

## FREQUENZ- UND STRUKTURANALYSE DES INSTATIONIÄREN ZYLINDERNACHLAUFS IN DER TRANSITION MIT HILFE VON LDA- UND TR-PIV MESSDATEN

**Martin Brede, Alfred Leder**

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

### Abstract

Im Nachlauf quer angeströmter stumpfer Körper kommt es bei hinreichend hoher Reynoldszahl zur periodischen Ablösung von Wirbeln und zur Bildung einer Wirbelstraße. Für Reynoldszahlen größer als etwa 400 entstehen zusätzlich in der abgelösten Scherschicht hinter dem Zylinder Folgen kleiner Wirbel als Ergebnis einer Kelvin-Helmholtz Instabilität der Scherschicht. Die beiden Wirbelsysteme treten in Wechselwirkung miteinander, so dass eine komplexe dreidimensionale Wirbelstruktur entsteht. Bisher wurde aufgrund der verfügbaren Messtechnik entweder das Wirbelfeld räumlich in seiner Struktur erfasst oder der zeitliche Verlauf des Wertes der Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt spektral analysiert. Mit den modernen Lasermesstechniken der 3D Laser-Doppler Anemometrie und vor allem der time-resolved Particle-Image Velocimetry (TR-PIV) können nun spektrale Analysen des gesamten Nachlaufgebietes durchgeführt werden. Das verwendete time-resolved PIV Gerät erlaubt eine Messrate von bis zu 250 Geschwindigkeitsfeldern pro Sekunde. Damit wird eine spektrale Auflösung bis maximal 125 Hz erreicht. Bei dem eingesetzten 3D-LDA wurden koinkidente Datenraten von etwa 1000 Hz erreicht, hier liegt die obere Grenzfrequenz bei 500 Hz. Zukünftige TR-PIV Systeme werden diesen Wert mindestens erreichen oder sogar übertreffen.

Die ermittelten Spektren erlauben nun eine Frequenzkartierung des Nachlaufgebiets, wobei nun in der zweidimensionalen Nachlaufströmung drei Dimensionen zu betrachten sind, zwei Raumkoordinaten und eine Frequenzkoordinate. Aus den Ergebnissen lassen sich wichtige Rückschlüsse über die räumlichen Auswirkungen der jeweiligen Instabilitäten und ihre spektrale Repräsentation ziehen.

### Einleitung

Der Nachlauf eines quer angeströmten Kreiszyklinders kann als Modell für zahlreiche Strömungsfelder hinter stumpfen Körpern angesehen werden. Aufgrund der einfachen Geometrie können die hinter dem Zylinder auftretenden Phänomene einzeln beobachtet und ihre Wechselwirkungsmechanismen untersucht werden.

Ein wesentliches Ziel bei der Erforschung der Strömung hinter stumpfen Körpern ist das Verständnis der Vorgänge, die zum Umschlag der Strömung von der laminaren zur turbulenten Form führen. Während die dominierende Wirbelstruktur des Nachlaufs, die Kármánsche Wirbelstraße, bereits ausführlich untersucht wurde, ist bis heute unklar, wie diese Wirbelstruktur zur Turbulenz übergeht. Zur Entstehung der Turbulenz im Zylindernachlauf leistet die Instabi-

lilität der vom Zylinder abgelösten instabilen Scherschichten einen wichtigen Beitrag. Sie tritt auf, bevor diese Scherschichten zu den primären Wirbeln aufgerollt werden.

Die Struktur des Zylindernachlaufs ändert sich mit der Reynoldszahl  $Re$ , gebildet mit der Anströmgeschwindigkeit  $U$ , dem Zylinderdurchmesser  $d$  und der kinematischen Viskosität  $\nu$  ( $Re = U d / \nu$ ). Betrachtet man ansteigende Reynoldszahlen, kommt es ab der kritischen Reynoldszahl für die primäre Instabilität des Zylindernachlaufs  $Re_{crit} = 49$  zu einer periodischen Ablösung laminarer Stabwirbel, die zusammen die so genannte Kármánsche Wirbelstraße bilden. Bei einer Reynoldszahl von etwa  $Re = 160$  entsteht durch das Einsetzen einer sekundären Instabilität des Nachlaufs eine Ablösung von dreidimensionalen Wirbelstrukturen. Diese Strukturen bestehen aus in Strömungsrichtung orientierten Sekundärwirbeln und den damit verbundenen Primärwirbeln, die zusammen eine dreidimensionale Wirbelstraße bilden (Brede 1996). Obwohl die Strukturen vollständig dreidimensional ausgebildet sind, bestehen die einzelnen Wirbel jedoch noch aus laminaren Schichten. Trotzdem kann dieser Übergang zur dreidimensionalen Wirbelbildung als Beginn der Transition angesehen werden, denn diese Wirbel zerfallen bereits nach wenigen Zylinderdurchmessern, während die bei niedrigeren Reynoldszahlen gebildeten Stabwirbel noch in einem weiten Abstand vom Zylinder nachgewiesen werden können.

