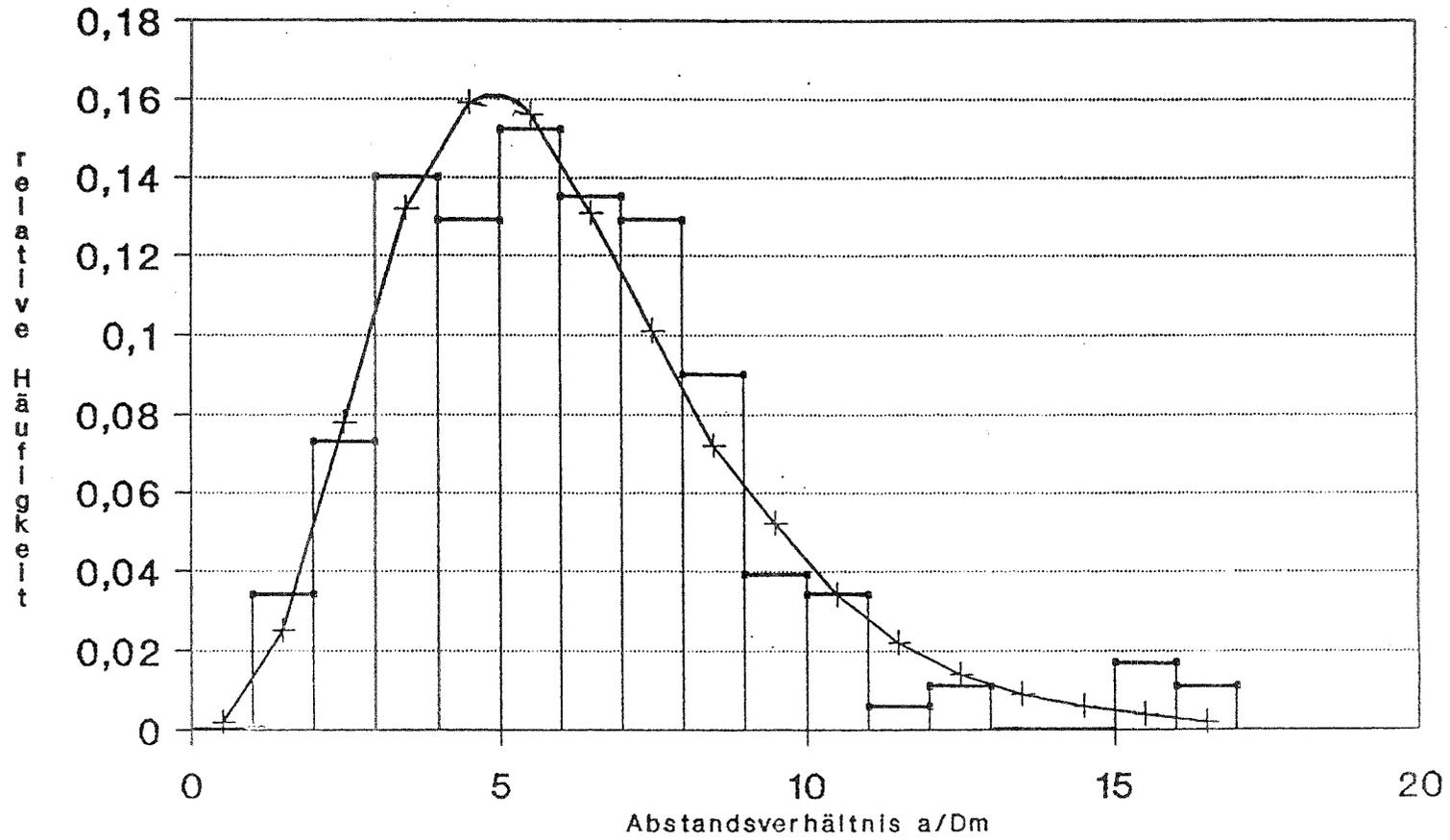
Klassen grenzen a/d_1	absol. Häufigk.	absolute Summenh.	relat. Häufigk.	relative Summenh.	$f(x)$	$F(x)$
0 - 1	0	0	0	0	0,001	0,002
1 - 2	3	3	0,019	0,019	0,022	0,025
2 - 3	13	16	0,080	0,099	0,074	0,100
3 - 4	25	41	0,154	0,253	0,132	0,231
4 - 5	21	62	0,129	0,383	0,162	0,392
5 - 6	23	85	0,142	0,525	0,159	0,550
6 - 7	24	109	0,148	0,673	0,134	0,683
7 - 8	19	128	0,117	0,790	0,102	0,785
8 - 9	15	143	0,093	0,883	0,073	0,859
9 -10	6	149	0,037	0,920	0,050	0,909
10 -11	6	155	0,037	0,957	0,033	0,942
11 -12	1	156	0,006	0,963	0,021	0,964
12 -13	2	158	0,012	0,975	0,014	0,977
13 -14	0	158	0	0,975	0,009	0,985
14 -15	0	158	0	0,975	0,005	0,991
15 -16	3	161	0,019	0,994	0,003	0,994
16 -17	1	162	0,006	1	0,002	0,997

