

WIRBELSTRUKTUREN UND KRAFTWIRKUNGEN AM KREISZYLINDERSTUMPF IN SCHERSTRÖMUNGEN

F. Richter, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

Abstrakt

Die Reynoldszahl Re stellt einen bedeutenden Parameter für die Umströmung eines Kreiszylinderstumpfes dar und dient zur Beschreibung der verschiedenen Strömungszustände. Abhängig vom Strömungszustand (unter-, überkritisch oder transitional) bilden sich markante Strukturen im Geschwindigkeitsfeld und in der Wirbelstärke aus, die mit den gemessenen Wanddruckverteilungen korrelieren. So zeigt sich bei einem Anstieg der Fluidgeschwindigkeit eine Absenkung des Wanddruckes sowie ein weitgehend konstanter Wanddruckverlauf im Bereich des Ablösegebietes. Durch die Bewegung des Zylinderstumpfes auf einer Kreisbahn ändert sich die lokale Reynoldszahl über den Modellquerschnitt, was zu Asymmetrien in den Strömungsstrukturen führt. Bei unter- und überkritischer Anströmung folgen die Nachlaufstrukturen weitgehend einer Kreisbahn. Die Strömungszustände an der Innen- bzw. Außenseite sind typisch für den entsprechenden Fall. Es entsteht eine starke Wechselwirkung zwischen der Mantelumströmung des Zylinderstumpfes und der Umströmung seines freien Endes, die sich auf die Druckverteilung und somit auch auf die Strömungskräfte auswirkt. Abhängig vom Strömungszustand bilden sich markante Wirbelstrukturen im Strömungsfeld aus. Bei einer Anströmung ohne Scherung ($R/D = \infty$) sind die entstehenden Wirbelstrukturen im zeitlichen Mittel weitgehend symmetrisch und somit treten im allgemeinen im zeitlichen Mittel keine Querkräfte auf. Unter Berücksichtigung von Scherprofil bzw. Bahnkrümmung bilden sich an der Innen- und Außenseite unterschiedliche Druckverteilungen und Wirbelstrukturen aus. Daraus folgt eine Kraftwirkung quer zur Hauptströmrichtung, welche besonders durch die Kombinationen der Strömungszustände der beiden Modellseiten beeinflusst wird. Bei gleichartigen Strömungszuständen an der Innen- und Außenseite, wie es bei unter- und überkritischen Reynoldszahlen der Fall ist, entsteht eine Kraftwirkung zum Drehzentrum hin, entgegen der Fliehkraft des Modells. Dagegen treten im Transitionsbereich an der Innen- und Außenseite unterschiedliche Strömungszustände auf – während an der Innenseite ein unterkritischer Strömungszustand vorliegt, ist der Strömungszustand an der Außenseite überkritisch – Dadurch entsteht eine Kraftwirkung vom Drehzentrum weg, in Richtung der Fliehkraft des Modells.

1 Einleitung

Das Phänomen der Strömungsablösung lässt sich bei vielen technischen Anwendungen, an umströmten Bauwerken und in der Natur beobachten. Es entwickeln sich infolge von

Ablösungen lokale, zum Teil großräumige Strömungsstrukturen, die einen bedeutenden Einfluss auf das gesamte Strömungsfeld haben und somit die Kraft-, Energie-, Wärme- und Stoffübertragungsverhältnisse an den entsprechenden Konfigurationen nachhaltig verändern.

Grundlegende experimentelle Untersuchungen zu den Zusammenhängen von Strömungsablösung und der Bewegung unter dem Einfluss der Bahnkrümmung stehen im Mittelpunkt dieses Beitrages. Als Modell mit einer einfachen Geometrie wird ein Kreiszyylinderstumpf auf einer Bahn mit konstanter Krümmung geschleppt und das Strömungsfeld mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie vermessen. Durch systematische Variation der Parameter Reynoldszahl und Bahnradius werden allgemeine und vergleichbare Aussagen zur Charakterisierung der Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines Zylinderstumpfes gewonnen. Die Durchführung der Versuche im Bereich der kritischen Reynoldszahl gibt einen Einblick in die Vorgänge beim Übergang von der laminaren zur turbulenten Grenzschichtablösung.

2 Versuchsbeschreibung

Im Rundlaufkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik wird ein Kreiszyylinderstumpf mit einer Endscheibe und einer frei umströmten Endfläche auf einer Kreisbahn R/D bei unterschiedlichen Reynoldszahlen Re geschleppt (vgl. Abb. 1, Tab. 1). Für diese Konfiguration lassen sich neben der Reynoldszahl Re , die das Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskräften beschreibt, weitere charakteristische dimensionslose Kennzahlen definieren. Die Rossbyzahl Ro stellt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Zentrifugalkraft dar und die Ekmanzahl Ek das Verhältnis zwischen Reibungs- und Zentrifugalkraft. Weiterhin bezeichnet der Scherparameter G das Geschwindigkeitsprofil der Anströmung, das aus der Kreisbewegung folgt. Vergleichend dazu wird ein ähnlicher Zylinderstumpf im Windkanal des Lehrstuhls bei gleichen Reynoldszahlen angeströmt, um eine Anströmung mit $R/D = \infty$ zu realisieren (vgl. Tab. 1). Die