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Instabilitäten des Nachlaufs insgesamt, wird oberhalb einer weiteren kritischen Reynoldszahl die ablösende Scherschicht instabil (Bloor 1964). Die überwiegende Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen der abgelösten Scherschicht befasst sich mit der Periodizität der aufgrund der Instabilität entstehenden Scherschichtwirbel. Diese wurde zuerst von Bloor (1964) als Fluktuationen bei Hitzdrahtmessungen für  $Re$  oberhalb von 1300 beobachtet, Gerrard (1978) gab als kritische Reynoldszahl 350 an. Wei und Smith (1986) bestimmten die Frequenz der Scherschichtwirbel sowohl mit Hilfe der Hitzdrahtanemometrie als auch erstmals in der Strömungssichtbarmachung. Bei Unal und Rockwell (1988) gelang es, zuvor von Monkewitz und Nguyen (1986) berechnete Wachstumsraten der Scherschichtinstabilität experimentell zu bestätigen.

Bezüglich eines Frequenzgesetzes für die Scherschichtwirbel wurden bei Prasad und Williamson (1997) schließlich alle bisherigen Hitzdrahtergebnisse zusammengefasst und es konnte, zusammen mit einer strömungsphysikalischen Erklärung, ein Potenzgesetz formuliert werden. Dabei wurde auch erstmals der intermittente Charakter der Scherschichtinstabilität erfasst und mit einer Bewegung des Transitionspunktes in der abgelösten Scherschicht in Abhängigkeit von der Sekundärwirbelstruktur in Verbindung gebracht. Insgesamt bleibt aber die Frage unbeantwortet, wie die Instabilität der abgelösten Scherschicht und die dadurch ausgelöste Entstehung von Scherschichtwirbeln die Entstehung der Turbulenz im Nachlauf beeinflusst. Bisherige Untersuchungen konnten diese Frage nicht beantworten, da alle durchgeführten Messungen zeitliche Mittelwerte, entweder bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten oder bei der Bestimmung von Schwingungsspektren in der Scherschicht, betrachteten. Angesichts des intermittenten Charakters der Instabilität der abgelösten Scherschicht ist es jedoch notwendig, die Scherschicht nur für den Fall der Instabilität zu untersuchen.

In der vorliegenden Untersuchung kamen daher zwei Methoden zum Einsatz. Die erste Methode ermöglicht es, mit Hilfe der 3D Laser-Doppler Anemometrie Geschwindigkeitsfelder mit punktuell hoher Zeitauflösung zu messen. Mit der zweiten, neuen Methode, der Time-Resolved Particle Image Velocimetry (PIV), können die instationären und intermittenten Vorgänge im Zylindernachlauf als Geschwindigkeitsfeld-Zeitreihen beobachtet werden.

## Experimentelle Methoden

Der Versuchsaufbau erfolgt in einem  $0,65 \times 0,65 \text{ m}^2$  Windkanal. Der Zylinder ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, vertikal ausgerichtet und wird quer angeströmt. Der Messstreckenquerschnitt ermöglicht eine Zylinderlänge  $L$  von  $0,58 \text{ m}$  zwischen zwei Endscheiben zur Abtrennung von Störungen aus dem Randbereich der Messstrecke. Bei einem Zylinderdurchmesser  $d$  von  $2 \text{ cm}$  ergibt sich ein Längen/Durchmesser-Verhältnis von  $29$ . Bei diesem  $L/d$  bleibt die mittlere Region zwischen den Endscheiben frei von Randeinflüssen, die zeitgemittelte Strömung kann als zweidimensional angesehen werden. Der Zylindernachlauf wurde bei Reynoldszahlen von  $10000$  und  $20000$  untersucht.

