

## **ZEITAUFGELÖSTE MESSUNG SELBSTERREGTER STRÖMUNGSFELDER DURCH KOPPLUNG VON HITZDRAHTANEMOMETRIE UND PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SELF-EXCITED PHENOMENA BY COMBINING HOTWIRE ANEMOMETRY AND PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY**

**Rana Badreddine, Martin Lawerenz**

Fachgebiet Strömungsmaschinen, Universität Kassel

Rotierende Instabilitäten, selbstserregte Strömung, Karmansche Wirbelstraße  
Rotating Instability, self-excited Flow, Karman Vortex, PIV

#### **Zusammenfassung**

Im Bereich der Axialverdichter stellen selbstserregte, periodische Strömungen ein komplexes Phänomen dar, das bei hohen aerodynamischen Belastungen als rotierende Instabilität oder als sogenannter rotating stall in Erscheinung tritt. Aufgrund der fehlenden Phaseninformation kann diese instationäre Strömung mit konventionellen PIV-Systemen nicht erfasst werden. Um die Funktionalität einer neu entwickelten Analysetechnik zu überprüfen, wird das Verfahren zur Vermessung der Karmanschen Wirbelstraße eingesetzt. Die Methodik basiert auf der Kopplung von Hitzdraht- und PIV-Messungen. Dabei dient das mit hoher zeitlicher Auflösung gemessene Hitzdrahtsignal dazu, den Zeitpunkten der PIV-Aufnahmen einen Phasenwinkel zuzuordnen.

#### **Einleitung**

Selbsterregte periodische Strömungsvorgänge sind instationäre Phänomene, die ohne äußere Anregung entstehen und deren Periodendauer oftmals gewissen Schwankungen unterworfen ist. Wie Untersuchungen von Baumgartner et al 1995 gezeigt haben, treten derartige Phänomene in Turbomaschinen bei hoher Gitterbelastung in Form rotierender Instabilitäten auf, die sich aus dem Zusammenwirken aerodynamischer und akustischer Mechanismen ergeben. Innerhalb eines begrenzten Betriebsbereiches wechselwirken vermutlich aus Grenzschichtablösungen resultierende Wirbel mit akustischen Eigenfrequenzen der untersuchten Strömungsräume. Wie Untersuchungen von Weidenfeller 2002 an einem Ringgitter gezeigt haben, beträgt die Geschwindigkeit mit der sich die Störung in Umfangsrichtung ausbreitet etwa 50 % der tangentialen Komponente der Zuströmung. Messungen von Mailach et al 2001 an einem 4-stufigen Niedergeschwindigkeitsverdichter kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Da diese Untersuchungen sich auf punktuelle Messungen und der anschließenden zeitlichen Analyse der Signale stützen, sind Aussagen zur Entwicklung der Wirbelstrukturen nur sehr indirekt möglich. Für ein tieferes Verständnis der Vorgänge ist eine zeitlich aufgelöste Darstellung der Geschwindigkeitsfelder vorteilhaft, um so das dynamische Verhalten der Wirbelstrukturen aufzuschlüsseln. Gegenüber rotierenden Instabilitäten stellt die durch Theodore von Karman 1912 nachgewiesene Wirbelstraße eine selbstserregte Strömung dar, die in umfangreichen Messungen und numerischen Studien detailliert untersucht wurde und im wesentlichen eine zweidimensionale Struktur aufweist.

Die Ähnlichkeit der beiden Strömungsformen wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um die Funktionsweise des hier entwickelten Mess- und Auswerteverfahrens für selbstserregte periodi-

sche Strömungen an einem bekannten Geschwindigkeitsfeld zu überprüfen. Um bei Untersuchungen in Luft einen möglichst periodischen Charakter der Karmanschen Wirbelstraße zu realisieren, sollte nach Berger 1964 die Reynolds-Zahl im regulären Bereich zwischen 40 und 160 liegen. Oberhalb davon zeigen die Wirbel ein zunehmend chaotisches Verhalten. Im Rahmen der hier durchgeführten Messungen wurde, wie in Abschnitt 2 dargestellt, ein querangeströmter 2 mm dicker Zylinder in einem Windkanal zur Induzierung der Wirbelstraße eingesetzt. Voruntersuchungen dienten dazu, das Strömungsfeld mit bloßem Auge sichtbar zu machen. Dazu wurde die angesaugte Luft mit Teilchen eines Alkohol- Wasser- Öl- Gemisches dotiert, deren Durchmesser  $d_p \approx 0.5 - 1 \mu\text{m}$  beträgt. Das Seeding wurde dabei lokal auf einer Breite von etwa 4 mm vor dem Zylinder in die Strömung eingebracht. Die Wirbel selbst führen zu einem Transport seedingfreier Luft in den Nachlauf und aus der Konzentrationsverteilung wird die Wirbelstruktur sichtbar. Das in Abbildung 1 dargestellte Bild wurde unter diesen Bedingungen mit einer CCD-Kamera und Laserbeleuchtung gewonnen.