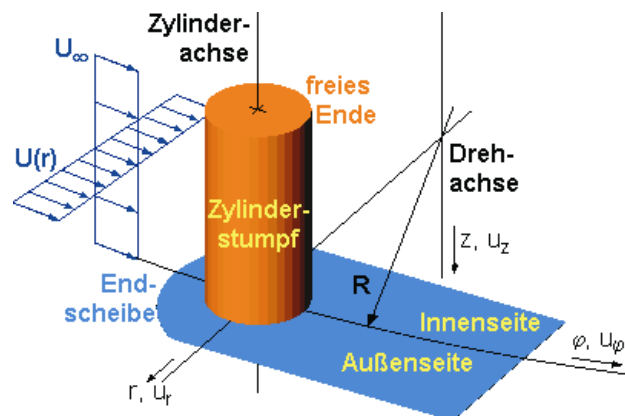


Abb. 1: Definition der Koordinatenrichtungen

Tab. 1: Zusammenfassung der Versuchsparameter

Parameter		Rundlaufkanal			Windkanal			
Versuchsparameter	Durchmesser	D	0,500 m			0,120 m		
	Länge	L	2,0 D			2,0 D		
	Versperrungsverhältnis	b	≈ 3%			≈ 7%		
	Bahnradius	R	14 D			∞		
	Reynoldszahl	Re	$2,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$	$-5,0 \cdot 10^5$
	Geschwindigkeit	U_∞	0,4 m/s	0,6 m/s	1,0 m/s	26,0 m/s	39,0 m/s	-65,0 m/s
	Winkelgeschwindigkeit	Ω	$0,058 \text{ s}^{-1}$	$0,087 \text{ s}^{-1}$	$0,144 \text{ s}^{-1}$	$0,000 \text{ s}^{-1}$		
	Scherparameter	G	7,14 %			0,00 %		
	Ekmanzahl	Ek	$7,00 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-5}$	∞		
	Rosbyzahl	Ro	14,0			∞		

komplexen dreidimensionalen Geschwindigkeits- und Turbulenzstrukturen im Ablöse- und nahen Nachlaufbereich werden mit einem dreikanaligen Laser-Doppler-System vermessen und die Druckverteilung auf dem Zylindermantel mit Hilfe einer zehnkanaligen Druckmesstechnik bestimmt.

3 Ergebnisse

Abhängig von der Reynoldszahl Re bilden sich charakteristische Strömungszustände (unter-, überkritisch oder transitional) mit markanten Strukturen im Zylinderstumpfnachlauf aus [1], [6], [7]. Es entsteht eine starke Interaktion zwischen der Umströmung des Kreiszyllindermantels sowie der Umströmung seines freien Endes. Daraus entspringen verschiedene Wirbelsysteme, die miteinander in Wechselwirkung stehen [3], [4], [5].

3.1 Unterkritische Wirbelstruktur ($Re = 2 \cdot 10^5$)

Aufgrund der seitlichen Umströmung sowie der Druckdifferenz zwischen Ablösegebiet und Außenströmung entsteht ein Wirbelsystem um die z-Achse mit gegenläufigem Drehsinn, welches einer Wirbelstraße entspricht. Seine Intensität wird durch die Wirbelstärke ω_z repräsentiert und spiegelt die Interaktion der Hauptströmungs- und der Querkomponente des Geschwindigkeitsvektors wider. Dieses System ist typisch für zylindrische Körper und ist bei Anströmung ohne Scherung ($R/D = \infty$) bezüglich der Ebene $y = 0$ im zeitlichen Mittel beeindruckend symmetrisch (vgl. Abb. 2a, 5a: grüne Wirbelachsen). Bei der Bewegung auf einer Kreisbahn wird die dreidimensionale Isofläche $\omega_z = \pm 1,0 U_\infty/D$ dieses Wirbelsystems an der Innenseite flacher und schmaler als an der Außenseite. Seine maximale Länge unterscheidet sich an beiden Seiten nur geringfügig (vgl. Abb. 2b, 5b: grüne Wirbelachsen) und ist ungefähr so lang wie im Fall ohne Bahnkrümmung.

Die Wirbelstärkekomponente ω_y bzw. ω_r spiegelt die Interaktion der Hauptströmungs- und der Vertikalkomponente des Geschwindigkeitsvektors wider und repräsentiert einen Wirbel um die y- bzw. r-Achse. Dieser Wirbel im Ablösegebiet entsteht durch die Überströmung im Kopfbereich des Zylinderstumpfes und ist im Fall der Anströmung ohne Bahnkrümmung ($R/D = \infty$) symmetrisch zur x-Achse (vgl. Abb. 3a, 5a: rote Wirbelachse). Die dreidimensionale Isofläche der radialen Komponente der Wirbelstärke $\omega_r = -0,75 U_\infty/D$ zeigt bei einer Kreisbewegung des Zylinderstumpfes an der Außenseite eine deutlich größere Länge in φ -Richtung als an der Innenseite (vgl. Abb. 3b, 5b: rote Wirbelachse). Zudem ist deren vertikale Ausdehnung an der Außenseite kleiner als an der Innenseite und ihr Maximum zur Innenseite verschoben.

