

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DER ROTIERENDEN INSTABILITÄT ANHAND GEKOPPELTER PIV- UND HITZDRAHTMESSUNGEN

M. Teich, G. Hermle, M. Lawerenz, Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Fachgebiet Strömungsmaschinen, Kurt-Wolters-Straße 3, 34109 Kassel, Deutschland

Zusammenfassung

Die Autoren präsentieren in dieser Arbeit Hitzdraht getriggerte PIV-Messungen eines periodischen Phänomens in einer hochbelasteten ringförmigen Verdichter Stator-Kaskade. Dieses stationäre Gitter ist Bestandteil des am Fachgebiet Strömungsmaschinen installierten Ringgitterwindkanals, der es ermöglicht instationäre Effekte ohne Wechselwirkung mit rotierenden Schaufelreihen zu untersuchen. Im Fokus der Untersuchungen steht dabei das Phänomen der rotierenden Instabilität (RI). Bei RI handelt es sich um ein selbstinduziertes Phänomen, das bei hoher aerodynamischer Schaufelbelastung in Erscheinung tritt und sich als periodisch schwankendes Drucksignal darstellt, welches sich in Umfangsrichtung bewegt. Basierend auf zeitgleich durchgeführten PIV- und Hitzdrahtmessungen innerhalb einer Schaufelpassage wird die zeitliche Entwicklung des Strömungsfeldes bei RI näher untersucht. Um ein zeitliches Amplituden- und Phasenspektrum zu erhalten, wird das Hitzdrahtsignal mittels einer Wavelet-Transformation analysiert. Anhand des Spektrums ist es möglich nur die PIV Ergebnisse zu berücksichtigen, die das Phänomen RI aufzeigen. Anschließend können die zugehörigen Phasenwinkel bestimmt werden, um die PIV Ergebnisse entsprechend ihrem Winkel in Klassen zu sortieren. Der Mittelwert jeder Klasse repräsentiert das mittlere Strömungsfeld des entsprechenden Phasenwinkels. Anschließend kann die statistisch mittlere Periode der RI durch die diskreten Ensemble-gemittelten PIV Ergebnisse dargestellt werden. Durch die vorgestellte Methode ist es möglich die zeitliche Auflösung des PIV-Systems deutlich zu verbessern ungeachtet der eigentlichen technischen PIV-Messrate. In dem hier vorgestellten Fall ist die zeitliche Auflösung des statistischen Verfahrens vergleichbar mit einer Messrate entsprechend 1500 Hz, wohingegen die technische PIV-Messrate bei 4 Hz liegt. Die erreichbare zeitliche Auflösung ist nur durch die genutzte Anzahl an Phasenklassen und entsprechend durch die Anzahl der PIV Messungen limitiert.

1. EINLEITUNG

Auch heute noch basiert die aerodynamische Auslegung von Turbomaschinen im Wesentlichen auf stationären Berechnungen und Simulationen der Strömungsvorgänge. Im Gegensatz dazu ist die Strömung in Turbomaschinen hochgradig instationär und wird durch dreidimensionale Vorgänge beeinflusst. Vor diesem Hintergrund sind experimentelle Untersuchungen instationärer Strömungsvorgänge hinsichtlich eines besseren und tieferen Verständnisses notwendig, um Effizienz und Stabilität moderner Turbomaschinen weiter zu steigern. Eine geeignete Methode instationäre Vorgänge experimentell darzustellen ist mittels *high speed particle image velocimetry* (HS-PIV) gegeben. Übliche PIV-Systeme besitzen jedoch nur eine Messrate unterhalb von 100 Hz. Gemäß des Nyquist-Kriteriums lassen sich halb so viele Frequenzen darstellen, wie Zeitschritte existieren. Um diese Einschränkung zu umgehen wurden verschiedene Methoden angewandt, um höhere Frequenzen auflösen zu können. Viele instationäre Strömungsphänomene in Turbomaschinen sind an die Drehzahl gekoppelt. Daher ist es möglich Rotor-Winkel getriggerte PIV-Messungen während der Rotation durchzuführen, um phasenabhängige Informationen zu erhalten. Im Gegensatz dazu ist diese Art des Triggerns hinsichtlich selbstinduzierter Strömungsphänomene in stehenden Kaskaden nicht möglich. Um dennoch solche hochfrequenten Effekte beobachten zu können, ist es üblich High Speed PIV-Systeme zu nutzen. Dennoch ist es auch mittels High Speed PIV-Systeme schwierig instationäre Phänomene innerhalb einer Kaskade darzustellen, da der Zeitpunkt, an welchem das Phänomen in Erscheinung tritt, nicht offensichtlich ist. Um periodische Strömungsphänomene anhand von PIV darzu-