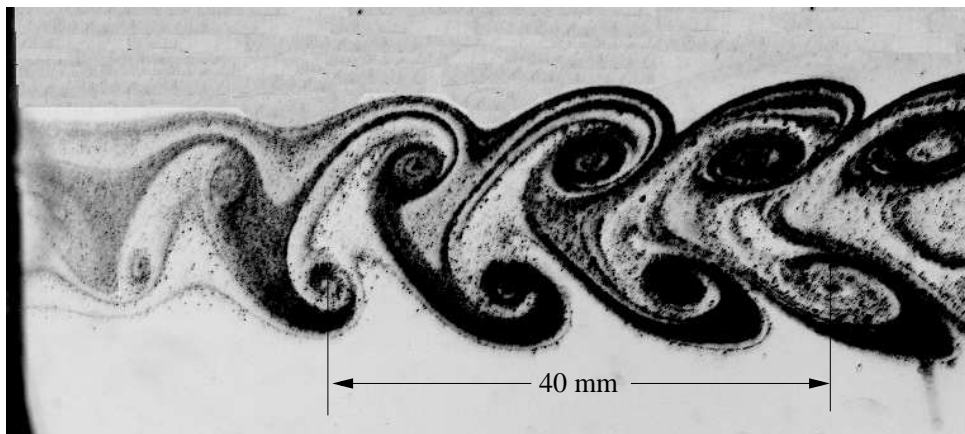


Abb. 1: Visualisierung der Karmanschen Wirbelstraße durch Einbringen von Seeding

Konventionelle PIV-Methoden basieren auf der Analyse einer Vielzahl von Doppelbildern. Dabei dienen Filter und statistische Methoden dazu, aus der Verschiebung der Bildpunkte das wahrscheinlichste Geschwindigkeitsfeld zu ermitteln. Die darin enthaltener Mittelung führt dazu, dass sich instationäre Vorgänge nicht auflösen lassen. Wird der zeitabhängige Vorgang durch äußere periodische Mechanismen gesteuert, besteht jedoch die Möglichkeit, die jeweiligen Doppelbilder mit Hilfe eines Triggersignals bei festen Phasenwinkeln aufzunehmen. Estevaldoral et al 2000 haben so mit einem Zwei-Farben-DPIV-System die Strömung im Rotor eines Axialventilators untersucht. Die Variation dieses Phasenwinkels in einer übergeordneten Schleife erlaubt dann die zeitaufgelöste Darstellung der Geschwindigkeitsfelder. Untersuchungen einer von außen angeregten Schaufel in einer transonischen Strömung wurden von Lehr und Bölc's 2000 mit einem PIV-System für ausgewählte Phasenwinkel durchgeführt. An einem einstufigen Verdichter mit einer speziellen optischen Zugänglichkeit im Gehäuse wurden von Voges et al 2008 PIV-Messungen durchgeführt. Ziel war die Analyse des Strömungsfeldes im Blattspitzenbereich, das aus der komplexen Wechselwirkung zwischen Rotorbeschaufelung und dem mit Schlitzen versehenen Gehäuse resultiert. Durch die Triggerung mit der Rotordrehung haben die phasengemittelten PIV-Aufnahmen Einblicke in die zeitabhängigen Strömungsvorgänge geliefert. Bei selbstinduzierten Strömungen ist eine derartige Festlegung des Phasenwinkels nicht möglich und den periodischen Vorgängen sind in vielen Fällen zusätzlich chaotische Mechanismen überlagert. Sung und Yoo 2001 setzen daher bei dreidimensionalen Messungen im Nachlauf eines Zylinders eine zeitaufgelöste PIV-Technik ein, die mit einer Bildfrequenz von 250 bis 2000 Aufnahmen pro Sekunde arbeitet. Das mit dem PIV-System gewonnene Geschwindigkeitssignal an einer ausgewählten Position wird benutzt, um den einzelnen Aufnahmen eine Phasenlage zuzuordnen. Kim et al 2006 setzen diese Technik bei  $Re = 360$  in einem Wasserkanal ein, um den lock-on Vorgang der Wirbelablösung bei periodischen Störungen zu analysieren.

