

DREIDIMENSIONALE STRÖMUNGS- UND TURBULENZ-STRUKTUREN IM NACHLAUF EINES KREISZYLINDERSTUMPFES

F. Richter, A. Leder

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

Abstract

Die sich überlagernden Einflüsse von Zentrifugalbeschleunigung und Geschwindigkeitsscherung auf die sich im Ablösegebiet und Nachlauf ausbildenden Strömungsstrukturen eines manövrierenden Körpers sind noch weitgehend unbekannt. Als Modell mit einfacher Geometrie wird im Rahmen dieser Untersuchungen ein Kreiszylinderstumpf ($L/D = 2$) auf verschiedenen Kreisbahnen ($R/D = 12, 14, 16, \infty$) geschleppt, um durch systematische Parametervariationen allgemeine und vergleichbare Aussagen zum Einfluss von Zentrifugalbeschleunigung und Geschwindigkeitsscherung zu erhalten. Die experimentellen Untersuchungen im kritischen Bereich der Reynoldszahl ($Re_{krit.} \approx 3 \cdot 10^5$) dienen zur Charakterisierung der komplexen dreidimensionalen Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines Zylinderstumpfes beim Übergang von laminarer zu turbulenter Grenzschichtablösung. Neben Messungen der Wanddruckverteilungen zur Ermittlung von Auftriebs- und Widerstandsbeiwerten werden die Geschwindigkeits- und Turbulenzstrukturen im Ablöse- und nahen Nachlaufbereich mit einem dreikanaligen Laser-Doppler-System vermessen.

Die Reynoldszahl Re stellt einen bedeutenden Parameter für die Umströmung eines Kreis-zylinderstumpfes dar und dient zur Beschreibung der verschiedenen Grenzschichtzustände. Abhängig vom Grenzschichtzustand (unter-, überkritisch oder transitional) bilden sich markante Strukturen im Geschwindigkeitsfeld und in der Wirbelstärke aus, die mit den gemessenen Wanddruckverteilungen korrelieren.

So bildet sich im Kopfbereich des Zylinderstumpfes am Übergang der Umströmung zwischen dem freien Ende und den Modellseiten ein gegenläufiges Wirbelpaar aus, dessen Drehsinn vom Grenzschichtzustand abhängt. Im unterkritischen Reynoldszahlbereich ist der Druck auf die Endfläche geringer als der Druck auf die linke und rechte Mantelfläche des Zylinderstumpfes. Dadurch erhalten die beiden Kopfwirbel eine Drehrichtung derart, dass zwischen den beiden Kopfwirbeln die Strömung zum Rückstromgebiet gerichtet ist. Dies führt zu einer charakteristischen „Talstruktur“ des Rückstromgebietes. Bei überkritischen Reynoldszahlen weist das gegenläufige Kopfwirbelpaar einen umgekehrten Drehsinn gegenüber dem unterkritischen Strömungszustand auf. Dies wird durch eine starke Druckabsenkung im seitlichen Bereich induziert, da die Grenzschicht aufgrund ihres turbulenten Charakters länger am Zylindermantel anliegt. Der zugehörige Wanddruckbeiwert ist kleiner als der Druckbeiwert auf die Endfläche des Zylinders, welcher im Vergleich zum unterkritischen Fall nahezu gleich bleibt.

1 Versuchsbeschreibung

Das untersuchte Modell ist ein auf einer Endscheibe montierter Kreiszylinderstumpf mit einer Länge von $L/D = 2$ und einer ebenen Deckfläche am freien Ende (vgl. Abb. 1). Das freie Ende wird als „Kopfbereich“ und das gegenüberliegende Ende als „Fußbereich“ des Zylinderstumpfes bezeichnet. Die Endscheibe hat die Aufgabe, die Umströmung des Modellendes im „Fußbereich“ zu verhindern sowie im Rundlaufkanal den Einfluss der freien Wasseroberfläche zu minimieren. Sie ist so gestaltet, dass sich vor dem Zylinderstumpf nur eine Wandgrenzschicht mit geringer Dicke ausbilden kann und damit die Wirkung des Hufeisenwirbels gering bleibt.

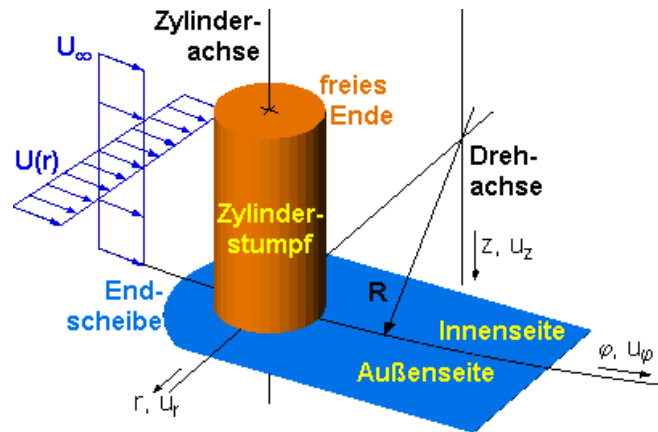


Abb. 1: Definition der Koordinatenrichtungen

Im Rundlaufkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik wird der Zylinderstumpf auf Kreisbahnen 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. Entsprechend dieser drei Ähnlichkeitskennzahlen ist bei den untersuchten Konfigurationen der Einfluss der Trägheitskraft größer als der Zentrifugalkrafteinfluss und beide dominieren gegenüber der Reibungskraft. Der Scherparameter G stellt für das Scherprofil $U(r)$ und die lokale Reynoldszahl $Re(r)$ einen Proportionalitätsfaktor dar, der die