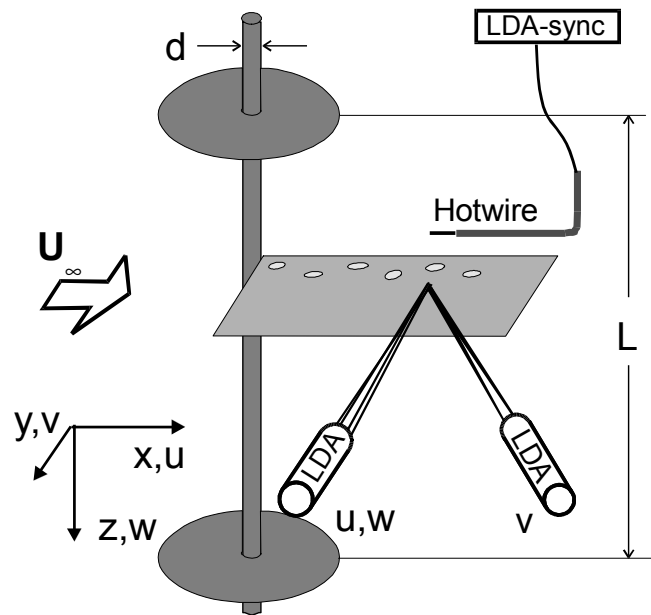


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Für die Untersuchung des Zylindernachlaufs kommt eine 3-D Laser-Doppler-Anemometrie Anlage zum Einsatz, die in koinzidenter, validierter Messung eine Datenrate von  $1 \text{ kHz}$  ermöglicht. Die Anlage besteht aus einer 2-D LDA-Sonde und einer 1-D LDA-Sonde, die auf einem Sondenträger fixiert sind. Zusätzlich erfasst ein Hitzdraht die Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt im Nachlauf. Aus diesem Signal wird die Primärwirbelbewegung bestimmt und ein Triggerimpuls generiert, der die Phase der Primärwirbelablösung markiert. Mit Hilfe dieser Markierung kann die Phase der Primärwirbelablösung sowie die Instabilität der Scherschicht ermittelt werden (Brede 2004).

Als Messebene wurde die Ebene orthogonal zur Zylinderachse, in der Mitte zwischen den Endscheiben gewählt. In Strömungsrichtung ( $x$ -Richtung) wurde ein Bereich vom Zylinder bis  $x/d = 4,5$ , quer zur Strömung ( $y$ -Richtung) ein Bereich vom Zylinder bis  $y/d = \pm 1,0$  untersucht.

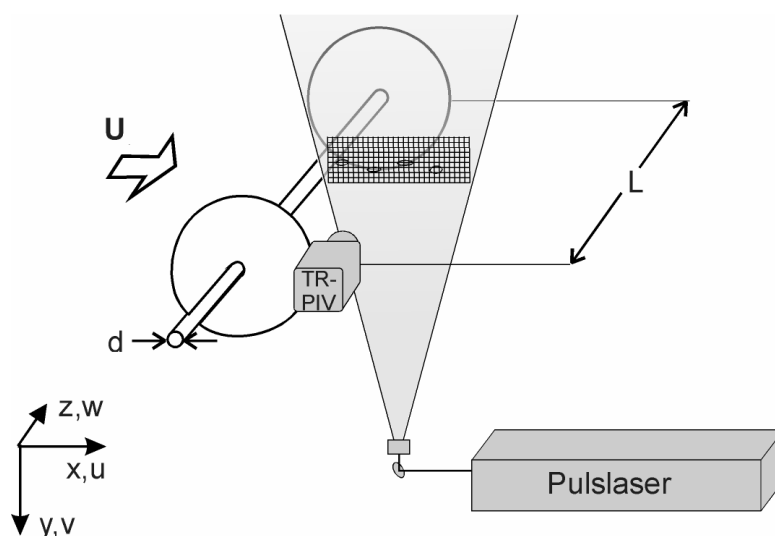


Abbildung 2: experimenteller Aufbau für das Time-Resolved PIV-Verfahren

Mit Hilfe einer computergesteuerten motorischen Traversiereinrichtung kann der Sondenträger auf einem Messgitter in der Messebene verfahren werden. Als Gitterweite wurde  $1/10 d$  gewählt, daraus ergibt sich ein Gitter von  $966$  Punkten. Insgesamt wurden für jeden Gitterpunkt mindestens  $32000$  koinzidente, validierte Bursts gemessen

Der Versuchsaufbau für das TR-PIV-Verfahren ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Mo-

dellgeometrie und die Windkanaleinstellungen stimmen mit dem Aufbau für LDA-Untersuchungen überein. Zur PIV-Aufnahme wurde mit Hilfe eines Nd-YAG Pulslasers, der eine Doppelpulsfrequenz von 250 Hz erlaubt, ein Lichtschnitt erzeugt. Zur Bildaufnahme kam eine 1,2 Megapixel CMOS Kamera mit entsprechend hoher Bildrate zum Einsatz.