## Versuchseinrichtung und Meßtechnik

Der Versuchsträger besteht aus einem geschlossenen Luftkreislauf, der mit einem drehzahlvariablen Radialventilator betrieben wird. Aus einem Beruhigungsbehälter gelangt die angesaugte Luft über eine Einlaufdüse in die eigentliche Messstrecke. Der rechteckige Strömungsquerschnitt weist eine Breite von  $B= 206\text{mm}$  und eine Höhe von  $H= 70\text{ mm}$  auf. Stromab folgt ein Übergangsstück, das in das zylindrische Ansaugrohr des Ventilators führt. Auf der Druckseite kann mit Hilfe einer Drosselklappe der Durchsatz zusätzlich verändert werden. Vom Ventilatoraustritt führt die Druckleitung das Fluid zurück in den Beruhigungsbehälter. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Anlage.



Abb. 2: Foto der Versuchseinrichtung

Um ein möglichst periodisches Strömungsfeld zu erzielen, das durch äußere Einflüsse nicht leicht gestört werden kann, wurden die Messungen bei einer Reynolds-Zahl von 120 mit einem Zylinderdurchmesser von 2 mm durchgeführt. Der Zylinder wurde parallel zur Höhe in der Mitte des Kanals positioniert. Plexiglasscheiben an den Seitenwänden und auf der Oberseite erlauben den optischen Zugang. Der eingesetzte Nd-YAG Doppelpuls-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm besitzt eine Energie von 50 mJ/Puls und eine maximale Frequenz von 15 Hz. Die Lichtschnittebene befindet sich in der halben Kanalhöhe und mit der Kamera wird ein Bereich von etwa  $50 \times 45\text{ mm}^2$  im Nachlauf des Zylinders erfasst. Die Optik der Kamera ist so eingestellt, dass der gemessene Feldabschnitt mit einer Fläche von  $990 \times 890\text{ Pixel}^2$  auf dem CCD-Chip abgebildet wird. Die Bilder werden mit einer PCO-Sensi Cam Kamera und einem 35 mm Nikkor Objektiv aufgenommen. Die Blende wurde auf  $F= 2.0$  eingestellt. Die Objektivachse steht senkrecht auf der Lichtschnittebene. Der Abstand zwischen dieser und der Kamera beträgt näherungsweise 68 cm.

Der CCD-Chip erreicht eine Auflösung von  $1024 \times 1280$  Bildpunkten und ermöglicht eine maximale Wiederholrate von 250 ms. Den schematischen Aufbau der Versuchseinrichtung zeigt Abbildung 3. Durch einen Synchronizer der Fa. ILA werden die Laserpulse sowie die Aufnahme der Doppelbilder gesteuert. Zur Erfassung der PIV-Aufnahmen und anschließenden Auswertung wird die Software VidPIV (Version 4.6) der Firma ILA eingesetzt. Mit diesem System ist es möglich, in einer Messreihe insgesamt 250 Doppelbilder abzuspeichern. Um die zeitabhängige Entwicklung der Wirbelstraße hinreichend aufzulösen, wird der periodische Vorgang durch insgesamt 72 Phasenwinkel diskretisiert. Zur statistischen Auswertung der PIV-Aufnahmen sind etwa 25 Doppelbilder pro Phasenwinkel erforderlich, daraus ergeben sich insgesamt 1800 Aufnahmen. Aufgrund der 250 Doppelbilder begrenzte Speicherkapazität sind mindestens 7 Messreihen erforderlich. In den vorliegenden Untersuchungen wurden 9 Messreihen durchgeführt und insgesamt 2250 Doppelbildern aufgenommen.