Tab. 1: Zusammenfassung der Versuchsparameter (Parameter ... Basisgröße für die Kennzahlen)

Parameter		Rundlaufkanal			Windkanal			
Kanal	Fluid	Wasser			Luft			
	<u>Dichte</u>	ρ	1000,0 kg/m ³		1,2 kg/m ³			
	kinematische Viskosität	ν	1,01·10 ⁻⁶ m ² /s		15,58·10 ⁻⁶ m ² /s			
	dynamische Viskosität	μ	1,01·10 ⁻³ Pa·s		1,87·10 ⁻⁵ Pa·s			
	Turbulenzgrad	Tu	k. A.		0,4%			
Versuch	<u>Durchmesser</u>	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	2,0·10 ⁵	3,0·10 ⁵	5,0·10 ⁵	2,0·10 ⁵	3,0·10 ⁵	5,0·10 ⁵
	<u>Geschwindigkeit</u>	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 s ⁻¹	0,087 s ⁻¹	0,144 s ⁻¹	0,000 s ⁻¹		
	Scherparameter	G	7,14 %			0,00 %		
	Ekmanzahl	Ek	7,00·10 ⁻⁵	4,67·10 ⁻⁵	2,80·10 ⁻⁵	∞		
Rosbyzahl	Ro	14,0			∞			

Änderung dieser beiden Parameter über einen definierten Radiusbereich bezogen auf den Radius R/D der Bewegungsbahn des Modells angibt.

Um eine scherungsfreie Anströmung zu realisieren, wird ein geometrisch ähnlicher Zylinderstumpf im Windkanal ($R/D = \infty$) bei gleichen Reynoldszahlen angeströmt (vgl. Tab. 1). Beim unendlichen Bahnradius ($R/D = \infty$) ist das Geschwindigkeitsprofil $U(r)$ unabhängig von der Radiuskoordinate r und stellt somit eine parallele Anströmung ohne Geschwindigkeits-scherung dar. Dabei verschwindet der Einfluss der Zentrifugalkraft.

Das Strömungsfeld um den Kreiszyylinderstumpf wird mit einem dreikanaligen Laser-Doppler-System vermessen. Die Beschreibung der komplexen dreidimensionalen Geschwindigkeits- und Turbulenzstrukturen im Ablöse- und nahen Nachlaufbereich erfolgt mit Hilfe zeitlich gemittelter Größen. Dieser Beitrag beinhaltet die Beschreibung des zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfelds in Verbindung mit ausgewählten Turbulenzgrößen.

2 Ergebnisse

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

Eine charakteristische Strömungsstruktur im Zylinderstumpfnachlauf ist das Rückstromgebiet, welches zusammen mit der angrenzenden freien Scherschichtströmung das Ablösegebiet bildet [1]. Die Berandung des zeitlich gemittelten Rückstromgebiets stellen die Isoflächen $u_\varphi = 0$ bzw. $u_x = 0$ dar, das heißt, die x - bzw. φ -Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren sind außerhalb dieser Flächen positiv und innerhalb negativ.

Die wechselseitige Interaktion der Wirbelsysteme bewirkt im Nachlauf des Zylinderstumpfes neben der dreidimensionalen Strömungsstruktur auch eine komplexe Turbulenzstruktur. Im Vergleich mit dem Rückstromgebiet ist zu erkennen, dass erhöhte Werte der turbulenten kinetischen Energie $\overline{k} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ im zeitlichen Mittel entlang dessen Kontur auftreten. In diesem Bereich befinden sich die freien Scherschichten mit typischerweise starken Geschwindigkeitsgradienten. Die Amplitudenmaxima der Turbulenzstrukturen sind an den Stellen zu finden, an welchen die freien Scherschichten aufeinandertreffen und mit der Grenzschichtströmung der Endscheibe interagieren. Weiterhin illustrieren kleine Werte der turbulenten kinetischen Energie ($\overline{k} < 0,03 U_\infty^2$) das Entrainment turbulenzarmen Fluids der Außenströmung in das Ablösegebiet.

Im folgenden sollen die typischen Wirbelstrukturen anhand topologischer Modelle der zeitlich gemittelten Strömung erläutert, sowie deren Zusammenhang mit turbulenten Strukturen dargestellt werden. Die Strömungs- und Turbulenzstrukturen zeigen eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl, dem Scherprofil sowie der Bahnkrümmung. Daher wird in den folgenden Abschnitten zwischen dem unter- und überkritischen sowie dem transitionalen Bereich unterschieden.

