

Aerodynamische Untersuchungen an zwei Zylinderstümpfen unterschiedlicher Kopfgeometrie

A. Leder, F. Richter, M. Brede

Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

Zusammenfassung

Der Beitrag berichtet über zwei experimentelle Untersuchungen in Ablöse- und Nachlaufgebieten, die von einem Zylinderstumpf mit zwei unterschiedlichen Kopfgeometrien induziert wird. Beide Zylindermodelle sind jeweils auf einer Endscheibe montiert und besitzen ein Streckungsverhältnis von $L/D = 2,0$ (D : Durchmesser, L : Länge des Zylinderstumpfes), s. Abb. 1.

Die Hauptgesichtspunkte dieser Studie beinhalten, neben Analysen bezüglich den sich ausbildenden charakteristischen 3D-Wirbelstrukturen, die Einflüsse der Kopfgeometrie auf die Strömungscharakteristiken im Ablöse- und Nachlaufgebiet. Die Messungen erfolgten im Windkanal Göttinger Bauart mittels eines 3D-Laser-Doppler Messsystems bei der Reynoldszahl $Re_D = 2,0 \cdot 10^5$.

Die Ergebnisse verdeutlichen die komplexen 3D Strömungsbewegungen in den Ablösegebieten. Sie werden in beiden Fällen durch die Überlagerung von drei Hauptwirbeln induziert. Deutliche Unterschiede zeigen sich in den Wirbelstärken der Kopfwirbel und in der Geometrie der einhüllenden Oberfläche des Rückströmgebietes.

1 Einleitung

Die Ablösung der Grenzschichtströmung von einer Wandung und die nachfolgende Instabilität der freien Scherschichtströmung, die dann eine Wirbelbildung einleitet, gehört zu den fundamentalen Problemstellungen der Strömungsmechanik. Strömungsablösungen treten in vielen technischen Anwendungen auf: in der Fahrzeug- und Gebäudeaerodynamik, aber auch beispielsweise in atmosphärischen Strömungen und in Meeresströmungen hinter Gebirgen bzw. Inseln. In einigen Fällen sind Strömungsablösungen erwünscht, z.B. zur Durchmischung von Fluiden in der chemischen Industrie. In vielen anderen Fällen sollten Strömungsablösungen vermieden werden, da sie zu Strukturschwingungen, Geräuschemissionen und erhöhtem Strömungswiderstand beitragen können. Beispiele hierzu sind off-design Bedingungen für Flugzeug- und Hydroprofile, Turbinenschaufeln und Diffusoren.

Die numerische Simulation abgelöster Strömungen gehört nach wie vor zu den großen Herausforderungen der Strömungsmechanik. Berechnungen auf der Grundlage der RANS-Gleichungen versagen häufig wegen unzulänglicher Turbulenzmodellierungen. Der Einsatz von LES-Verfahren ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt für komplexe Strömungen mit technischer Relevanz noch nicht möglich. Die DNS-Methode wird für technische Problemstellungen auch in absehbarer Zukunft aufgrund beschränkter Computerressourcen nicht anwendbar sein.

Wegen der hohen Bedeutung, die der Umströmung stumpfer Körper in der Technik beizumessen ist, werden Forschungsanstrengungen unternommen, RANS- und LES-

Verfahren zu verbessern. Dieser Beitrag fasst experimentelle Ergebnisse zweier Studien vergleichend zusammen, um zu einem besseren physikalischen Verständnis abgelöster Strömungen dreidimensionaler Körper beizutragen.

Über experimentelle Ergebnisse nominell zweidimensionaler Strömungsablösungen wurde bereits in [1], [2] berichtet. Das Anliegen dieses Berichts ist, quantitative Resultate der Laser-Doppler Anemometrie aus den dreidimensionalen Ablöse- und Nachlaufgebieten zweier Zylinderstümpfen mit unterschiedlicher Kopfgeometrie zu diskutieren, siehe Modell A und Modell B in Abb. 1.