### Ergebnisse – spektrale Untersuchung

Beide zuvor beschriebene Messverfahren, 3D-LDA und TR-PIV erlauben jetzt eine zeitaufgelöste Untersuchung des Zylindernachlaufs. Während bei 3D-LDA eine Zeitauflösung von über einem Kilohertz an einem Punkt erreicht wird, ermöglicht es die TR-PIV Methode, zeitaufgelöst das ganze Geschwindigkeitsfeld zu beobachten.

In der spektralen Untersuchung wurden die Messdaten Punkt für Punkt einer FFT-Analyse unterzogen. Die so berechnete spektrale Leistungsdichte steht also als Funktion in zwei Raumkoordinaten und einer Frequenzkoordinate zur Verfügung.

Für die TR-PIV-Daten wurde die Berechnung dankenswerter Weise von Carsten Westergaard und Bo Madsen (Westergaard, Brede, Leder, Madsen 2003) durchgeführt. Die Darstellung der spektralen Leistungsdichte  $S$  der Geschwindigkeitskomponente  $U$  für PIV ist in Abbildung 3 dargestellt. Darin zeigen sich ausgeprägte Maxima für die primäre Wirbelfrequenz im Zylindernachlauf, für  $Re = 5000$  bei 35 Hz und für  $Re = 10000$  bei 74 Hz. Der Bereich der höchsten Intensität der Primärwirbelfrequenz ist bei  $Re = 10000$  ohne Verringerung des Wertes bis  $X/D = 5$  ( $X = 100$  mm) ausgedehnt, während bei  $Re = 5000$  die spektrale Leistungsdichte bis  $X/D = 5$  auf etwa  $1/10$  abgefallen ist. Auch die laterale Ausdehnung ist im Fall von  $Re = 10000$  deutlich größer als bei  $Re = 5000$ . An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass in Kürze die TR-PIV Messungen mit einer wesentlich höheren Bildrate und Gesamtbildzahl wiederholt werden, um die spektralen Grenzen zu erhöhen und die Auflösung zu verbessern.

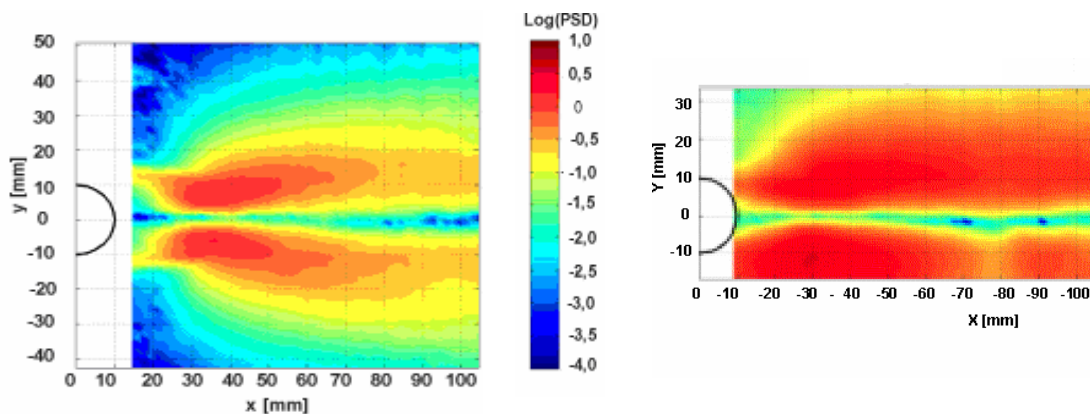


Abbildung 3: Ergebnisse aus time-resolved PIV Daten: spektrale Leistungsdichte für U bei 37 Hz im Nachlauf bei  $Re = 5000$  (links) und bei 73 Hz bei  $Re = 10000$  (rechts).

Die Daten des 3D- LDA Verfahrens erlauben eine spektrale Auswertung bis zu 500 Hz und weisen aufgrund der höheren Zahl Messwerte ein niedrigeres Rauschen auf.