2.1 Unterkritische Strömungs- und Turbulenzstruktur

Der unterkritische Bereich zeichnet sich durch ein großes Rückstromgebiet aus, das im Bereich der Symmetrieebene eine charakteristische Talstruktur besitzt (vgl. Abb. 2, graue Isofläche). Im Fußbereich besitzt das Rückstromgebiet seine maximale Ausdehnung ($x_R = 2,2 D$), die in Richtung des Zylinderkopfes wegen der Überströmung des freien Endes

abnimmt. Durch diesen Entrainmentprozess wird im Kopfbereich hinter dem Zylinderstumpf ein Wirbel um die y - bzw. r -Achse induziert (vgl. Abb. 2, rote Wirbelachse). Dieser Wirbel geht am Rand des Rückstromgebietes in ein Wirbelsystem um die z -Achse über. Dieses Wirbelsystem entsteht aus der seitlichen Umströmung des Zylinders und ist durch ein gegenläufiges Wirbelpaar gekennzeichnet. Es ist typisch für zylindrische Körper und stellt durch seine instabilen Eigenschaften die Quelle einer Wirbelstraße dar (vgl. Abb. 2, grüne Wirbelachsen). Im Kopfbereich des Zylinderstumpfes entstehen am Übergang der Umströmung zwischen dem freien Ende und den Modellseiten Ausgleichsströmungen, welche aufgrund des Druckunterschiedes zwischen der Endfläche (geringerer Druck) sowie der linken und rechten Mantelfläche (höherer Druck) induziert werden. Dabei bilden sich zwei entgegengesetzt drehende Kopfwirbel um die x - bzw. φ -Achse. Dieses Wirbelpaar folgt der Berandung des Rückstromgebietes bis zur Endscheibe hin. Am Ende des Rückstromgebietes werden diese Kopfwirbel durch die Endscheibe in Strömungsrichtung abgelenkt und vereinigen sich mit einem schwach ausgeprägten Bodenwirbelsystem (vgl. Abb. 2, blaue Wirbelachsen). Der Ursprung dieses Bodenwirbelsystems ist im Hufeisenwirbel zu suchen, der aus der Wechselwirkung zwischen Staupunktströmung am Zylinderstumpf und Plattengrenzschicht der Endscheibe vor dem Modell entsteht. Die seitliche Ablenkung des auf die Endscheibe auftreffenden Fluids bewirkt eine Verstärkung des so entstandenen Wirbelsystems. Zwischen den beiden Kopfwirbeln ist die Strömung zum Rückstromgebiet gerichtet, was zu einem zusätzlichen Entrainment entlang der Mittelfläche und somit zur charakteristischen Talstruktur des Rückstromgebietes führt [2].

Der Einfluss des Scherprofils und der Bahnkrümmung auf das Strömungsmodell zeigt sich in Asymmetrien der oben beschriebenen Strukturen, die sich weitgehend entlang der Mittelfläche $r = R$ orientieren. Ein ausgezeichnetes Merkmal stellt das Rückstromgebiet dar, das in diesem Fall an der Innenseite kürzer und flacher ist. Weiterhin verläuft das Wirbelsystem, gebildet aus den Wirbeln um die r - und z -Achse, nicht mehr parallel zum Radiusstrahl. Der

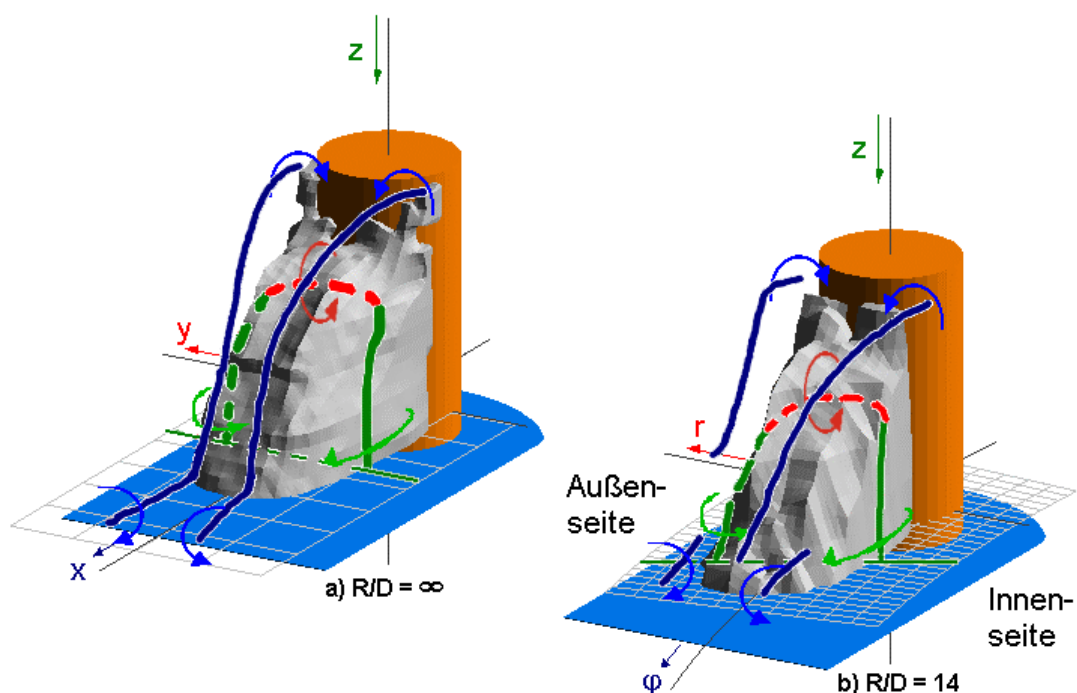


Abb. 2: Topologiemodell der Strömungsstruktur für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