Im Kopfbereich des Zylinderstumpfes entstehen am Übergang der Umströmung des freien Endes und der Mantelfläche durch eine Ausgleichsströmung, welche aufgrund des Druckunterschiedes zwischen der Endfläche (geringerer Druck) und der Mantelfläche (höherer Druck) induziert wird, zwei entgegengesetzt drehende Kopfwirbel um die x- bzw. φ -Achse. Dieses Wirbelpaar folgt der Grenze des Rückstromgebietes bis zur Endscheibe hin und verläuft anschließend stromab entlang der Endscheibe. Die Wirbelstärkekomponente ω_x bzw. ω_φ repräsentiert dieses Wirbelsystem (vgl. Abb. 4, 5: blaue Wirbelachsen) und spiegelt die Interaktion der Quer- und der Vertikalkomponente des Geschwindigkeitsvektors wider. Es verursacht die im Rückstromgebiet auftretende charakteristische Talstruktur (vgl. Abb. 5: graue Isofläche). Bei Anströmung ohne Scherung ist dieses Wirbelsystem symmetrisch bezüglich der Ebene $y = 0$ (vgl. Abb. 4a). Unter dem Einfluss der Bahnkrümmung ist die φ -Komponente des Wirbelstärkevektors mit dem Wert $\omega_\varphi = \pm 0,25 U_\infty/D$ an der Innenseite in radialer Richtung schmaler als an der Außenseite (vgl. Abb. 4b).

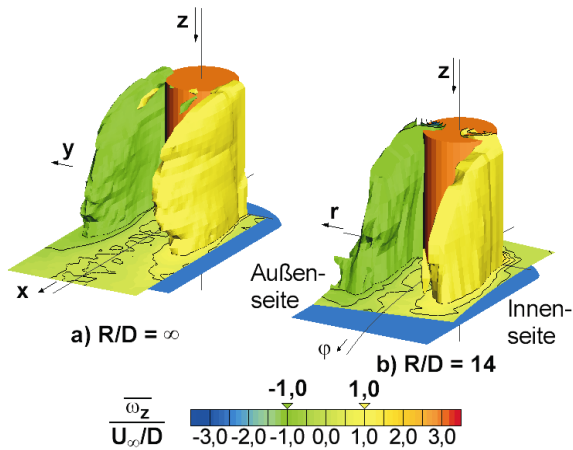


Abb. 2: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_z} = \pm 1,0 U_\infty/D$ für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

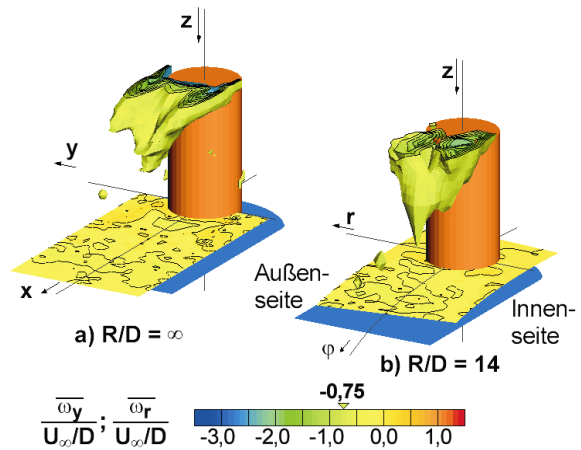


Abb. 3: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_y} = -0,75 U_\infty/D$ bzw. $\overline{\omega_r} = -0,75 U_\infty/D$ für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

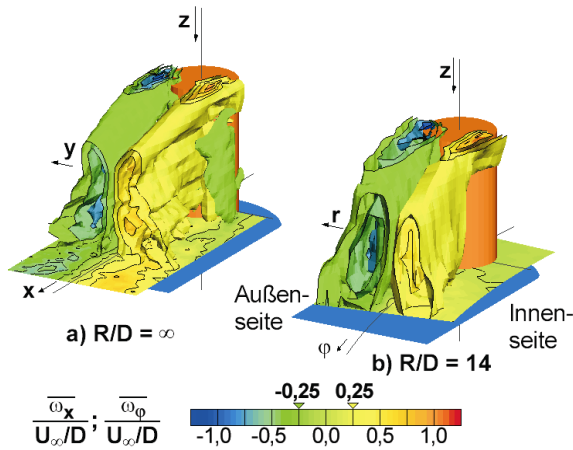


Abb. 4: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_x} = \pm 0,25 U_\infty/D$ bzw. $\overline{\omega_\phi} = \pm 0,25 U_\infty/D$ für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