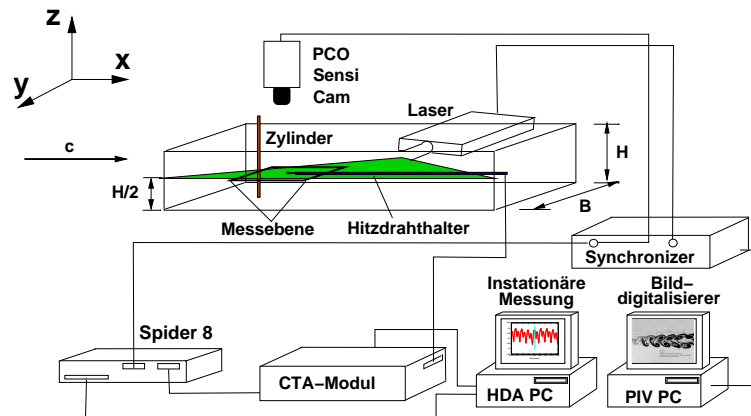


Abb. 3: Schema der Messstrecke mit Datenerfassung

Um die statistische Auswertung der PIV-Aufnahmen vornehmen zu können, muss den Bildern ein Phasenwinkel zugeordnet werden. Eine direkte Zuordnung der Doppelbilder ist nicht möglich, da der zeitliche Abstand der Aufnahmen mit 250 ms gegenüber der Periodendauer von 12 ms (siehe unten) viel größer ist. Daher wird parallel mit einer Hitzdrahtsonde ein lokales aber zeitlich hochfrequent aufgelöstes Signal aufgezeichnet. Der  $5\ \mu\text{m}$  Draht des Hitzdrahtsensors befindet sich 28 mm stromab des Wirbelstraße induzierenden Zylinders. Senkrecht zur Anströmung ist er um 5mm gegenüber dem Zylinder in y-Richtung (siehe Abb.3) verschoben. Die Position des Hitzdrahtes wurde so gewählt, um zum einen ein klares Signal der Wirbel zu erhalten und zum anderen mit der Sondenhalterung das Strömungsfeld möglichst wenig zu stören.

Die Messungen wurden bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $0.9\ \text{m/s}$  ( $\pm 0.1\ \text{m/s}$ ) durchgeführt. Hieraus resultiert eine Reynolds-Zahl von 120. Die Untersuchungen von Roshko 1954 liefern hierzu eine Strouhal-Zahl von 0,18. Zusammen mit dem Durchmesser des Zylinders führt dies auf eine Wirbelfrequenz von 81 Hz. In Verbindung mit dem CTA-Modul wird das Signal des Hitzdrahtes vom Vielstellenmessgerät Spider 8 von HMB mit einer Frequenz von 9,6 kHz abgetastet. Nach Angaben von Dantec (1998) beträgt die Grenzfrequenz des Hitzdrahtsensors mit Anemometerbrücke 120 kHz. In Verbindung mit der Datenerfassung durch das Vielstellenmessgerät erfolgt eine digitale Filterung bei 1,2 kHz mit einem Besselfilter. Ein typisches Ergebnis einer Hitzdrahtmessung zeigt Abbildung 4 ein über der Zeitachse aufgenommenes Spannungssignal. Hieraus ergibt sich eine relativ konstante Periodendauer von etwa 12 ms.

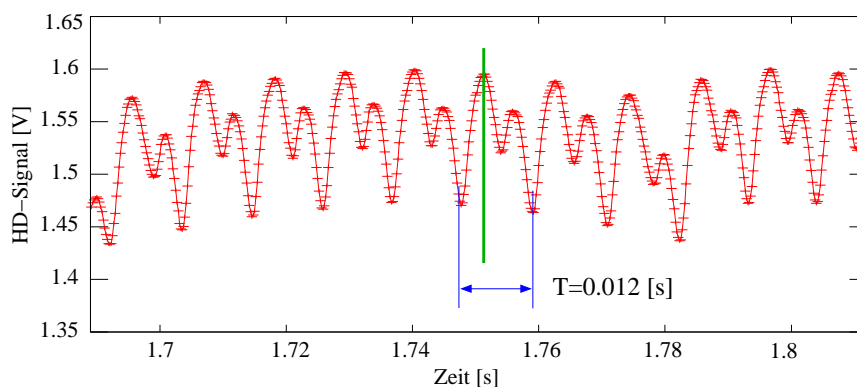


Abb. 4: Hitzdrahtsignal der Wirbelstraße mit Angabe der Periodendauer

### Analyse der Phasenlage

Mit dem Abschluss der Messungen liegt das Hitzdrahtsignal in Form diskreter Daten vor. Abbildung 5 zeigt das periodische Signal in Verbindung mit Markierungen der PIV-Aufnahmen entlang der Zeitachse. Aufgabe der im Folgenden beschriebenen Methodik ist es, den einzelnen