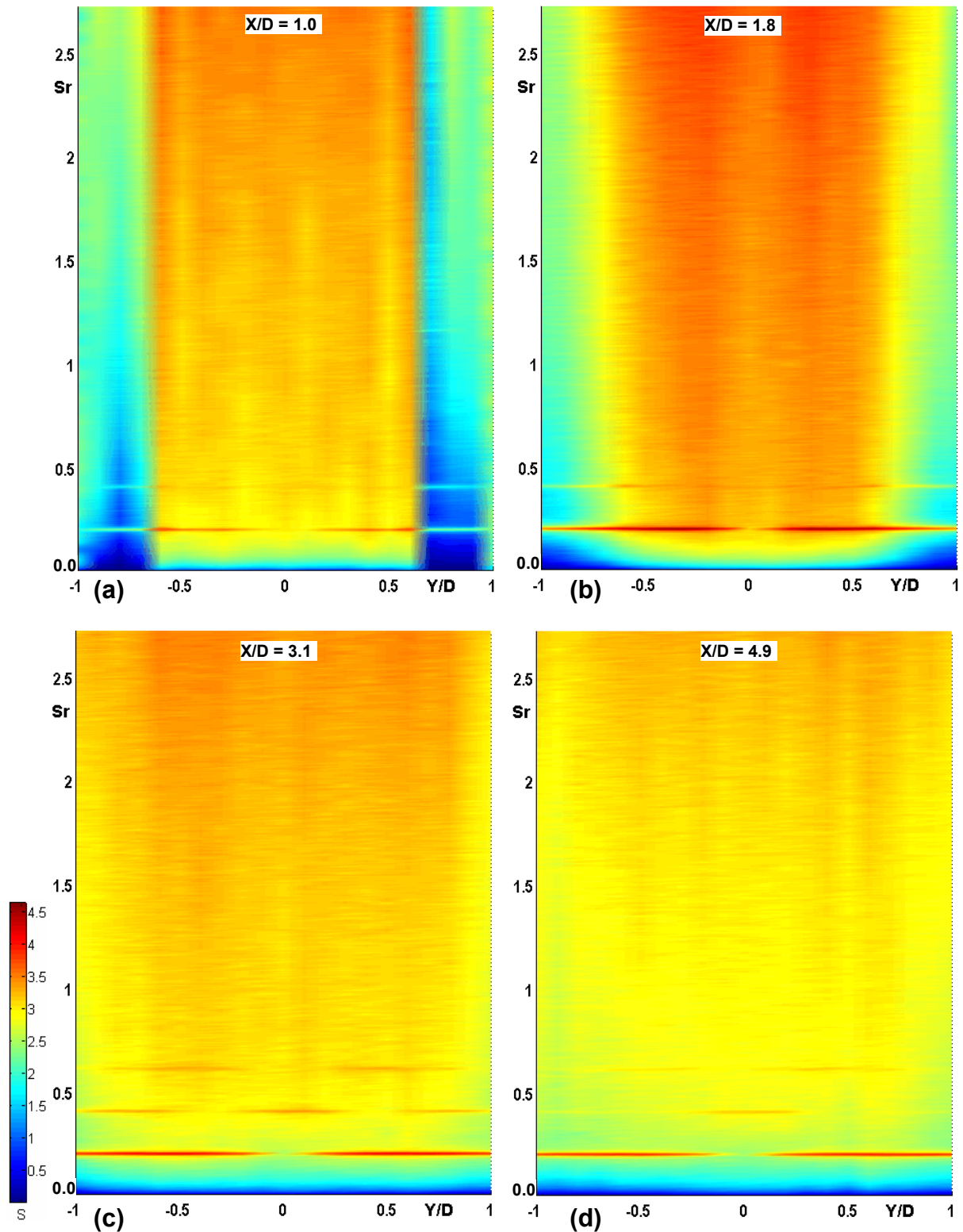


Abbildung 4: Ergebnisse aus 3D LDA Daten, normiertes Strouhalzahlspektrum auf den Querschnitten  $x = 1.0 D$  (a) ;  $1.8 D$  (b);  $3.1 D$  (c) und  $4.0 D$  (d) hinter dem Zylinder,  $Re = 5000$