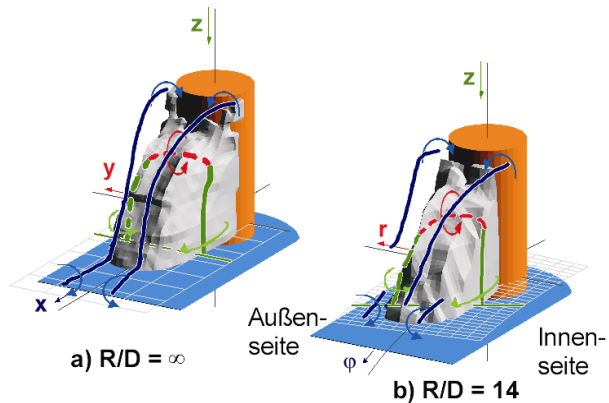


Abb. 5: Modell der Strömungstopologie für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

3.2 Überkritische Wirbelstruktur ($Re = 5 \cdot 10^5$)

Die im unterkritischen Fall beschriebenen, sich gegenseitig beeinflussenden Wirbelsysteme sind auch im überkritischen Fall wiederzufinden. Die Wirbelstärke ω_z repräsentiert wiederum das für zylindrische Körper typische Wirbelsystem um die z-Achse mit gegenläufigem Drehsinn. Die Kontur der Isofläche $\omega_z = \pm 1,0 U_\infty/D$ dieses Wirbelsystems verläuft seitlich entlang des Ablösegebietes und auf die Mittelfläche $r = R$ zu. Im Vergleich mit dem unterkritischen Strömungszustand ist sie deutlich kürzer (vgl. Abb. 6b, 9b).

Der Wirbel um die r-Achse, der durch die Überströmung im Kopfbereich des Zylinderstumpfes entsteht, zeigt sich in der Wirbelstärkekomponente ω_r . Im Gegensatz zur unterkritischen Anströmung des Zylinderstumpfes auf einer Kreisbahn besitzt die dreidimensionale Isofläche dieser Komponente $\omega_r = -0,75 U_\infty/D$ an der Innenseite eine größere Länge in ϕ -Richtung als an der Außenseite. Außerdem unterscheidet sich deren vertikale Ausdehnung an der Außenseite kaum von der Innenseite. Das Maximum ist leicht zur Innenseite hin verschoben (vgl. Abb. 7b, 9b).

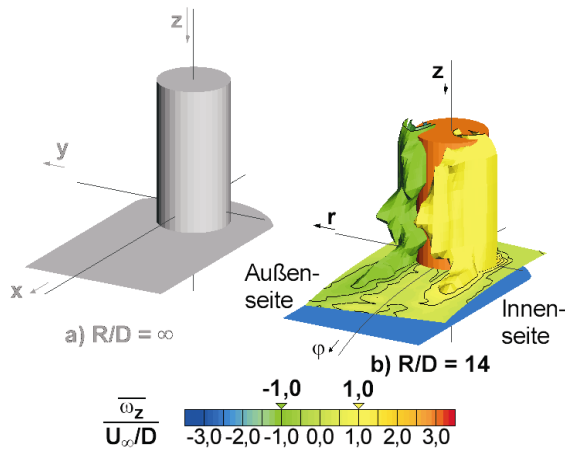


Abb. 6: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_z} = \pm 1,0 U_\infty/D$ für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

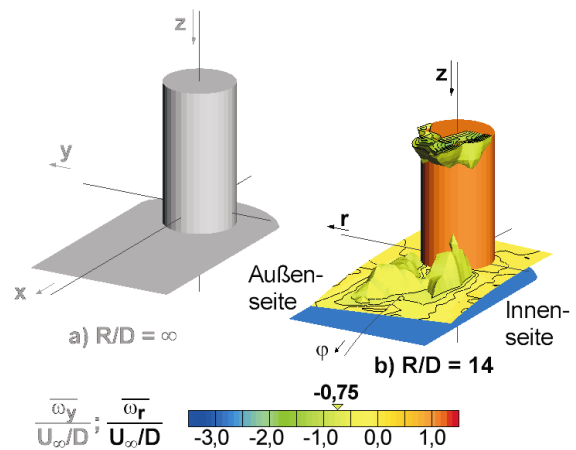


Abb. 7: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_r} = -0,75 U_\infty/D$ für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

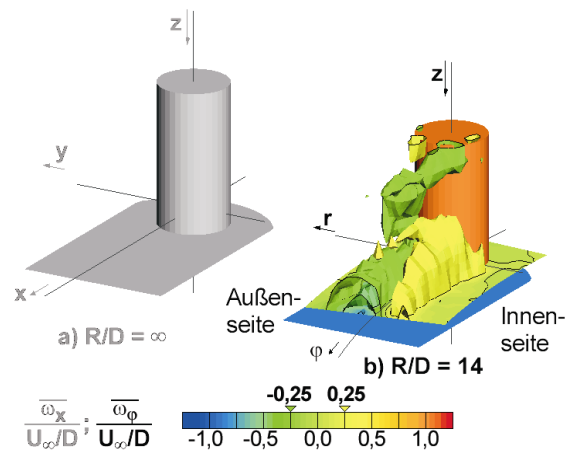


Abb. 8: Wirbelstärkekomponente
 $\overline{\omega_\phi} = \pm 0,25 U_\infty/D$ für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