PIV-Bildern einen Phasenwinkel zu zuordnen. Der Algorithmus beginnt mit der Festlegung eines Fensters um die PIV-Ereignisse, das relativ willkürlich gewählt wird, wie in Abbildung 5 gezeigt, etwa 14 Perioden umfasst. Der ausgewählte Bereich um die PIV-Messung enthält damit nicht von vorne herein ein ganzzahliges Vielfaches der Periode und die anschließende FFT-Analyse weist Artefakte auf. Um das richtige Zeitfenster zu finden, wird es sukzessive verkleinert. Abbildung 6 zeigt hierzu exemplarisch für drei PIV-Messungen die Abhängigkeit der aus der FFT-Analyse hervorgegangene maximalen Amplitude von der Fenstergröße. Der zyklische Verlauf kennzeichnet mit seinen lokalen Maxima die Zeitfenster, die mit hoher Wahrscheinlichkeit gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer abdecken. Als optimales Fenster wird das mit dem Maximalwert ausgewählt. Mit der Festlegung des Zeitfensters kann dann der PIV-Aufnahme ein Phasenwinkel zugeordnet werden und es ergibt sich ebenfalls die Periodendauer. Sie ist in Abbildung 7 in einem Histogramm dargestellt.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen PIV-Aufnahmen entsprechend ihrer Phasenlage verschiedenen Klassen zugeordnet. Da, wie oben erwähnt, der periodische Vorgang in 72 Zeitpunkte aufgeteilt wird, besitzt jede Klasse eine Breite von  $5^\circ$ . Die Verteilung der jeweiligen PIV-Messungen entsprechend ihrer Phasenlage auf die Klassen zeigt die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 7. Dabei werden PIV-Messungen nicht berücksichtigt, deren zugehörige Periodendauer sich deutlich vom Mittelwert unterscheiden.

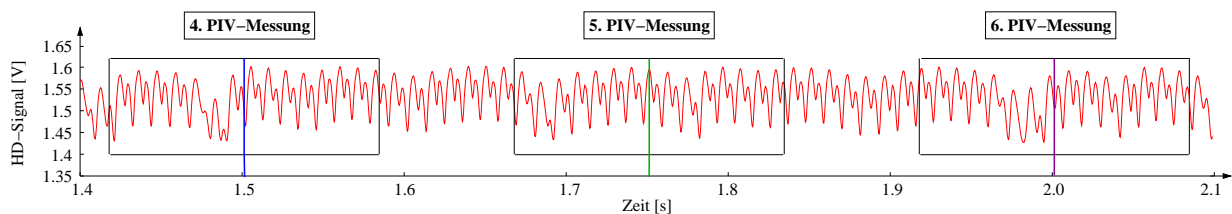


Abb. 5: Hitzdrahtsignal mit Markierung der PIV-Messung und Startfenster der FFT

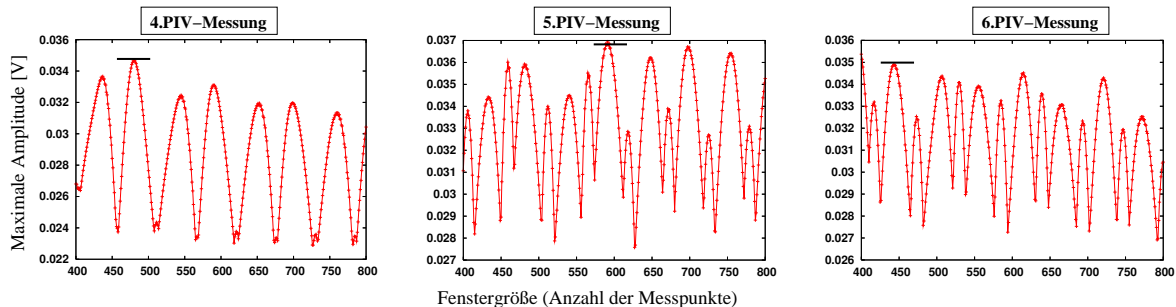


Abb. 6: Amplituden der Grundfrequenz in Abhängigkeit von der Fenstergröße

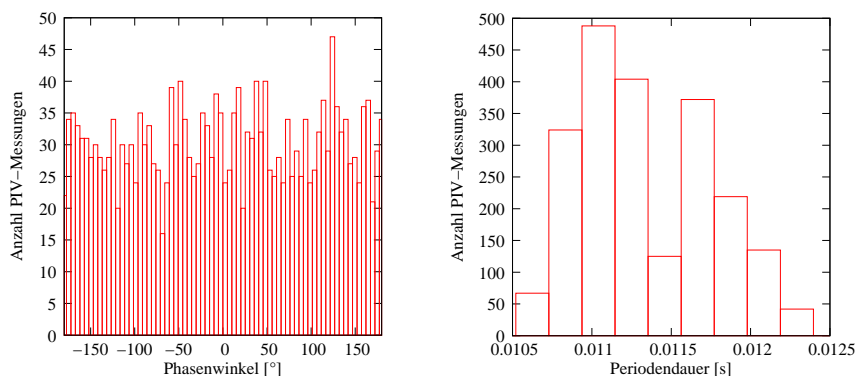


Abb. 7: Statistische Analyse der PIV-Messungen, links: Histogramm der Phasenlage rechts: Histogramm Periodendauer