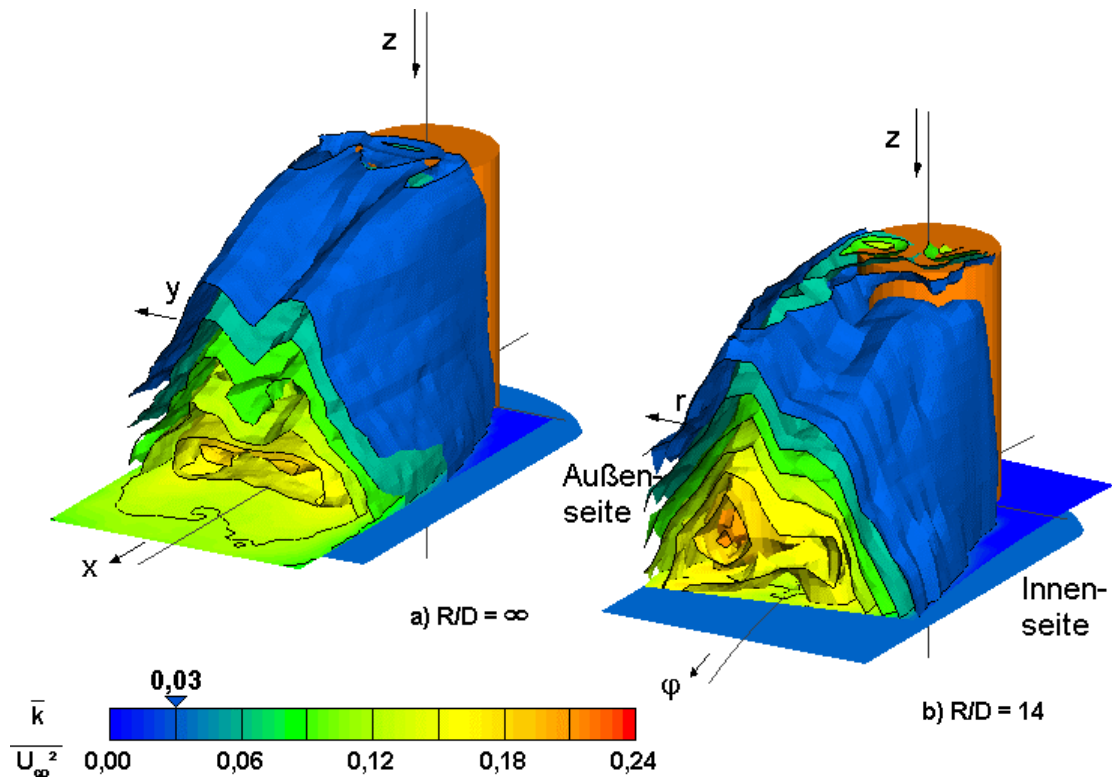


Abb. 3: Turbulente kinetische Energie \bar{k} für den unterkritischen Bereich ($Re = 2 \cdot 10^5$)

Fußpunkt dieses Systems liegt an der Außenseite deutlich weiter stromab als an der Innenseite (vgl. Abb. 2b).

Die Turbulenzstrukturen sind beim unterkritischen Strömungszustand entsprechend dem Rückstromgebiet breit und lang. Ohne Geschwindigkeitsscherung bildet sich eine sehr symmetrische Struktur aus. Während sich an den Seiten eine Ausbreitung der freien Scherschichten abzeichnet, entsteht durch das Überströmen des freien Endes im Zusammenhang mit den beiden Kopfwirbeln die charakteristische Talstruktur. Sie spiegelt den oben beschriebenen Entrainmentprozess wider. Unter Berücksichtigung dieser Talstruktur liegen die Maxima ($\bar{k} \approx 0,20 U_\infty^2$) dort, wo die freien Scherschichten der seitlichen Umströmung und dem Überströmen des freien Endes aufeinander treffen (vgl. Abb. 3).

Unter dem Einfluss der Bahnkrümmung werden die Turbulenzstrukturen deformiert und asymmetrisch. Diese Deformation zeigt sich in der Ausdehnung der Isoflächen der turbulenten kinetischen Energie (vgl. Abb. 3b). An der Innenseite sind diese Flächen in vertikaler Richtung flacher und in horizontaler Richtung schmaler als an der Außenseite. Außerdem beginnen sie außen schon in geringerer Entfernung hinter dem Zylinderstumpf. Hier treten aufgrund des Scherprofils der Anströmung lokal etwas größere Reynoldszahlen auf, wodurch die laminar – turbulente Transition in der freien Scherschichtströmung früher einsetzt. Weiterhin befindet sich an der Außenseite ein Hauptmaximum ($\bar{k} \approx 0,24 U_\infty^2$) und an der Innenseite ein Nebenmaximum ($\bar{k} \approx 0,20 U_\infty^2$).