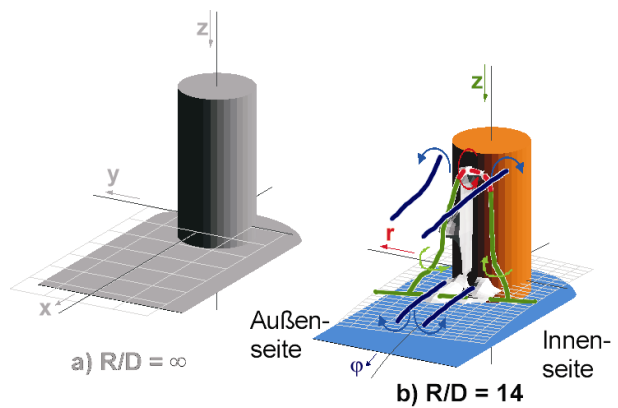


Abb. 9: Modell der Strömungstopologie für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

Auch im überkritischen Fall sind die entgegengesetzt drehenden Kopfwirbel am freien Ende des Zylinderstumpfes zu entdecken. Allerdings gibt es markante Unterschiede zum unterkritischen Strömungszustand. Der Entstehungsort der Kopfwirbel verlagert sich stromab sowie in Richtung der Mittelfläche $r = R$. Aufgrund des sehr kleinen Rückstromgebietes können die Kopfwirbel diesem nicht mehr folgen und reißen ab. Außerdem ist die Drehrichtung der Kopfwirbel entgegen der bei unterkritischer Anströmung, was auf eine veränderte Druckverteilung im Kopfbereich des Zylinderstumpfes zurückzuführen ist. Die Grenzschicht liegt aufgrund ihres turbulenten Charakters länger am Zylindermantel an und somit entsteht im seitlichen Bereich ein großer Unterdruck. Dieser Wanddruck ist kleiner als der Druck auf der Endfläche des Zylinders, welcher im Vergleich mit dem unterkritischen Fall nahezu konstant bleibt. Dadurch wird eine Ausgleichsströmung induziert, welche den Drehsinn des Kopfwirbelpaars bestimmt. Im Bereich des größten Zylinderquerschnitts deutet sich am freien Ende ein weiteres Wirbelsystem an, das im Drehsinn mit den Kopfwirbeln im unterkritischen Fall vergleichbar ist (vgl. Abb. 8b, 9b).

Beim Betrachten des Rückstromgebietes und der Wirbelstärkekomponenten des überkritischen Strömungszustandes fallen in der Nähe der Endscheibe charakteristische Strukturen auf (vgl. Abb. 6b – 9b). In allen Darstellungen stimmen deren Lage und Form weitgehend überein. In diesem Gebiet kommt es zu einer starken Wechselwirkung zwischen

der seitlichen Umströmung des Zylinderstumpfes und der Überströmung des freien Endes. Die Strömung über das freie Ende trifft in diesem Bereich auf die Endscheibe und wird dort allseitig umgelenkt. Aus der Umlenkung nach den Seiten folgt die Wirbelstärke-komponente ω_φ und aus der seitlichen Umströmung die Komponente ω_z . Aus der Überlagerung dieser beiden Komponenten des Wirbelstärkevektors und der Umlenkung in Richtung des Zylinderstumpfes ergibt sich dessen dritte Komponente ω_r sowie die Gestalt des Rückstromgebietes. Es bildet sich im Nachlauf des Zylinderstumpfes eine sehr komplexe, dreidimensionale Strömungsstruktur oberhalb der Endscheibe aus, welche in dieser ausgeprägten Form beim unterkritischen Strömungszustand nicht wiederzufinden ist.

3.3 Transitionale Wirbelstruktur ($Re = 3 \cdot 10^5$)

Im Transitionsbereich, dem Übergang zwischen unter- und überkritischen Strömungszustand, hängen die Strukturen stark von den Parametern der Strömung ab. Die untersuchte Konfiguration ohne Bahnkrümmungseinfluss zeigt symmetrische Strömungsstrukturen¹, welche mit dem unterkritischen Strömungszustand vergleichbar sind (vgl. Abb. 10a – 13a).

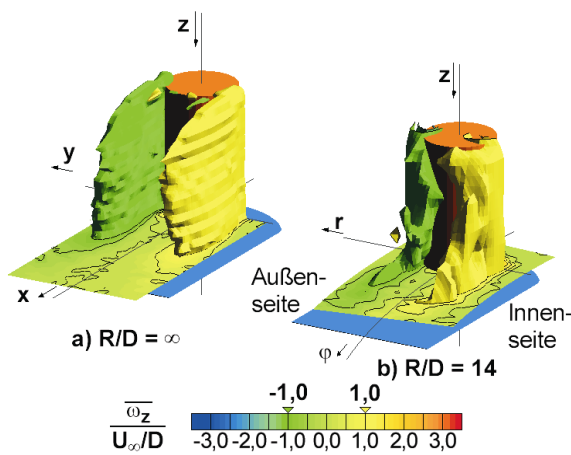


Abb. 10: Wirbelstärkekomponente $\overline{\omega_z} = \pm 1,0 U_\infty/D$ für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