## Ergebnisse der Auswertung

Zur Auswertung der Doppelbilder wird ein Interrogationsfenster von  $64 \times 64$  Pixeln benutzt, wobei der Abstand der einzelnen Fenster 16 Pixel beträgt (75% überlappend). Die sich aus den PIV-Bildern einer Klasse ergebenden Geschwindigkeitskomponenten werden anschließend gemittelt. Auf diese Weise gelingt es, den im Vergleich zur Bildwiederholungsrate des PIV-Systems hochfrequenten Prozess der Wirbelablösung zu erfassen. Als Ergebnis sind in Abbildung 10 die gemittelten Strömungsfelder für 9 Phasenwinkel einer Periode gezeigt. Um in diesen Darstellungen die Entwicklung der Wirbel deutlicher sichtbar zu machen, ist von den Geschwindigkeitskomponenten in x-Richtung (siehe Abb. 3) der Mittelwert von  $0,9 \text{ m/s}$  subtrahiert worden. Der schraffierte Teil markiert den Bereich der Hitzdrahtsonde samt Halter (s. Abb.8), der in der Auswertung der PIV-Bilder ausgeblendet wurde. Innerhalb des betrachteten Fensterausschnitts ist der Transport eines Wirbels während einer Periode in den Darstellungen in Abbildung 10 durch die Kennzeichnung des Zentrums mit dem Symbol  $+$  verdeutlicht.

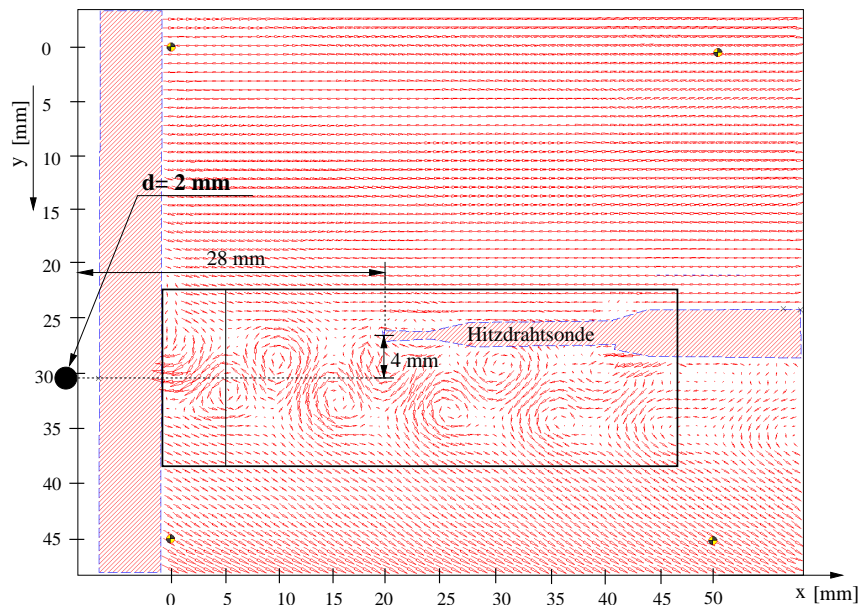


Abb. 8: Kalibrierfenster mit Positionen des Zylinders und der Hitzdrahtsonde

Einen genaueren quantitativen Einblick in die instationäre Strömung, liefert die in Abbildung 9 gezeigte lokale Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung während einer Periode. Die ausgewählten Koordinaten liegen bei  $x=0$  und  $y/d=16$ . Wie die Darstellung zeigt, sind der ersten Harmonischen, die als durchgezogene Linie eingetragen sind, deutliche Schwankungsanteile überlagert. Sie geben zum einen den chaotischen Charakter der Strömung wieder. Andererseits sind sie auch eine Folge der Mittelung innerhalb der Klassen, die unterschiedliche Verteilungen der Phasenwinkel aufweisen.