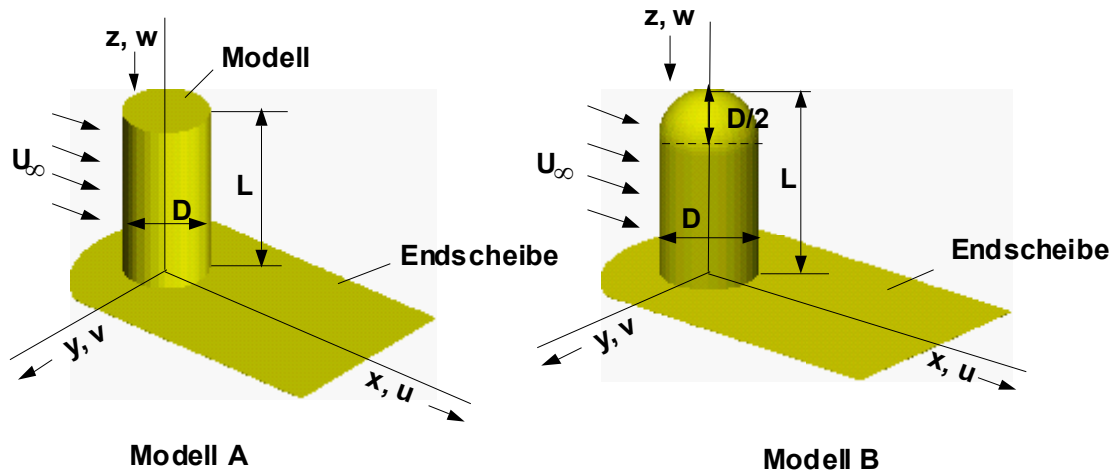


Abb. 1: Strömungskonfiguration und Definition der Koordinatenachsen

In der Literatur findet man bemerkenswerte Forschungsarbeiten, die sich dem Verständnis der Strömungscharakteristika endlicher Kreiszyylinder widmen [3], [4], [5]. In den meisten Fällen wurden die Experimente mit qualitativen Untersuchungsmethoden wie Strömungsvisualisierung oder der Hitzdraht-Technik, die für Geschwindigkeitsmessungen in turbulenten Rückströmgebieten nur sehr eingeschränkt anwendbar ist, ausgeführt. Generell lässt sich die Umströmung eines Zylinderstumpfes in drei Strömungsbereiche gliedern: in der Nähe der Endscheibe bildet sich ein Hufeisenwirbel aus, in der mittleren Zone des Zylinders eine mehr oder weniger gestörte turbulente Wirbelstrasse und im Kopfbereich eine stark dreidimensionale Umströmung. Die Ausdehnung des Hufeisenwirbels in z-Richtung hängt von Dicke der entlang der Endscheibe anströmenden Grenzschicht ab. Um den Hufeisenwirbel klein zu halten, wurde das Modell in einem Abstand von 48 mm hinter der Endplatten-Vorderkante angeordnet. Die Grenzschichtdicke liegt an dieser Position unterhalb von $\delta = 1$ mm.

In der Literatur sind bislang keine experimentellen Ergebnisse mittels einer dreidimensional erfassenden Messtechnik verfügbar, insbesondere existieren keine Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Kopfgeometrie auf die Rezirkulationsströmung und den Nachlauf.

2 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen erfolgten in einem Windkanal Göttinger Bauart bei einem Ver-sperrungsverhältnis von weniger als 8 %, der Turbulenzgrad der Anströmung liegt bei ca. 0,4 %. Abb. 1 verdeutlicht die Strömungskonfiguration und die Definition der Koordinatenachsen. Das freie Ende des Modells A besteht aus einer parallel zur Endscheibe ausgerichteten Deckfläche, Modell B besitzt eine halbkugelförmige Kopfgeometrie. Der Durchmesser D des Modells A ist 120 mm, bei Modell B ist der Durchmesser $D = 109$ mm. Das Streckungsverhältnis beider Modelle ist gleich und beträgt $L/D = 2,0$. Bei den Anströmgeschwindigkeiten U_∞ von 26 m/s für Modell A und 28 m/s für Modell B ergibt sich in beiden Fällen die Re-Zahl von $2,0 \cdot 10^5$.

Das dreidimensional erfassende LDA besteht aus einer Glasfaser-Version mit einer 2D-Sonde und einer 1D-Sonde, s. Abb. 2. Es wird im Rückstreu-Verfahren mittels eines Argon- bzw. Neodym-YAG-Lasers betrieben. Die Signalauswertung erfolgt mit drei Burst-Spektrum Analysatoren, die im Koinzidenzmode arbeiten. Dadurch wird das Messvolumen reduziert (Länge ca. 1 mm, Durchmesser ca. 0,2 mm) und es lassen sich Reynoldsspannungen sowie Tripelkorrelationen erfassen (diese Terme werden im Rahmen dieses Papers nicht diskutiert).