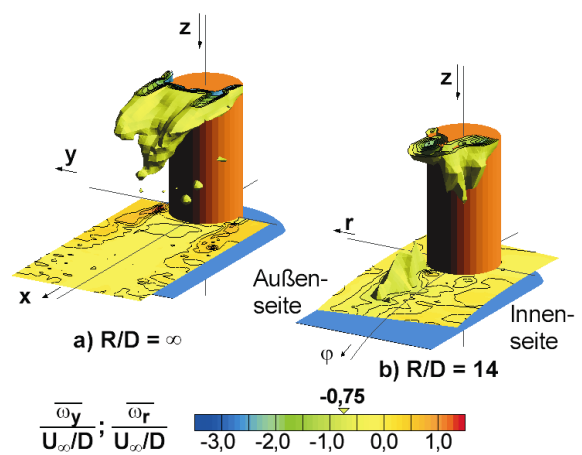


Abb. 11: Wirbelstärkekomponente $\overline{\omega_y} = -0,75 U_\infty/D$ bzw. $\overline{\omega_r} = -0,75 U_\infty/D$ für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

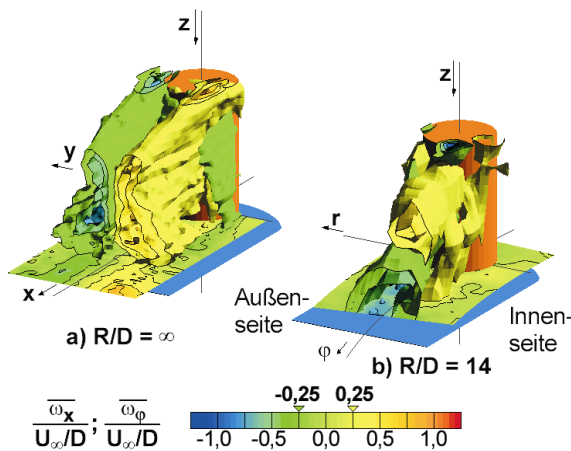


Abb. 12: Wirbelstärkekomponente $\overline{\omega_x} = \pm 0,25 U_\infty/D$ bzw. $\overline{\omega_\varphi} = \pm 0,25 U_\infty/D$ für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

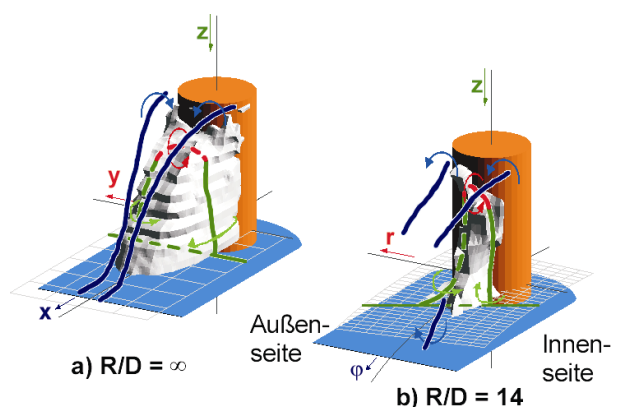


Abb. 13: Modell der Strömungstopologie für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

Bei der Bewegung des Zylinderstumpfes auf einer Kreisbahn beeinflusst das Scherprofil der Anströmung die Zustände der Strömung an der Innen- und Außenseite nachhaltig. Die vorliegende Asymmetrie der Strömungsstrukturen äußert sich nicht nur in deren Gestalt und Lage der Extremwerte, sondern auch in deren Qualität. Während an der Innenseite die typischen Strömungsstrukturen des unterkritischen Bereiches zu beobachten sind, besitzen die Strukturen der Außenseite Eigenschaften des überkritischen Strömungszustands (vgl. Abb. 10b – 13b). Die turbulente Grenzschicht der Außenseite kann der Kontur des Zylinderstumpfes besser folgen als die laminare Grenzschicht der Innenseite. Dadurch kommt es zu einem starken Durchströmen der Mittelfläche $r = R$ und die sich im unter- bzw. überkritischen Fall entlang dieser Mittelfläche ausgebildeten Strömungsstrukturen werden erheblich deformiert und gestört. Besonders deutlich ist dies in der Komponente ω_ϕ des Wirbelstärkevektors zu erkennen. Im Bereich über der Endscheibe dominiert das komplexe Wirbelsystem aus dem überkritischen Strömungszustand der Außenseite, das sich weiter stromab über die Mittelfläche $r = R$ ausbreitet. Dagegen ist an der Innenseite der Kopfwirbel maßgebend, welcher der Kreisbahn folgt. Beide Wirbelsysteme werden aufgrund des Durchströmen der Mittelfläche $r = R$ von außen nach innen bei $z = -1,0 D$ verstärkt. Bemerkenswert ist der gleiche Drehsinn des Kopfwirbelpaares, der aus den veränderten Druckverhältnissen der Außen- und Innenseite resultiert. Weiterhin bildet sich hinter dem Zylinderstumpf an der Innenseite ein großräumiger Wirbel aus der Überströmung des freien Endes, dessen Achse schräg zur Radiusrichtung verläuft.