2.2 Überkritische Strömungs- und Turbulenzstruktur

Im überkritischen Bereich sind die beschriebenen Strömungsstrukturen ebenfalls zu finden. Allerdings unterscheidet sich ihre Charakteristik im Vergleich zu dem unterkritischen Strömungszustand. Der Einfluss der seitlichen Umströmung überwiegt dem der

Überströmung im Kopfbereich. Dadurch zeigt das Rückstromgebiet kaum noch eine Abhängigkeit von der vertikalen Koordinatenrichtung und ist deutlich kürzer und schmaler (vgl. Abb. 4b, graue Isofläche). Das hat ferner Auswirkungen auf das Wirbelsystem um die r - und die z -Achse. Der durch das Entrainment im Kopfbereich induzierte Wirbel um die r -Achse (vgl. Abb. 4b, rote Wirbelachse) befindet sich dichter am freien Modellende und der Abstand zwischen dem Wirbelpaar in z -Richtung ist enger (vgl. Abb. 4b, grüne Wirbelachse). Die beiden gegenläufigen Kopfwirbel weisen gegenüber dem unterkritischen Strömungszustand einem umgekehrten Drehsinn auf. Das ist auf die veränderte Druckdifferenz zwischen der Kopf- und der Mantelfläche des Zylinderstumpfes zurückzuführen: im seitlichen Bereich sinkt der Druck stark ab, da die Grenzschicht aufgrund ihres turbulenten Charakters länger am Zylindermantel anliegt. Dieser Wanddruck ist kleiner als der Druck auf der Endfläche des Zylinders, dessen Druckbeiwert im Vergleich zum unterkritischen Grenzschichtzustand nahezu gleich bleibt. Dadurch wird eine Ausgleichsströmung mit einem gegenüber dem unterkritischen Fall umgekehrten Drehsinn des Kopfwirbelpaars induziert. Das Kopfwirbelpaar entsteht weiter stromab des größten Modellquerschnittes und liegt enger nebeneinander. Aufgrund des sehr kurzen Rückstromgebietes können die Kopfwirbel diesem nicht mehr folgen und verlaufen nahezu parallel zur Endscheibe (vgl. Abb. 4b, obere blaue Wirbelachsen). Im Fußbereich bildet sich ein weiteres Rückstromgebiet flach über der Endscheibe aus, in dem eine komplexe dreidimensionale Wirbelstruktur existiert. Es entsteht in Wechselwirkung mit dem Hufeisenwirbel und generiert ein Bodenwirbelpaar (vgl. Abb. 4b, untere blaue Wirbelachsen).

Beim überkritischen Strömungszustand bilden sich mit dem Rückstromgebiet vergleichbar kurze und schmale Turbulenzstrukturen aus. In diesem Fall erfolgt das Entrainment von turbulenzarmen Fluid in das Ablösegebiet vorrangig durch die seitliche Umströmung des Zylinderstumpfes. Die Maxima der turbulenten kinetischen Energie \bar{k} treten entlang des Endes des Rückstromgebietes auf, wo die beiden freien Scherschichten aus der seitlichen