In der Abbildung 4 sind die Ergebnisse für die spektrale Leistungsdichte  $S$  der Geschwindigkeitskomponente  $U$  aus LDA-Daten im Zylindernachlauf bei  $Re = 5000$  aufgetragen. Anhand der Größe von  $S$  lassen sich einzelne Phänomene im Zylindernachlauf und unterschiedliche Strömungsbereiche mit veränderlichem Abstand vom Zylinder gut verfolgen. Im Bild 4a für die Koordinate  $X/D = 1$  ist das Auftreten der primären Instabilität, der Wirbelstraße anhand

der Maxima von  $S$  bei  $S_r = 0,2$  klar zu erkennen. Diese zwei Bereiche liegen seitlich außerhalb der Symmetrieebene. Der Nachlaufbereich insgesamt ist durch ein hohen statistischen Anteil für alle Frequenzen im Bereich von  $-0,6 < Y/D < 0,6$  charakterisiert, die Außenströmung weist dagegen wenig spektrale Leistung auf.

Auffällig sind nun die Veränderungen dieser charakteristischen Eigenschaften des Spektrums mit zunehmendem  $X/D$ . Der Nachlaufbereich insgesamt sowie die primäre Wirbelfolgefrequenz erreichen ihr spektrales Leistungsmaximum etwa bei  $X/D = 1,8$  (Bild 4b), danach fallen die Werte wieder ab. Zu der Frequenz der primären Instabilität treten außerdem harmonische Vielfache hinzu bei  $S_r = 0,4$  (zweifache Frequenz) und  $S_r = 0,6$  (dreifache Frequenz) (Bild 4c). Die zweifache Frequenz tritt zusätzlich zu den Maxima seitlich der Symmetrieebene noch in der Nachlaufmitte auf. Die dreifache Frequenz tritt in den gleichen  $Y/D$ -Regionen auf wie die primäre Frequenz.

Die charakteristischen Eigenschaften des Spektrums, wie in Abbildung 4 dargestellt, stehen in guter Übereinstimmung mit den bisherigen Beobachtungen der Nachlaufstruktur. Das Maximum der spektralen Leistungsdichte bei der Primärwirbelfrequenz bei  $X/D = 1,8$  fällt mit dem Ende der Wirbelbildungszone zusammen, weiter stromab beginnt der Zerfall der Primärwirbel, so dass auch in der Primärfrequenz nur ein Abfall der spektralen Leistung zu erwarten ist. Das allgemeine spektrale Leistungsmaximum bei  $X/D = 1,8$  stimmt überein mit der Beobachtung des Maximums der Turbulenzproduktion in ereignisgetriggerten LDA-Messungen, allerdings wäre hier ein lokales Maximum im Bereich der abgelösten Scherschichten zu erwarten. Hier reicht möglicherweise die spektrale Auflösung für diese Effekte nicht aus. Das Auftreten höherer harmonischer Frequenzen zur Primärwirbel-Grundfrequenz kann als Hinweis auf ein nichtlineares Verhalten der Bewegung der Primärwirbel mit zunehmender Entfernung vom Zylinder gesehen werden.

### **Ergebnisse – zeitaufgelöste Wirbelstruktur**

Die Erkenntnisse aus der Analyse der Zeitreihenaufnahmen mit TR-PIV und der phasen- und ereignisgetriggerten LDA-Messung wurden bereits in Brede und Leder 2003 vorgestellt. Eine Zusammenfassung ist in Abbildung 5 dargestellt.

In den TR-PIV Sequenzen ist die Entwicklung der Wirbel in der abgelösten Scherschicht des Zylinders zu verfolgen. Sie entstehen in der Scherschicht aus einer Kelvin-Helmholtz-Instabilen Scherschicht, werden vom neu entstehenden Primärwirbel aufgerollt und bilden dort die Kerne der Zerfallsprodukte bei dem Auseinanderbrechen des Primärwirbels stromab. In den phasen- und ereignisgetriggerten LDA-Messungen ist diese Entwicklung einerseits als Kelvin-Helmholtz-periodische Turbulenzproduktion in der abgelösten Scherschicht, andererseits im Abklingen turbulenter kinetischer Energie mit zunehmendem Abstand vom Zylinder zu erkennen.

Die Erkenntnisse aus den Beobachtungen des Nachlaufs in Form von TR-PIV Zeitreihen lassen sich mit der spektralen Analyse gut ergänzen. Zusätzlich zeigen sich in den Spektren Hinweise auf die Abhängigkeit der Strömungsinstabilitäten mit der Koordinate in Strömungsrichtung sowie auf nichtlineare Effekte im Nachlauf. Diese Untersuchungen werden zukünftig durch Time-Resolved Stereo-PIV Messungen mit deutlich verbesserter Zeitauflösung fortgesetzt.