Die Abtastung des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes auf einem Gitter mit ca. 22 000 Messpositionen erfolgte mit einem rechnergesteuerten Traversiersystem. Die Datenrate im Koinzidenzmode lag oberhalb von 100 Hz. An jeder Messposition wurden mindestens 2000 Geschwindigkeitswerte erfasst. Die gesamte Datenbasis jedes Experiments umfasst mehr als 2 GByte.

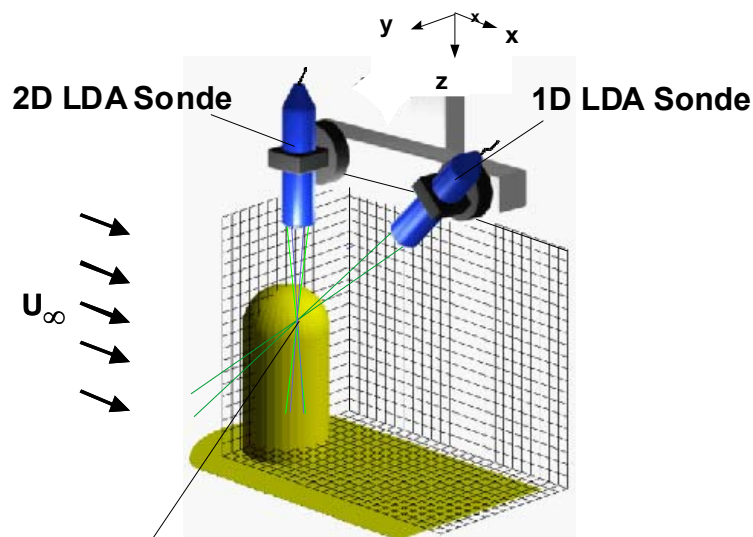


Abb. 2: 3D-Laser-Doppler-Anemometer und Skizze des 3D-Messgitters

3 Ergebnisse und Diskussion

Zeitlich gemittelte Strömungsstruktur für Modell A

Abb. 3 zeigt das Geschwindigkeitsfeld für Modell A in der Symmetrieebene $y = 0,0$ und in einer orthogonal dazu stehenden Ebene nahe der Endscheibe bei $z = -0,2 D$.

15.4

Es lassen sich zwei Rückströmgebiete detektieren: auf der Kopffläche des Zylinders in Form einer Ablöseblase, siehe Marke „B“ in Abb. 3, und hinter dem Zylindermodell ein ausgedehntes Ablösegebiet. Die LDA-Messungen belegen, dass dieses großräumige Rückströmgebiet hauptsächlich aus zwei Wirbelsystemen besteht: ein Wirbel hat sein Zentrum an der Stelle $C_y(x/D = 0,80; y/D = 0,0; z/D = -1,50)$, also $0,5 D$ unterhalb des freien Endes des Zylinderstumpfes. In der Symmetrieebene verläuft die Wirbelachse in y -Richtung. Das zweite Wirbelsystem mit Achsen in z -Richtung bildet sich in den freien Scherschichten auf der linken und rechten Zylinderseite, es ist in der Ebene parallel zur Endscheibe zu erkennen. Sein Zentrum in der $(+y)$ -Halbebene bei $z = -0,2 D$ ist in Abb. 3 durch C_z markiert. Die Überlagerung beider Wirbel induziert eine dreidimensionale abgelöste Strömung. Das Ablösegebiet erweitert sich in Richtung der Endscheibe und erreicht in der Symmetrieebene seine maximale Ausdehnung in Hauptströmrichtung an der Stelle $R(x/D = 2,20; y/D = 0,0; z/D = 0,0)$, wo sich eine Staupunktströmung ausbildet.