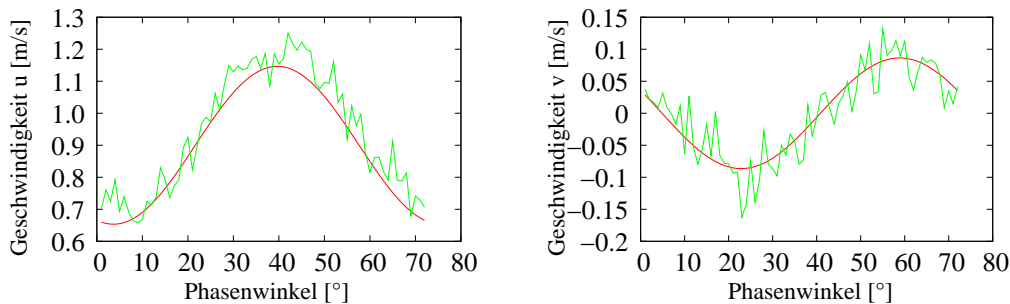


Abb. 9: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten in  $x$  und  $y$ -Richtung während einer Periode an den Koordinaten  $x=0$  und  $y=32$ .

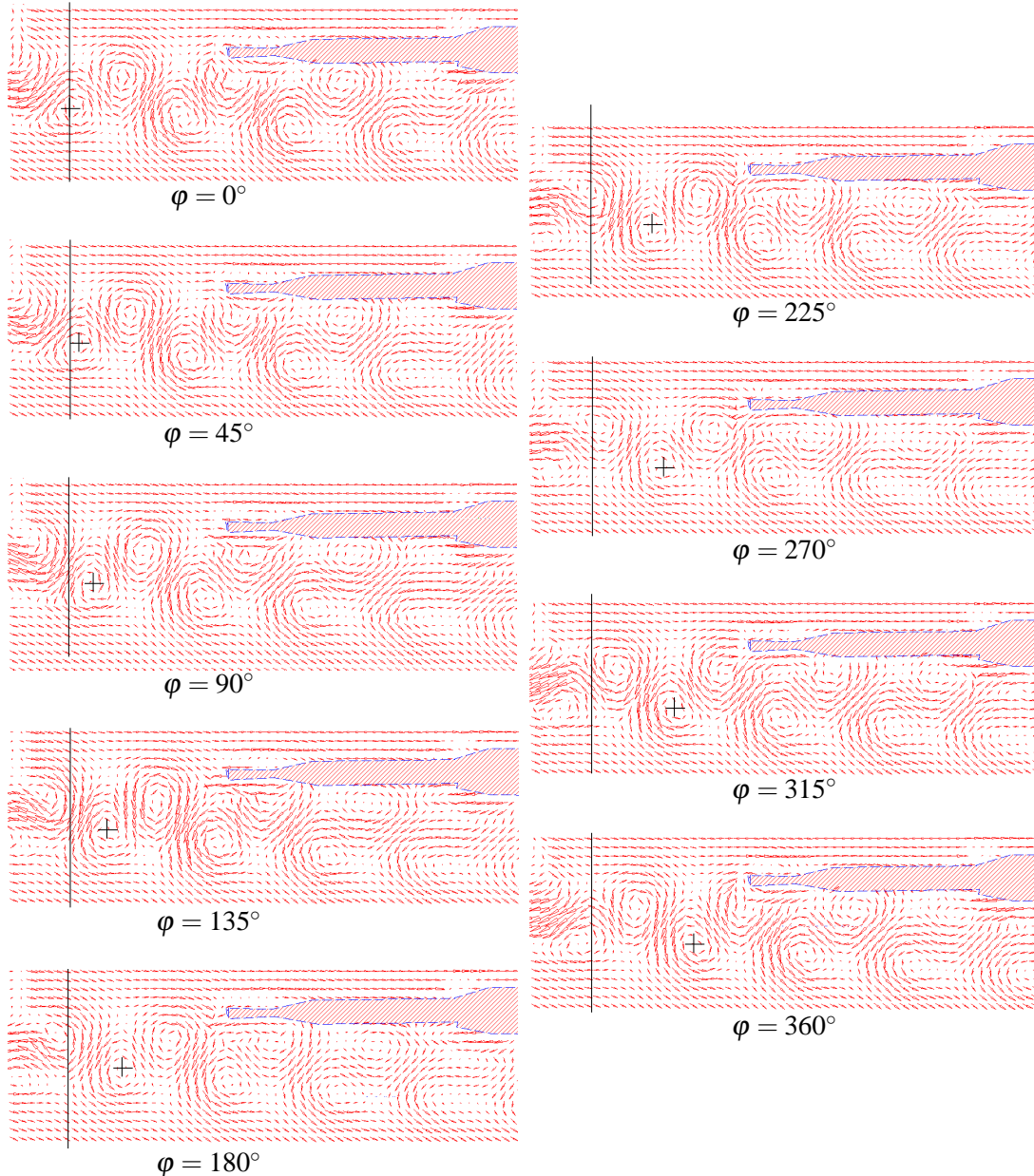


Abb. 10: Bilderfolge der Wirbelablösung als Ergebnis der Auswertung der PIV-Bilder

### Fazit

Eine Reihe wichtiger Strömungsvorgänge in technischen Anwendungen sind durch selbsterregte Phänomene geprägt, die aufgrund ihrer komplexen Wechselwirkungen bisher nur ungenügend verstanden sind. Einer detaillierten experimentellen Analyse entziehen sich diese Vorgänge oft aufgrund der Dreidimensionalität und Zeitabhängigkeit. Weisen diese Prozesse einen überwiegend periodischen Charakter auf, so kann das hier beschriebene Verfahren eingesetzt werden, um mit konventioneller PIV-Technik den periodischen Anteil der Strömung sichtbar zu machen. Am Beispiel der Karmanschen Wirbelstraße konnte hierzu die Funktionalität des Verfahrens demonstriert werden. Überwiegen dagegen chaotische Prozesse ist eine Bestimmung der Phasenwinkel nicht mehr möglich. Auf der anderen Seite ist in solchen Fällen die Anregung der strömungsführenden Bauteile zu Resonanzschwingungen entsprechend reduziert.

## Literatur

- BAUMGARTNER, M., F. KAMEIER UND J. HOURMOUZIADIS (1995). Non-Engine Order Blade Vibration in a High Pressure Compressor. In *12th International Symposium on Airbreathing Engines, Melbourne, Australia*, Nummer ISABE 95-7094, Seiten 1019–1030.
- BERGER, E. (1964). Die Bestimmung der hydrodynamischen Größen einer Karmansche Wirbelstrasse aus Hitzdrahtmessungen bei kleinen Reynoldsschen Zahlen. *Zeitschrift für Flugwissenschaften*, 12(2):41–59.
- DANTEC (1998). Constant Temperature Anemometer – Equipment Catalogue. Katalog der Firma DANTEC Elektronische Messgeräte.