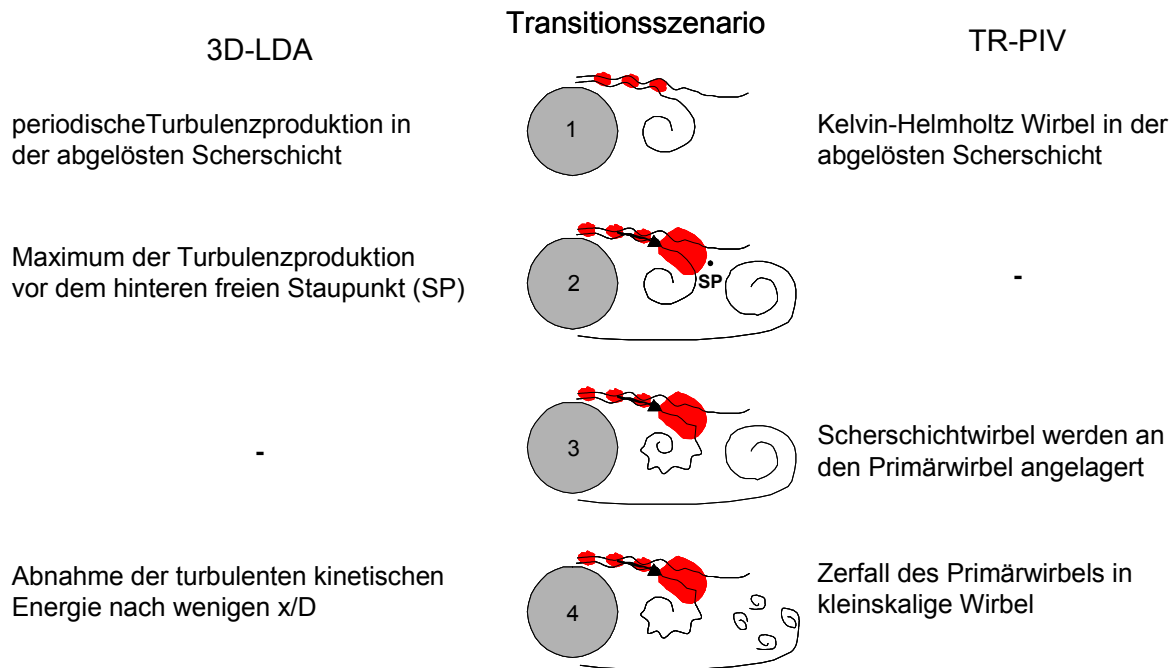


Abbildung 5: Erkenntnisse aus 3D-LDA und TR-PIV Messungen und Vorschlag für ein Transitionsszenario des Zylindernachlaufs.

### Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für Ihre Projektförderung (LE 713 / 11-1).

### Literatur

- Bloor, S., 1964: The transition of turbulence in the wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.* 19, 290-304
- Brede, M., Eckelmann, H. und Rockwell, D., 1996: On secondary vortices in the cylinder wake, *Phys. Fluids* 8, 2117-2124
- Brede, M., Leder, A., Westergaard, C.H., 2003: Time-resolved PIV investigation of the separated shear layer in the transitional cylinder wake, in: K.C. Kim (Ed.), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry PIV'03*, The Korean Society of Visualization, Busan, P3215
- Brede, M., 2003: Measurement of the turbulence production in the cylinder separated shear-layer with event-triggered Laser-Doppler anemometry, *Exp. in Fluids* 36, p 860 - 866
- Gerrard, J.H., 1978: The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 288, 351-382
- Monkewitz, P., und Nguyen, L.N., 1987: Absolute instability in the near-wake of two-dimensional bluff bodies, *J. Fluids Struct.* 1, 165-184
- Prasad, A., und Williamson, C.H.K., 1997: The instability of the shear layer separating from a bluff body, *J. Fluid Mech.* 333, 375-402
- Unal, M.F., und Rockwell, D., 1988: On vortex formation from a cylinder. Part 1. The initial instability, *J. Fluid Mech.* 190, 491-512
- Wei, T., und Smith, C.R., 1986: Secondary vortices in the wake of circular cylinders, *J. Fluid Mech.* 169, 513