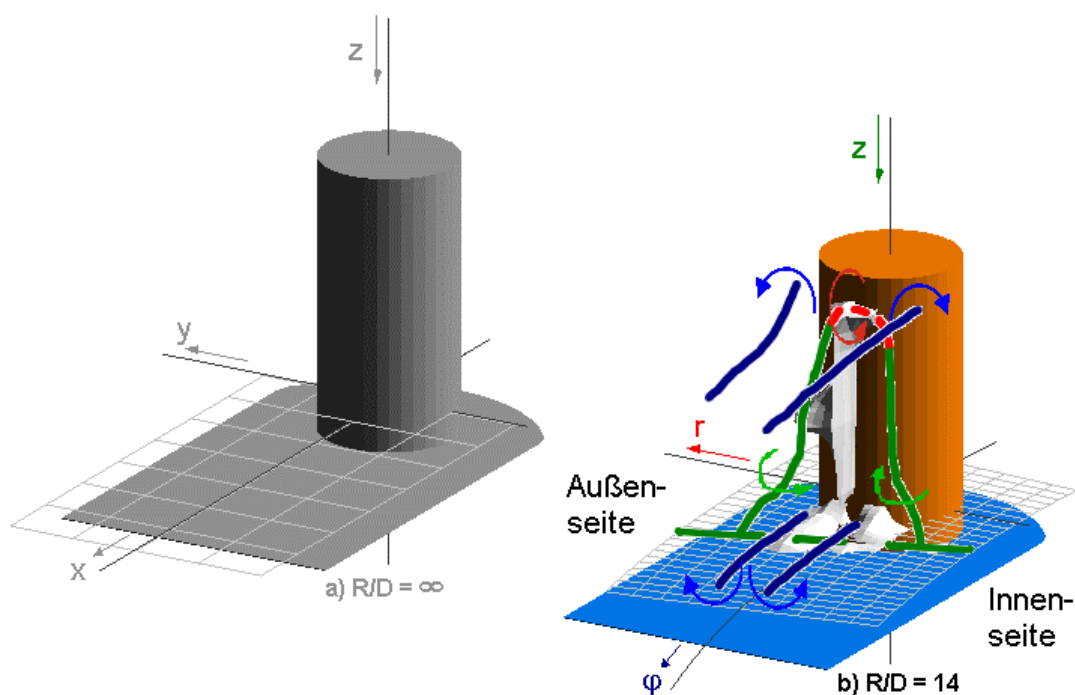


Abb. 4: Topologiemodell der Strömungsstruktur für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

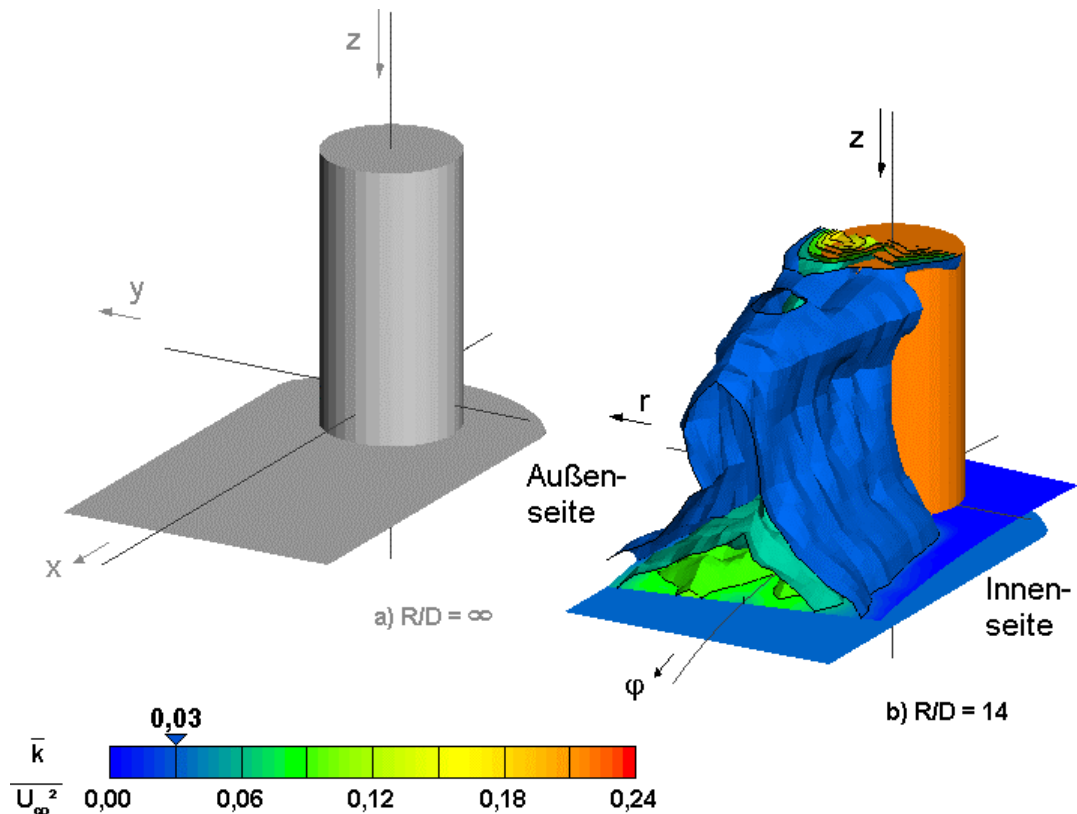


Abb. 5: Turbulente kinetische Energie \bar{k} für den überkritischen Bereich ($Re = 5 \cdot 10^5$)

Umströmung aufeinandertreffen. Weitere Maxima sind in der Nähe der Endscheibe zu finden, wo die freien Scherschichten mit der Grenzschichtströmung interagieren. Die Turbulenzstrukturen orientieren sich entlang der Kreisbahn des Zylinderstumpfes (vgl. Abb. 5b). Die Amplituden der Maxima sind mit $\bar{k} \approx 0,12 U_\infty^2$ deutlich geringer als beim unterkritischen Strömungszustand.