stellen ist es essentiell das zugehörige Frequenzspektrum und den Phasenwinkel zu kennen. Bezüglich dieser Überlegungen wird im Folgenden eine Methode präsentiert, die es ermöglicht ein PIV-System mit geringer Messrate für die Messung hochfrequenter instationärer Phänomene einzusetzen.

NOMENKLATUR

<i>RGWK</i>	Ringgitterwindkanal
<i>DEHS</i>	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
<i>f</i>	Frequenz
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>h</i>	Kanalhöhe
<i>i</i>	Inzidenz
<i>OP</i>	Betriebspunkt
<i>WALS</i>	Wavelet Autoleistungsspektrum
<i>PSDF</i>	power spectral density function
<i>RI</i>	rotierende Instabilität
<i>t</i>	Zeit
<i>z</i>	axiale Koordinate
<i>λ</i>	Wellenlänge

Indizes

<i>z</i>	axiale Geschwindigkeitskomponente
<i>t</i>	tangentiale Geschwindigkeitskomponente

2. ROTIERENDE INSTABILITÄT

Kameier [1] und Baumgartner et. al. [2] waren unter den Ersten, die in dem Frequenzspektrum von über den Umfang verteilten Drucksensoren im Radialspalt eines Rotors Anzeichen von RI beobachteten. Die Reduktion des Mas-

senstroms resultierte in einer breitbandigen Amplitudenerhöhung deutlich unterhalb der Blattfolgefrequenz. Diese breitbandige Erhöhung unterscheidet sich deutlich von den scharfen, schmalen Peaks der rotierenden Ablösung. Baumgartner et. al. [2] konnte zeigen, dass die breitbandige Amplitudenerhöhung aus mehreren äquidistanten Peaks besteht, wobei der Abstand zwischen den einzelnen Spitzen mit der Drehzahl des Phänomens in Zusammenhang gebracht werden kann. Eine weitere Reduktion des Massenstroms beim Androsseln führt laut Kameier und Neise [3] zu einem Anstieg der RI-Amplituden bei gleichzeitiger Verschiebung zu niedrigeren Frequenzen. Mailach et. al. [4] und Schropp et. al. [5] ermittelten eine mittlere Rotationsgeschwindigkeit der RI, die zwischen 48 % - 60 % der Rotor-umlaufgeschwindigkeit liegt. In Untersuchungen von Weidenfeller [6] beträgt die Geschwindigkeit 38 % bezüglich der Umfangskomponente der Zuströmgeschwindigkeit in einem Ringgitterwindkanal (RGWK). Anhand von über den Umfang versetzten Drucksensoren konnte Kameier [1] den diskreten Peaks in der breitbandigen Amplitudenerhöhung unterschiedliche Umfangsmode zuordnen. Zudem konnte er experimentell nachweisen, dass eine Reduktion des Kopfspaltes zu einer Verringerung der Amplituden der RI führt. Durch eine Ummantelung des Rotors mit einer selbstklebenden Folie, die den Kopfspalt nahezu eliminierte, konnte die Existenz der RI jedoch nicht beseitigt werden. Neue Untersuchungen von Beselt et. al. [7] bestätigen an einem Axialverdichterringgitter, dass die Existenz der rotierenden Instabilität nicht an einen Radialspalt geknüpft ist. Vo [8] sieht eine enge Verbindung zwischen RI und rotierender Ablösung, da die Strömungsbedingungen, die zur RI führen, dem Auftreten von Spike bedingter Ablösung vorausgehen. Demnach kann RI als Anzeichen für eine bevorstehende Spike induzierte rotierende Ablösung betrachtet werden. Zusätzlich konnten RI-bedingte Strukturanregungen von Baumgartner et. al. [2] in der ersten Stufe eines axialen Hochdruckverdichters nachgewiesen werden. Vor diesem Hintergrund ist die weitere Untersuchung des Phänomens aus aerodynamischer und mechanischer Sicht von großem Interesse.