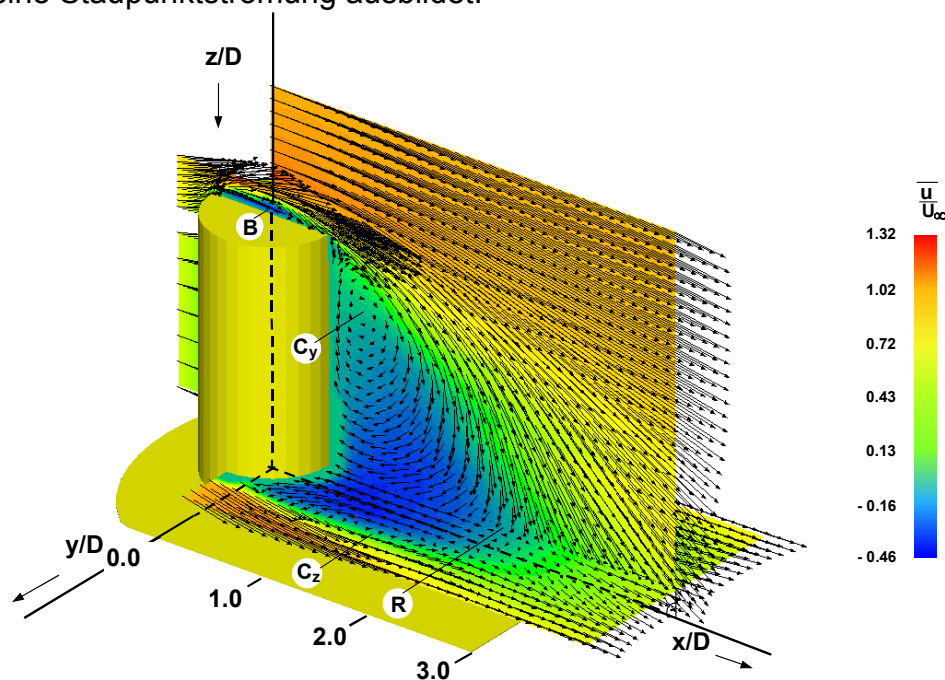


Abb. 3: Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsfeld für Modell A. Punkte C_y und C_z markieren die Mittelpunkte von jeweils einem Ablösewirbel mit Achsen in y - bzw. z -Richtung. R zeigt den Wideranlegepunkt am Ende des Rezirkulationsbereichs. B markiert die Ablöseblase im Kopfbereich.

Bild 4 stellt das dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld innerhalb und um die Ablöseblase herum in der Ebene $z/D = -2,05$ für positive y -Koordinaten dar. Die Ebene befindet sich 6 mm oberhalb der Deckfläche von Modell A. Die in Abb. 4 rot eingezeichnete Kurve verdeutlicht die Berandung der Ablöseblase in dieser Ebene in Form einer Trennlinie zwischen vorwärts und rückwärts gerichteter Strömung. Die Messungen zeigen, dass in der Symmetrieebene die Strömung an der Vorderkante des Zylinderkopfes abreißt und sich bei 84 % der Kopflänge wieder auf die Deckfläche anlegt. Die Umströmung des ebenen Zylinderkopfes induziert sowohl am linken wie am rechten Modellrand je einen Seitenrandwirbel, was sich u.a. in Form eines Geschwindigkeitsdefektes innerhalb der Nachlaufströmung äußert (s. Geschwindigkeitsprofil auf der rechten Bildseite von Abb. 4). Diese Seitenrandwirbel wurden bereits in [3] beschrieben. In [5] berichteten die Autoren auf der Basis von Visualisierungsexperimenten mittels Ölanstrich-Technik und Rauch-Lichtschnitt Untersuchungen

von vier Seitenkantenwirbeln (zwei auf jeder Seite). Mittels der vorliegenden LDA-Messungen kann dies nicht bestätigt werden.

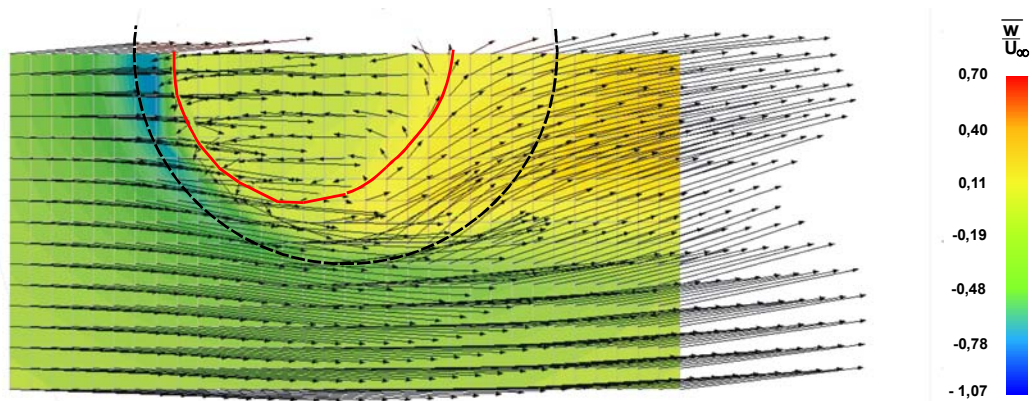


Abb. 4: 3D-Strömung innerhalb der Ablöseblase und um die Ablöseblase herum in der Ebene $z/D = 2,05$ (6 mm oberhalb der Kopffläche) für die Koordinaten von $y = 0,0$ bis $y = 0,8 D$.