Verteilung der Abstandsverhältnisse für Massivschorensteine



Schornsteingruppen; Stichprobenumf. 162

Verteilung der Abstandsverhältnisse für Massiv- und Stahlschornsteine



—●— Häufigkeitsverteilung
—+— Verteilungsdichte

Schornsteingruppen; Stichprobenumf. 178

Die Auswertungen zeigen, daß 10% aller Schornsteingruppen in Massivbauweise Abstandsverhältnisse von $a/d_1 \leq 3$ und 38% Abstandsverhältnisse von $a/d_1 \leq 5$ haben, bei denen große Beanspruchungserhöhungen auftreten. Nicht nur der Schadensfall Boxberg sondern auch die statistischen Erhebungen zeigen, daß die Untersuchungsergebnisse praktische Relevanz besitzen.

T 2481

Wind Induced Vibrations of Cylindrical Bodies in Group- or Row-arrangements

G. Spaethe, A. Trätner

Abstract

Cylinders in groups in wind flow will get higher vibration amplitudes and internal forces than isolated ones. This is due to vortex shedding at the upstream cylinder.

The report contains results of wind tunnel experiments with chimneys with Strouhal-numbers similar to reinforced concrete. Different diameters and heights of the chimneys in the group configuration were taken into account. Double-, triple-, triangle-, quadrangular-, and quintuple configurations have been investigated.

The Strouhal-number, the lift coefficient and the non-dimensional oscillation amplitudes have been determined. As a rule the results give smaller Strouhal-numbers and larger lift coefficients if the ratio of diameter to distance is getting smaller, if the upstream cylinder has a larger diameter than the downstream one, and if the height of the upstream cylinder is greater.

The ratios of distance and of diameter are decisive, the ratio of height has smaller influence. The test results are given as ratio of group arrangement to the isolated cylinder. For practical use ratios for the Strouhal-number and the lift-coefficient are given as a function of the ratios of distance and of diameter.

The report further gives a compilation of geometrical data of 132 existing chimney-groups and the statistical analysis.

Vibrations transversales dues à l'action du vent et causées par le détachement des tourbillons dans le cas d'ouvrages cylindriques circulaires montés en groupes ou rangées

G. Spaethe, A. Trätner

Résumé

Sous l'action du vent, les groupes d'ouvrages cylindriques peuvent présenter des amplitudes et contraintes d'oscillation beaucoup plus importantes que les ouvrages isolés. Ceci est causé par une sollicitation des cylindres en aval due au détachement régulier des tourbillons aux cylindres situés en amont.

La présente recherche porte sur des investigations réalisées sur cheminées dont les paramètres d'affaiblissement de masse correspondent à ceux du béton armé. Lors des investigations, on a également pris en considération des diamètres et hauteurs différents des cheminées placées en groupes ou rangées. On a examiné des groupes de deux cheminées ou des rangées de trois cheminées, des cheminées placées en triangle ainsi que des groupes de quatre et de cinq cheminées.

Lors des mesures, on a déterminé le coefficient de Strouhal S_r , le coefficient de force transversale \tilde{C}_c ainsi que la déviation relative. En général, les essais résultent dans des coefficients de Strouhal plus faibles et des coefficients de force transversale plus élevés que dans le cas de cylindres isolés si le rapport de la distance au diamètre diminue, si la cheminée en question se situe à l'abri d'une cheminée de diamètre plus important ou que la cheminée en question soit située à l'abri d'une cheminée plus haute.

Ce sont les rapports de distance et de diamètre qui sont les paramètres déterminants, les rapports de l'hauteur n'ayant qu'une influence plus faible. Lors de l'évaluation des essais, on a déterminé les valeurs obtenues pour cheminées placées en groupes par rapport à celles placées isolément. Pour l'application pratique, on donne des facteurs d'augmentation du coefficient de force transversale ainsi que des facteurs de réduction du coefficient de Strouhal en fonction du rapport de distance et de diamètre.

La recherche comprend en outre une liste des dates géométriques de 132 cheminées réalisées ainsi qu'une évaluation statistique.