3. VERSUCHSAUFBAU

3.1 Prüfstand

Die vorliegenden Untersuchungen wurden am RGWK der Universität Kassel im Fachgebiet Strömungsmaschinen durchgeführt. Gespeist wird der Prüfstand mit Luft durch einen radialen Versorgungsverdichter mit einem maximalen Druckverhältnis von 1,8 und einem maximalen Massendurchsatz von 8 kg/s. Zur Gewährleistung konstanter Zuströmbedingungen bezüglich des Ringgitters wird der Luftstrom nach dem Verdichter durch einen Wärmeübertrager geleitet, der die Luft auf eine konstante Temperatur regelt. Im Wesentlichen besteht das Ringgitter aus drei Bereichen. An der ersten Position befindet sich ein Beschleunigungsgitter bestehend aus 15 Schaufeln, das eine Umlenkung von 55° bewirkt. Stromab folgen 15 variable Klappen mit NACA0020-Profilierung, welche eine Variation des Zuströmwinkels um $\pm 20^\circ$ ermöglichen. Diese beiden Gitter erzeugen Drall und simulieren somit die Abströmung eines Rotors. Das Ringgitter, das im Fokus der Untersuchungen steht, besteht aus 17 Schaufeln, die als Stator an dem Gehäuse befestigt sind und einen Nabenspalt von

0,4 mm aufweisen. Die Schaufeln des Stators basieren auf einer skalierten Version von prismatischen Schaufeln, welche von Gallus und Mertens [9] untersucht wurden. Tabelle 1 sind die geometrischen Größen des Gitters zu entnehmen. Stromab des Messgitters befinden sich an der dritten Position sechs Stützrippen, die zur Lagerung der Nabe im Prüfstand dienen und einem NACA0020 Profil nachempfunden sind.

Sehnenlänge	50 mm
Metallwinkel im Gittereintritt	43°
Metallwinkel im Gitteraustritt	21°
Staffelungswinkel	26°
Schaufelanzahl	17
Verhältnis Höhe zu Sehnenlänge	1,1
relative Teilung bei 50% Kanalhöhe	1,01
Verhältnis Radialspalt zu Sehnenlänge	0,008

TABELLE 1: Daten der Ringgitterbeschaukelung

3.2 Messtechnik

Für die experimentellen Untersuchungen werden ein PIV-System sowie ein 1D-Hitzdrahtanemometer verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Bild 1 dargestellt. Stromab des Messgitters befindet sich ein Laser-Endoskop, das den Laserstrahl um 90° umlenkt und innerhalb des Messgitters einleitet. Dabei ist der entstehende Laserlichtschnitt rechtwinklig zu einer Schaufel bei 14,5% Kanalhöhe ausgerichtet. Um einen optischen Zugang für eine senkrecht zu diesem Laserlichtschnitt ausgerichtete Kamera zu erhalten, wird ein Teil des Gehäuses durch Plexiglas ersetzt. Die Größe des aufgenommenen Bereichs beläuft sich dabei auf etwa 90 x 90 mm². Bei dem für diese Arbeit verwendeten Laser handelt es sich um einen ND-YAG Doppelpuls laser, wobei die maximale Leistung 50 mJ/Puls bei einer Wellenlänge von $\lambda = 532$ nm beträgt. Die so erzeugten Doppelbilder werden von einer digitalen Kamera (CCD-chip mit 1024 x 1280 Pixeln) erfasst, wobei ein 35 mm Objektiv mit F2.0 genutzt wird. Ein Partikelgenerator erzeugt ein DEHS Aerosol mit einer typischen Partikelgröße entsprechend 1 μ m und wird über zwei Lanzen, welche sich 2,8 m stromauf des Drallerzeugers befinden, eingebracht. 17,5 mm stromauf der Vorderkante des Messgitters befindet sich im verschatteten Gebiet eine 1D-Hitzdrahtsonde (Dantec, Typ 55P11), die rechtwinklig zur Nabe ausgerichtet ist und sich in radialer Richtung auf Höhe des Laserlichtschnitts befindet. Der Draht der Sonde besteht aus platinierter Wolfram und besitzt einen Durchmesser von 5 μ m. Die Ausrichtung des Drahtes ist in axiale Richtung orientiert, so dass die Umfangskomponente der Geschwindigkeit gemessen wird. Sowohl das Hitzdrahtsignal als auch das Spannungssignal des PIV-Lasers werden von einem QuantumX Datenlogger der Firma HBM aufgezeichnet. Die Messreihen wurden mit einer Messrate von 4800 Hz unter Verwendung eines Tiefpassfilters (Butterworth, 2000 Hz) aufgezeichnet und betragen jeweils 15 Minuten. Insgesamt resultieren daraus 3600 PIV Doppelbilder je Messreihe.