Die Achsen des Seitenrandwirbel-Systems sind in x -Richtung orientiert. Die Abb. 5 zeigt dieses dritte Hauptwirbelssystem in Form der x -Komponente der Wirbelstärke ω_x . Zur dimensionslosen Auftragung werden die Anströmgeschwindigkeit U_∞ und der Zylinderdurchmesser D verwendet. Die Darstellung zeigt die Entwicklung der Seitenrandwirbel in Hauptströmrichtung in verschiedenen Ebenen $x = \text{const}$. Das Wirbelpaar mit gegenläufigem Drehsinn entsteht am äußeren Rand des Zylinderkopfes. Kurz nach der Entstehung erreicht die Wirbelstärke ein Maximum mit $\omega_x = \pm 1,9$. Zwischen beiden Wirbeln entsteht eine starke, zur Endplatte gerichtete w -Komponente der Strömung. Das Wirbelssystem entwickelt sich am Rand des Rückströmgebietes und legt sich im Nachlaufbereich unter kontinuierlicher Reduktion der Wirbelstärke an die Endscheibe an.

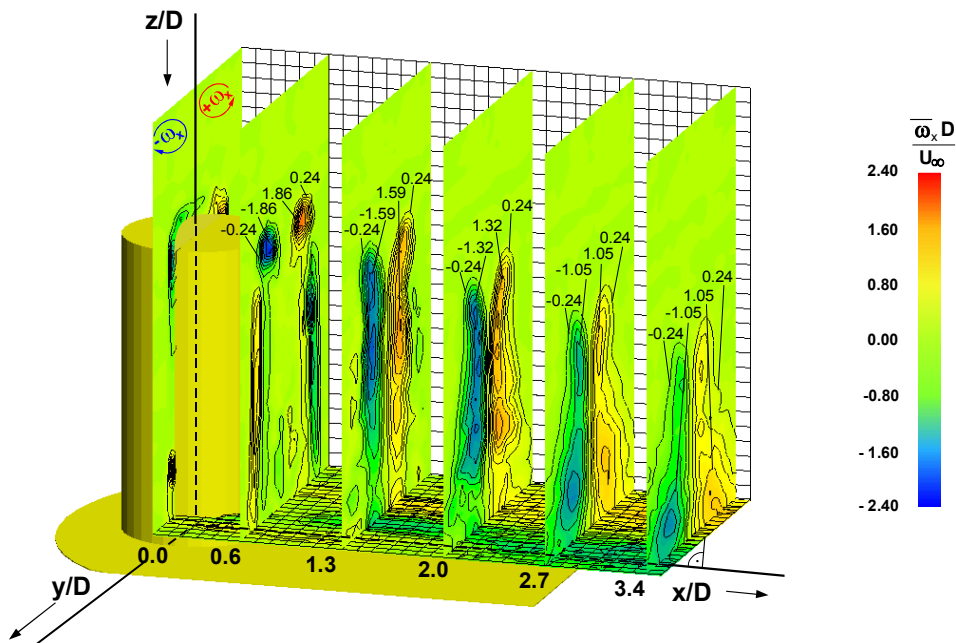


Abb. 5: Verteilung der Wirbelstärke ω_x stromab von Modell A

Wechselwirkungen zwischen den drei beschriebenen Wirbelsystemen induzieren im Ablösegebiet komplexe dreidimensionale Fluidbewegungen. Abb. 6 zeigt die einhüllende Oberfläche des Rezirkulationsgebietes. Sie wird definiert durch die Isofläche $u = 0,0$: innerhalb des eingehüllten Strömungsbereichs treten Rückströmungen auf, außerhalb ist die u -Komponente des Strömungsvektors positiv. Bewerksenswert ist die Tal-Struktur entlang der Symmetrieebene $y = 0,0$. Sie wird durch die starke w -Komponente in Richtung der Endscheibe zwischen den beiden Seitenrandwirbeln induziert.