2.3 Transitionale Strömungs- und Turbulenzstruktur

Im kritischen Reynoldszahlbereich treten bei einer Scherströmung an den beiden Seiten des Zylinderstumpfes gleiche oder unterschiedliche Strömungszustände auf. Dagegen sind im untersuchten Fall $R/D = \infty$ bei $Re = 3 \cdot 10^5$ an beiden Modellseiten noch die typischen Umströmungsformen des unterkritischen Strömungszustandes vorzufinden (vgl. Abb. 2a, 6a). Unter dem Einfluss eines Scherprofils und einer Bahnkrümmung bildet sich an der Außenseite des Zylinderstumpfes ein überkritischer Strömungszustand aus, während an der Innenseite die typischen Merkmale der unterkritischen Grenzschichtablösung anzutreffen sind. Folglich entsprechen die Strukturen der Außenseite denen im überkritischen Bereich und die der Innenseite weitgehend denen im unterkritischen Bereich (vgl. Abb. 2b, 4b, 6b). Aufgrund des unterschiedlichen Charakters der beiden Strömungszustände kommt es im zeitlichen Mittel zu einer Durchströmung der Mittelfläche $r = R$ von außen nach innen und somit geht die Orientierung der Strukturen entlang dieser Symmetrieffläche verloren. Durch die geringe Ausdehnung des Rückstromgebietes auf der Innenseite folgt der Kopfwirbel dieser Kontur nicht mehr in Richtung der Endscheibe, sondern verläuft nahezu parallel zur φ -Achse. Aufgrund der unterschiedlichen Druckverteilung auf dem Zylindermantel der Innen- und Außenseite besitzen die beiden Kopfwirbel den gleichen Drehsinn.

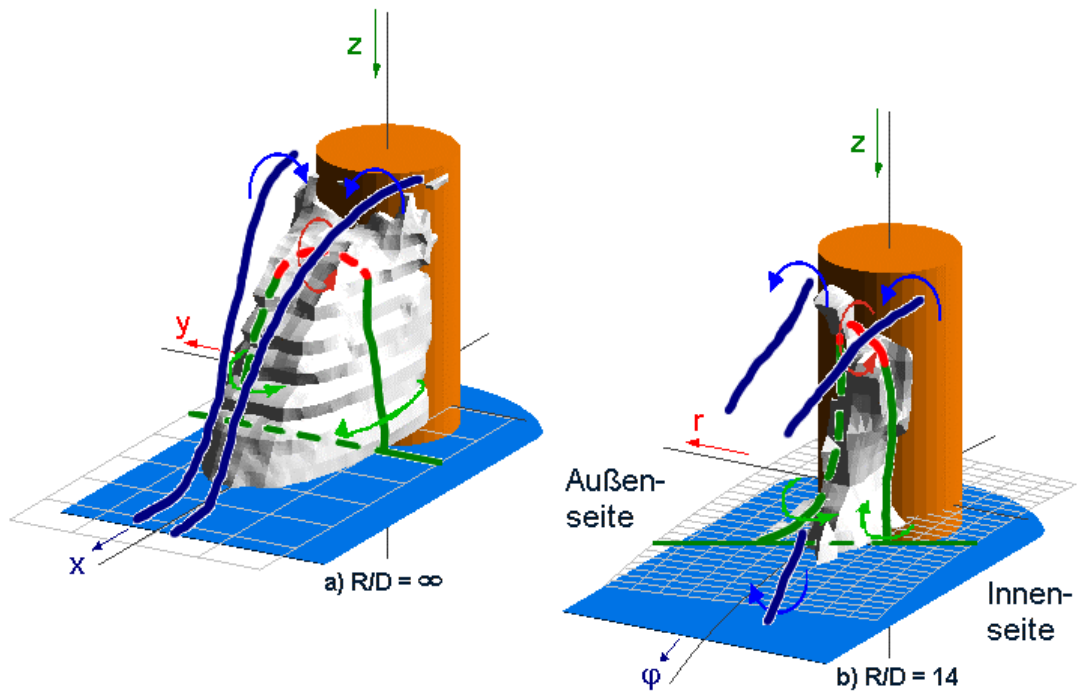


Abb. 6: Topologiemodell der Strömungsstruktur für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

Durch die Überströmung der Mittelfläche $r = R$ im zeitlichen Mittel wird das Kopfwirbelsystem und der Bodenwirbel der Außenseite zusätzlich verstärkt.

Im transitionalen Bereich sind ebenfalls Parallelen zwischen den Strömungs- und Turbulenzstrukturen zu finden. Die Turbulenzstruktur der untersuchten Konfiguration mit unendlich