3.4 Zeitlich gemittelte Strömungskräfte

Aufgrund der Körperumströmung wirken Kräfte auf den Zylinderstumpf. Die Kraftwirkung in Hauptströmungsrichtung wird als Widerstand bezeichnet und senkrecht dazu als Auftrieb. Da im untersuchten Reynoldszahlbereich der Reibungsanteil dieser Kräfte gegenüber dem Druckanteil klein ist, ist es möglich, die Charakteristik dieser Kräfte betreffs der Reynoldszahl aus einer Integration der Druckverteilung über den Zylindermantel zu bestimmen. Der Widerstandsbeiwert c_W und der Auftriebsbeiwert c_A dienen zur dimensionslosen Darstellung dieser Kräfte [5].

Bereits 1922 verglich Wieselsberger die Widerstandsbeiwerte eines unendlich langen Kreiszyinders (vgl. Abb. 14, grüne Kurve) mit einem Zylinderstumpf (vgl. Abb. 14, rote Kurve) im Windkanal. Wieselsberger stellte fest: *„Der Hauptunterschied zwischen beiden Kurven liegt in dem niedrigeren Werte der Widerstandszahlen beim endlichen Zylinder. Dieser hängt offenbar damit zusammen, daß bei endlicher Zylinderlänge in das Wirbelgebiet unmittelbar hinter dem Zylinder von den Stirnflächen her Luft zuströmen kann, die die Druckverteilung um den Zylinder wesentlich verändert. ... Die Einzelheiten dieses Vorganges bedürfen jedoch noch näherer Untersuchung. Nach Überschreiten der kritischen Reynolds'schen Zahl scheint sich der Unterschied in der Widerstandzahl mehr auszugleichen, doch lassen sich hier wegen der Begrenztheit des Messbereiches nach oben hin sichere Feststellungen nicht machen.“* ([6] S. 220)

Obwohl in der Versuchskonfiguration einige Unterschiede zu verzeichnen sind – Wieselsbergers Zylinderstümpfe besaßen zwei freie Enden und wurden nicht von einem Scherprofil bzw. einer Bahnkrümmung beeinflusst – bestätigen die gewonnenen Ergebnisse Wieselsbergers Aussage. Zudem konnten mittels optimaler Versuchstechnik detaillierte Informationen zu den sich einstellenden charakteristischen Strömungsstrukturen gewonnen werden. Das Überströmen des freien Zylinderstumpfendes beeinflusst besonders im Kopfbereich die Druckverteilung und das Rückstromgebiet [5]. Dadurch wird im unterkritischen Bereich der Widerstandsbeiwert auf $c_W \approx 0,8$ gegenüber $c_W \approx 1,2$ beim unendlich langen Zylinder reduziert. Der Einsatz der Endscheibe am anderen Modellende verhindert ein

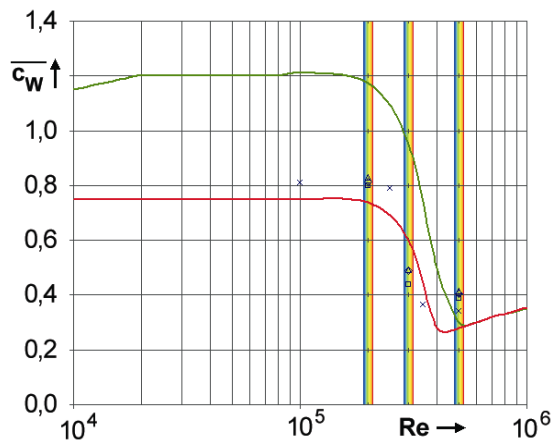


Abb. 14: Widerstandsbeiwert c_w
 — Wieselsberger (1922, $L/D=\infty$)
 — Wieselsberger (1922, $L/D=5$)
 × Richter (1996, $L/D=2$, $R/D=15$)
 ◇ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=12$)
 △ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=14$)
 □ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=16$)
 Scherprofil über den Zylinderquerschnitt