Vergleiche zwischen Modell A und Modell B

Abb. 7 zeigt die dreidimensionale Kontur des Rückströmbereichs für Modell B, dem Zylinderstumpf mit halbkugelförmigem Kopf. Die entsprechenden Isotachenflächen

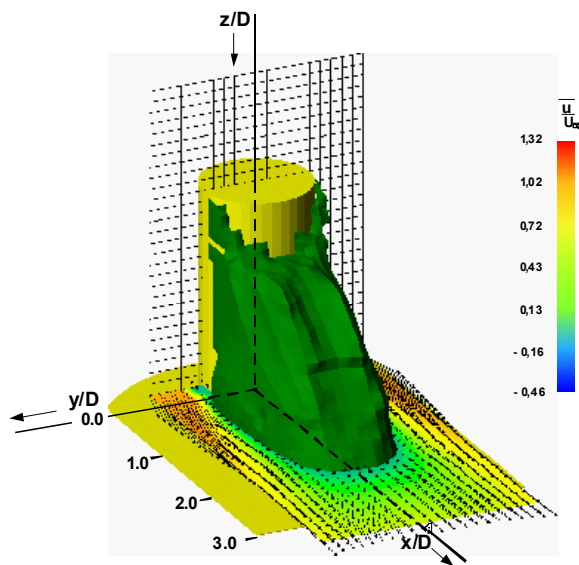


Abb. 6: Isofläche $u = 0$, Einhüllende des Rückströmbereichs von Modell A (die Isofläche der Ablöseblase auf der Kopffläche wird nicht dargestellt)