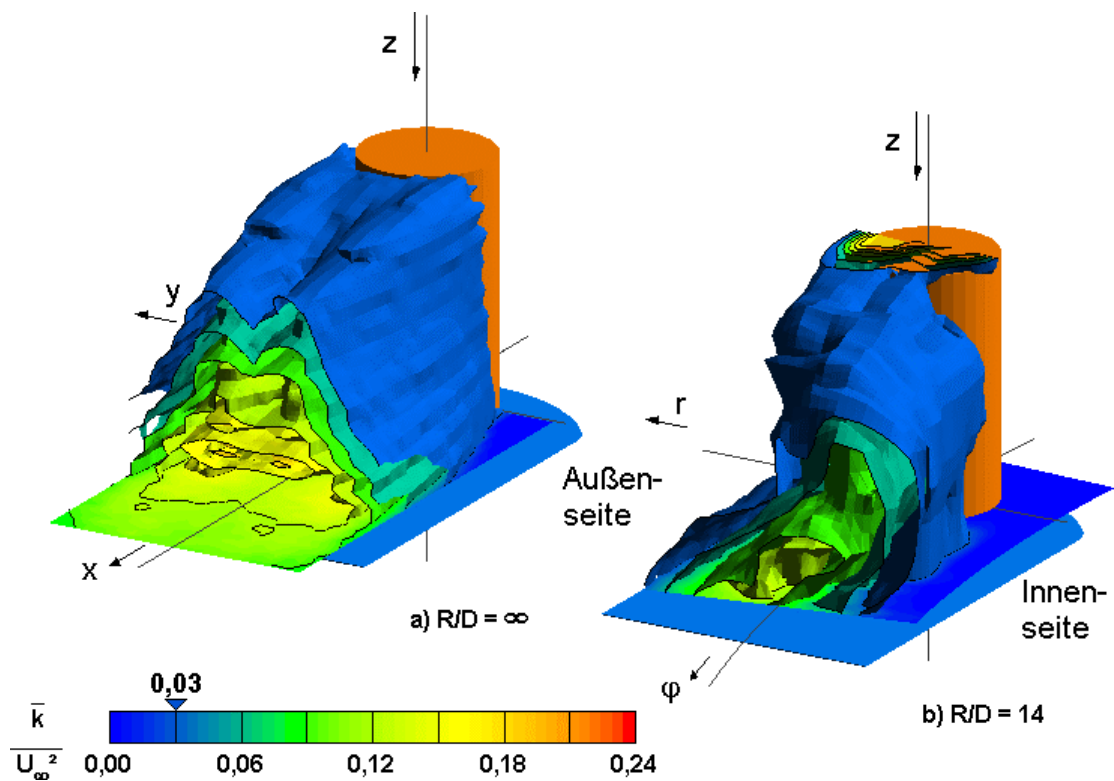


Abb. 7: Turbulente kinetische Energie \bar{k} für den Übergangsbereich ($Re = 3 \cdot 10^5$)

großem Bahnradius ($R/D = \infty$) zeigt noch die typischen Merkmale des unterkritischen Strömungszustandes (vgl. Abb. 3a, 7a). Die einsetzende Transition äußert sich in der Verlagerung der Maxima stromauf und einer geringeren Querausdehnung des Gebietes mit erhöhter Turbulenz.

Die aus dem Scherprofil der Bahnkrümmung resultierenden unterschiedlichen Strömungszustände an der Außen- und Innenseite des Zylinderstumpfes beeinflussen auch die Turbulenzstrukturen. Analog den Strömungsstrukturen sind außen die für den überkritischen und innen die für den unterkritischen Strömungszustand typischen Strukturen zu erkennen (vgl. Abb. 3b, 5b, 7b). Dabei überquert im zeitlichen Mittel die freie Scherschicht der Außenseite die Mittelfläche $r = R$ und tritt relativ frühzeitig mit der freien Scherschicht der Innenseite in Wechselwirkung. An dieser Stelle befindet sich das Maximum der turbulenten kinetischen Energie ($\bar{k} \approx 0,20 U_\infty^2$). Es verlagert sich im Vergleich zum unterkritischen Strömungszustand auf die Innenseite, rückt dichter an das Modell heran und verschiebt sich von der Endscheibe weg.

4 Ausblick

In Verbindung mit modernen Auswerteverfahren für umfangreiche Datenmengen bietet die vorliegende Datenbasis weitere Analysemöglichkeiten der untersuchten Strömungsfelder, beispielsweise in Bezug auf die Korrelation zwischen Geschwindigkeitsgradienten und Turbulenztermen. Als Ergänzung zu diesen Untersuchungen sollen interessante Gebiete im Nachlauf des Zylinderstumpfes, wie z. B. im Kopf- und Fußbereich, in einer feineren räumlichen Auflösung analysiert werden.

Weitere Aspekte für künftige Untersuchungen stellen die Analysen der instationären Strömungs- und Turbulenzstruktur sowie der instationären Wanddruckverteilung dar. Gleichfalls ist die Untersuchung des Einfluss der Kopfgeometrie des Zylinderstumpfes auf die Strömungs- und Turbulenzstrukturen eine interessante Aufgabenstellung.

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] Oschatz, L.-G.; Richter, F.; Leder, A.: 3D-Laser-Dopplermessungen im Kopf- und Fußbereich eines Zylinderstumpfes; in Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 10. Fachtagung; Universität Rostock; 2002
- [4] Richter, F.; Leder, A.: Einfluss der Bahnkrümmung auf die dreidimensionale Strömungsstruktur hinter einem geschleppten Zylinderstumpf; in Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 10. Fachtagung; Universität Rostock; 2002
- [5] Richter, F.; Leder, A.: Charakteristische Strömungs- und Wirbelstrukturen im Nachlauf eines Zylinderstumpfes unter dem Einfluss der Zentrifugalbeschleunigung bei unterkritischer Reynoldszahl; in Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 11. Fachtagung; Fischer Druck, 2003
- [6] Zdravkovich, M.M.: Flow around circular cylinders Vol. 1: Fundamentals; Oxford University Press, Oxford, New York, Tokyo, 1997