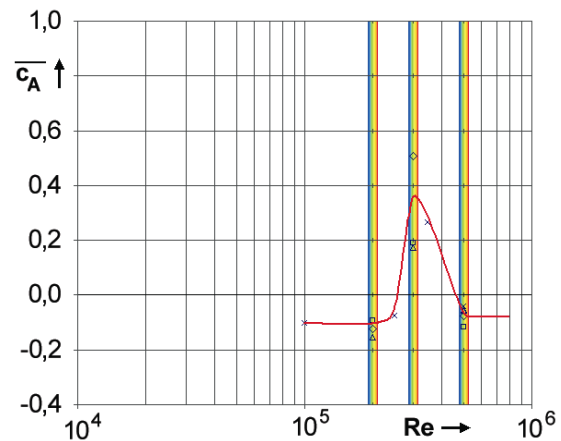


Abb. 15: Auftriebsbeiwert c_A
 × Richter (1996, $L/D=2$, $R/D=15$)
 ◇ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=12$)
 △ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=14$)
 □ Richter (2004, $L/D=2$, $R/D=16$)
 Scherprofil über den Zylinderquerschnitt

stärkeres Absinken des Widerstandsbeiwertes. Im Bereich der kritischen Reynoldszahl fällt der Widerstandsbeiwert aufgrund der Änderung des Strömungszustandes innerhalb der Grenzschicht stark ab. Die eingetragene Spanne des Scherprofils (vgl. Abb. 14; blau entspricht der lokalen Reynoldszahl an der Innenseite, rot an der Außenseite) zeigt, wie empfindlich die Strömungszustände an den Modellseiten auf kleine Änderungen der lokalen Reynoldszahl reagieren. Der Einfluss des freien Endes auf den Widerstandsbeiwert verschwindet im überkritischen Bereich, da das Ablösegebiet sehr klein ist und die Überströmung des freien Endes sich kaum auf dessen Geometrie auswirkt [5].

Im allgemeinen treten bei Zylinderumströmungen ohne Einfluss von Scherprofil bzw. Bahnkrümmung im zeitlichen Mittel keine Querkräfte¹ auf. Somit sind die Auftriebsbeiwerte $\overline{c_A} = 0$. Unter Berücksichtigung der Parameter Scherprofil und Bahnkrümmung bilden sich an der Innen- und Außenseite unterschiedliche Druckverteilungen aus [5]. Daraus folgt eine Kraftwirkung quer zur Hauptströmrichtung, welche besonders durch die Kombinationen der Strömungszustände der beiden Modellseiten beeinflusst wird (vgl. Abb. 15). Bei gleichartigen Strömungszuständen an der Innen- und Außenseite, wie es bei unter- und überkritischen Reynoldszahlen der Fall ist, entsteht eine Kraftwirkung zum Drehzentrum hin, entgegen der Fliehkraft des Modells. Grund dafür ist der Wanddruck, der an der Innenseite wegen größerer Beschleunigungen aufgrund stärkerer Richtungsänderung geringfügig kleiner ist als an der Außenseite. Im Transitionsbereich treten an der Innen- und Außenseite unterschiedliche Strömungszustände auf. Während an der Innenseite ein unterkritischer Strömungszustand (Ablösung der laminaren Grenzschicht bei ca. 80°) mit einem kleinen Niederdruckgebiet vorliegt, ist der Strömungszustand an der Außenseite überkritisch. Hier liegt die turbulente Grenzschicht länger an (Ablösung bei ca. 120°), das Unterdruckgebiet entlang des Zylindermantels ist somit stärker ausgedehnt und der Druck deutlich geringer. Dadurch entsteht eine Kraftwirkung vom Drehzentrum weg, in Richtung der Fliehkraft des Modells. Der Betrag des Auftriebsbeiwertes $\left| \overline{c_A} \right| > 0,2$ ist in diesem Fall größer als bei gleichartigen Strömungszuständen $\left| \overline{c_A} \right| \approx 0,1$, da bei unterschiedlichen Strömungs-

¹ Im transitionalen Bereich können auch bei einer Anströmung ohne Scherprofil ($R/D = \infty$) asymmetrische Strömungsstrukturen und somit Querkräfte auftreten [1], [7].

zuständen der Druckunterschied zwischen der Innen- und Außenseite stärker ausgeprägt ist [5] (vgl. Abb. 15).

Literatur

- [1] Leder, A.: Abgelöste Strömungen: physikalische Grundlagen; Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1992
- [2] Leder, A.: 3D-flow structures behind truncated circular cylinders; Proceedings of FEDSM'03, 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, Honolulu, USA, 2003
- [3] Richter, F.; Leder, A.: Charakteristische Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines auf einer Kreisbahn geschleppten Zylinderstumpfes bei unterkritischer Reynoldszahl; in: Dopheide, D.; Müller, H.; Strunck, V.; Ruck, B.; Leder, A. (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 11. Fachtagung der GALA e.V. 2003, PTB Braunschweig, S. 18.1-18.6, 2003
- [4] Richter, F.; Leder, A.: Dreidimensionale Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines Kreiszyylinderstumpfes; in: Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 12. Fachtagung der GALA e.V. 2004, GALA e.V. Karlsruhe, S. 14.1-14.9, 2004
- [5] Richter, F.: Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung der Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines Kreiszyylinderstumpfes unter Berücksichtigung der Zentrifugalbeschleunigung; Dissertation, Universität Rostock, Verlagshaus Monsenstein und Wannerdat, Münster, 2005
- [6] Wieselsberger, C.: Weitere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes; in Physikalische Zeitschrift 23; Hirzel, Leipzig, 1922
- [7] Zdravkovich, M. M.: Flow around circular cylinders Vol. 1: Fundamentals; Oxford University Press, Oxford, New York, Tokyo, 1997