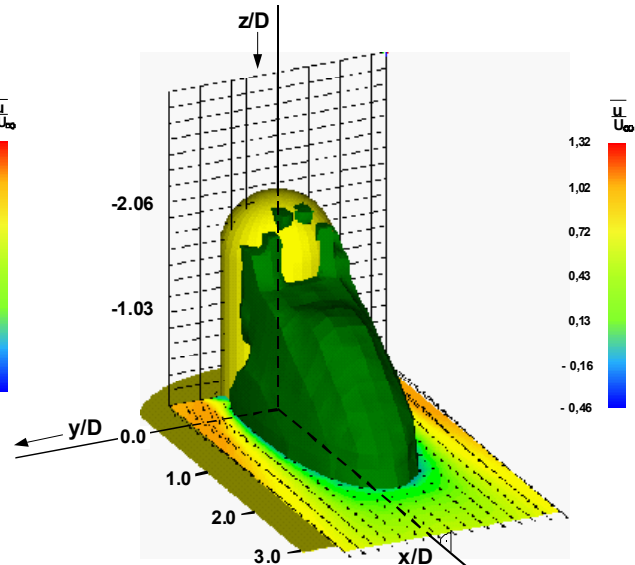


Abb. 7: Isofläche $u = 0$, Einhüllende des Rückströmbereichs für Modell B

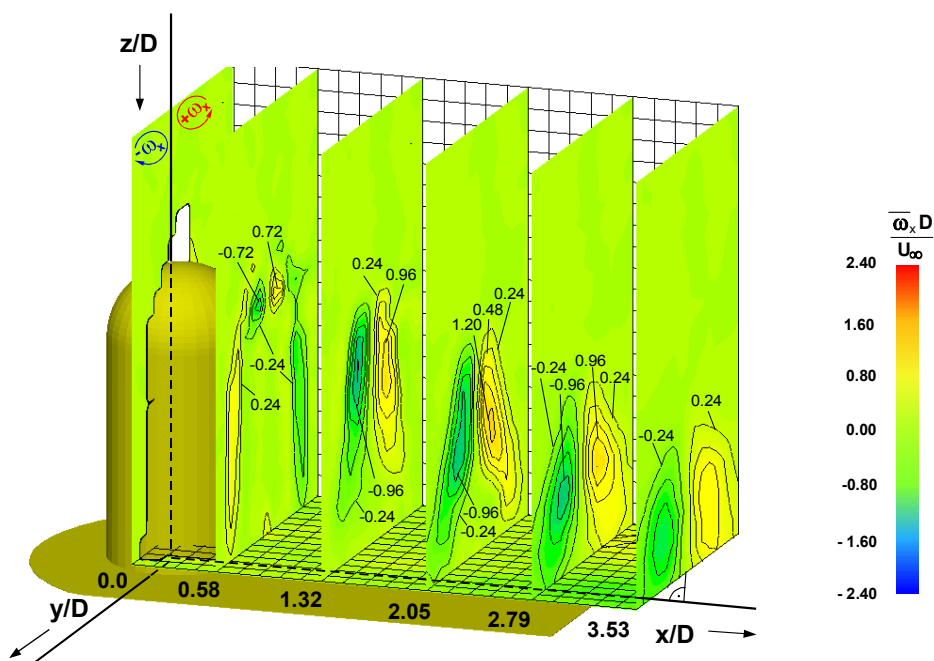


Abb. 8: Verteilung der Wirbelstärke ω_x stromab von Modell B

für die Strömungskomponente $u = 0,0$ ähneln sich. Unterschiede zeigen sich in einem ca. 10 % längerem Ablösegebiet des Modells B und einer konvexen Oberfläche des Rezirkulationsgebietes im Bereich der Symmetrieebene. Letzteres weist darauf hin, dass das im Kopfbereich von Modell B generierte Seitenrandwirbel-System eine deutlich geringere Wirbelstärke aufweist als bei Modell A. Abb. 8 verdeutlicht, dass die maximale Wirbelstärke ω_x im Fall von Modell B ca. 35 % geringer ist als bei Modell A.

Die Turbulenzstruktur beider Modelle wird anhand der Verteilung der turbulenten kinetischen Energie k erläutert: $k = 1/2 (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$. Die Abb. 9 und 10 zeigen die k -Verteilung für Modell A bzw. Modell B in Ebenen $x = \text{const.}$ In der Ebene $x/D = 0,6$ bilden sich in den k -Verteilungen die Lagen der freien Scherschichten deutlich