- ESTEVALDORAL, J., S. GOGINENI, W. COPENHAVER, G. BLOCH UND M. BRENDEL (2000). Flow Field in a Low-Speed Axial Fan: a DPIV Investigation. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, Seiten 11–21.
- KARMAN, TH. VON (1912). Über den Mechanismus des Widerstands den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. *Göttingen Nachr. Math. Phys. Kl.*, 12(509).
- KIM, WONTAE, JUNG YUL YOO UND JAEYONG SUNG (2006). Dynamics of vortex lock-on in a perturbed cylinder wake. *American Institut of Physics*, 18(074103).
- LEHR, A. UND A. BÖLCS (2000). Application of a Particle Image Velocimetry (PIV) System to the Periodic Unsteady Flow Around an Isolated Compressor Blade. In *15th Bi-annual Symposium on Measurement Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, University of Florence*.
- MAILACH, R., H. SAUER UND K. VOGELER (2001). The Periodical Interaction of the Tip Clearance Flow in the Blade Rows of Axial Compressors. In *Proceedings of the ASME TURBOEXPO 2001, ASME Paper 2001-GT-299*.
- ROSHKO, ANATOL (1954). On the development of turbulent wakes from vortex streets. Technischer Bericht 1191, NACA.
- SUNG, J. UND J. Y. YOO (2001). Three-dimensional phase averaging of time-resolved PIV measurement data. *Meas. Sci. Technol.*, 12:655–662.
- VOGES, M., R. SCHNELL, C. WILLERT UND R. MÖNIG (2008). Investigation of Blade Tip Interaction with Casing Treatment in a transonic Compressor- PART 1: Particle Image Velocimetry. In *Proceedings of ASME Turbo Expo, Power for Land, Sea and Air, GT2008-50210, Berlin, Germany*.
- WEIDENFELLER, J. (2002). Experimentelle Untersuchung der stationären und instationären Strömung eines Axialverdichtergitters. VDI Fortschrittsbericht Nr. 429, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.