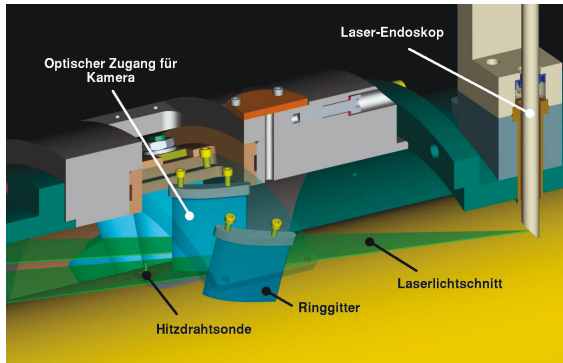


BILD 1: Versuchsaufbau aus [10]

4. SPEKTRALANALYSE

Die Hauptaufgabe der vorgestellten Methode besteht darin, die Phasenlage des zeitaufgelösten Signals eines Strömungsphänomens darzustellen. Bei RI handelt es sich um ein (teil-)periodisches Phänomen, das zeitlich nicht durchgängig existiert. Daher wird zunächst im Frequenzspektrum festgestellt, ob RI vorliegt, um anschließend den Phasenwinkel zu bestimmen. Neben einer ausreichend hohen spektralen Auflösung muss die Analysemethode zudem eine gute zeitliche Auflösung sicherstellen. Bei einer klassischen Fourier-Transformation muss bezüglich einer feinen spektralen Auflösung ein Ensemble mit vergleichsweise langer Dauer genutzt werden. Kurzzeitig vorliegende hochfrequente Strömungsphänomene werden dadurch in den Spektren unterrepräsentiert. Eine Reduktion des Ensembles führt zwar einerseits zu einer besseren zeitlichen Auflösung, aber andererseits aufgrund der geringeren Fensterbreite zu einer gröberen spektralen Auflösung. Eine Methode, die neben einer guten spektralen Auflösung ebenfalls eine feiner zeitliche Auflösung sicherstellt, ist die Wavelet-Transformation, die daher auch in dieser Arbeit genutzt wird. Hermle [11] setzte diese Transformation ein, um das zeitliche Frequenzspektrum von in der Nabe installierten instationären Durchsensoren während RI darzustellen.

5. Methode

Zur Analyse der zeitlichen Entwicklung eines Strömungsphänomens mittels PIV muss sichergestellt werden, dass die Messrate des PIV-Systems mindestens doppelt so hoch ist, wie die des untersuchten Effekts. Kann dies nicht gewährleistet werden, so ist es nicht möglich anhand der chronologischen Abfolge der PIV-Messungen die Entwicklung des Strömungsfeldes zeitlich korrekt wiederzugeben. Folglich können hochfrequente Phänomene nur mit Hilfe von High Speed PIV-Systemen detektiert werden. Die im Folgenden vorgestellte Methode stellt ein alternatives Verfahren dar, um hochfrequente, periodische Effekte mittels PIV darzustellen. Hierbei wird neben dem PIV-System mit geringer Messrate simultan ein zweites zeitlich hochauflösendes Messverfahren verwendet. In der vorliegenden Arbeit kommt hierfür ein Hitzdrahtanemometer zum Einsatz. Die Messrate des zweiten Systems sollte dabei deutlich höher sein, als die Frequenz des zu untersuchenden Effekts. Die Verwendung dieses zweiten Messsystems ermöglicht die zeitliche Auflösung periodischer Signale. Folglich kann zu jedem Zeitpunkt einer PIV-Messung der Phasenwinkel anhand des Hitzdrahtsignals bestimmt werden. Anschlie-