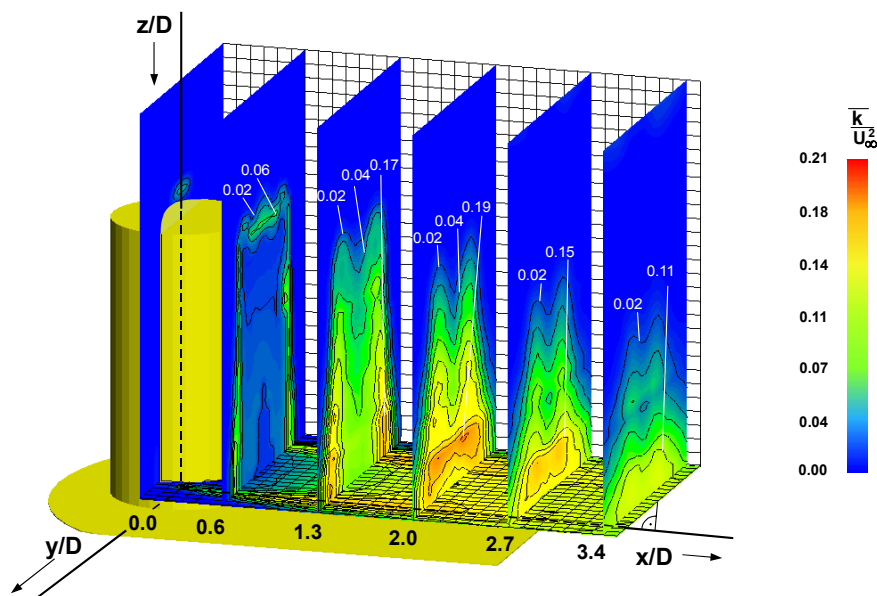


Abb. 9: Verteilung der turbulenten Energie k stromab von Modell A

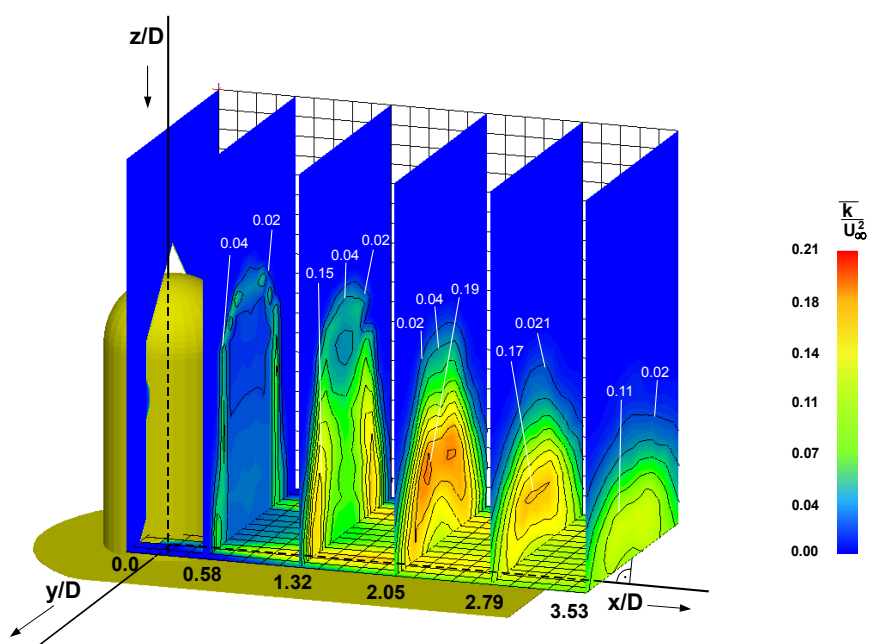


Abb. 10: Verteilung der turbulenten Energie k stromab von Modell A

sichtbar ab. Weiter stromab induziert die starke w -Komponente des Seitenrandwirbel-Systems im Fall des Modells A innerhalb der k -Isolinien eine deutliche Talform im Bereich der Symmetrieebene $y = 0,0$. Dies lässt sich für Modell B mit den schwächeren Seitenrandwirbeln nicht so ausgeprägt feststellen. Die Maximalamplituden der Schwankungsbewegungen sind in beiden Fällen mit $k/U_\infty = 0,19$ etwa gleich. Sie treten am Ende des Rezirkulationsgebietes auf. Während für Modell A der Bereich mit maximaler Turbulenz sich dicht oberhalb der Endscheibe ausbildet, liegt das Gebiet mit maximalem k für Modell B weiter von der Endscheibe entfernt.

4 Ausblick

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen ließen sich in den Ablösegebieten beider Körper dreidimensionale Fluidbewegungen identifizieren, die durch Wechselwirkungen von drei orthogonal zueinander orientierten Wirbelsystemen induziert werden. Abb. 11 skizziert die prinzipielle Wirbelanordnung. In zeitauflösenden Untersuchungen auf der Basis von TR-PIV Messungen ist geplant, den dämpfenden Einfluss des im Kopfbereich des Zylinderstumpfes sich ausbildenden Randwirbel-Systems auf die Dynamik der Wirbelablösung der turbulenten Wirbelstrasse zu analysieren.

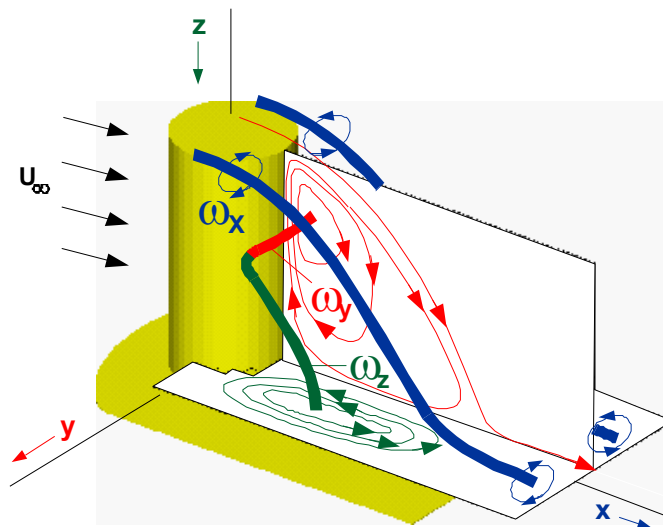


Abb. 11: Verlauf der Wirbelachsen im Ablöse- und Nachlaufgebiet eines Zylinderstumpfes mit der Streckung von $L/D = 2,0$

5 Literaturverzeichnis

- [1] A. Leder : Dynamics of fluid mixing in separated flows; Physics of Fluids A, vol. 3, Issue 7, pp. 1741-1748, (1991).
- [2] A. Leder: Abgelöste Strömungen, Physikalische Grundlagen; Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 214 S., (1992).
- [3] F. Etzold, H. Fiedler: The near-ake structure of a cantilevered cylinder in a cross-flow; Z. Flugwiss. 24; pp. 77-82, (1976).
- [4] T. Kawamura, M. Hiwada, T. Hibino, I. Mabuchi, M. Kumada : Flow around a finite circular cylinder on a flat plate; Bull. JSME 27; pp. 2142-2151, (1984).
- [5] S.C. Roth, S.O. Park : Vortical flow over the free end surface of a finite circular cylinder mounted on a flat plate; Experiments in Fluids 34, pp. 63-67, (2003).