ßend können die PIV-Messungen entsprechend dem ermittelten Phasenwinkel sortiert werden, so dass als Ergebnis die Entwicklung des Effekts über eine Periode gewonnen wird. Bild 2 zeigt schematisch die Grundidee der Methodik.

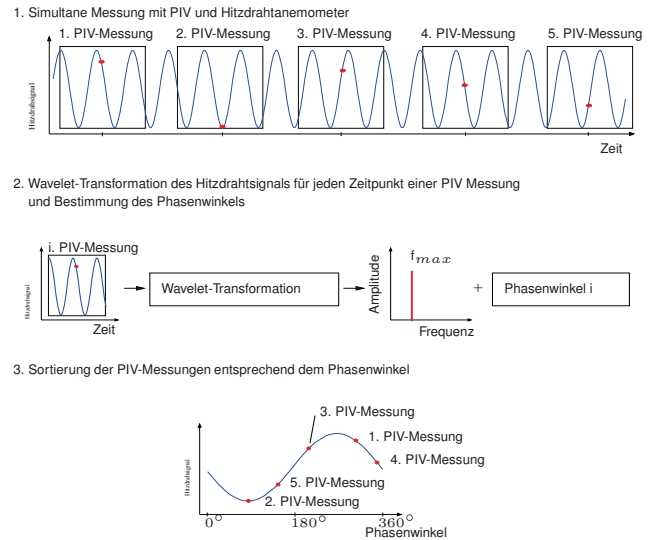


BILD 2: Methodik

Im ersten Schritt werden zeitgleich Messungen mit dem PIV-System und Hitzdrahtanemometer durchgeführt. Dabei ist es wichtig, dass die Zeitpunkte, an denen PIV-Doppelbilder aufgenommen werden, exakt den Messreihen des Hitzdrahtsignals zugeordnet werden können. Das Hitzdrahtsignal (blau) gibt den Verlauf der gemessenen Größe exakt wieder. Die Zeitpunkte, zu denen eine PIV-Messung durchgeführt wurde, sind durch rote Punkte kenntlich gemacht und würden bei chronologischer Anordnung nicht dem tatsächlichen periodischen Verlauf entsprechen. Daher wird zunächst im zweiten Schritt eine Wavelet-Transformation des Hitzdrahtsignals zu jedem Zeitpunkt einer PIV-Messung durchgeführt, um den Phasenwinkel in Abhängigkeit der Frequenz zu bestimmen. (In dem vorliegenden Beispiel entspricht das Signal des Phänomens einem Sinusverlauf mit gleichbleibender Frequenz. Die Analyse eines realen Signals würde zu einem Amplitudenspektrum führen, in dem mehrere Frequenzen vertreten sind.) Im letzten Schritt werden die einzelnen PIV-Bilder entsprechend ihrem Phasenwinkel sortiert, so dass die zeitliche Entwicklung des untersuchten Phänomens über eine Periode dargestellt werden kann. Obgleich diese Methode bereits in verschiedenen Bereichen erfolgreich eingesetzt wurde [12], [13], [14], wurde dieser Ansatz bisher zur Analyse von RI nicht eingesetzt. Im Folgenden wird bezüglich der eben vorgestellten Methodik auf eine Besonderheit eingegangen, die bei der realen Anwendung berücksichtigt werden muss. Aus Arbeiten von Weidenfeller [6] sowie Hermle und Lawrenz [15] ist bekannt, dass bei diesem Betriebspunkt RI für 45, 90, 120 und 175 Hz vorliegt, wobei den einzelnen Frequenzen Umfangsmoden der Ordnung eines bis vier zugeordnet werden können, siehe Bild 3.

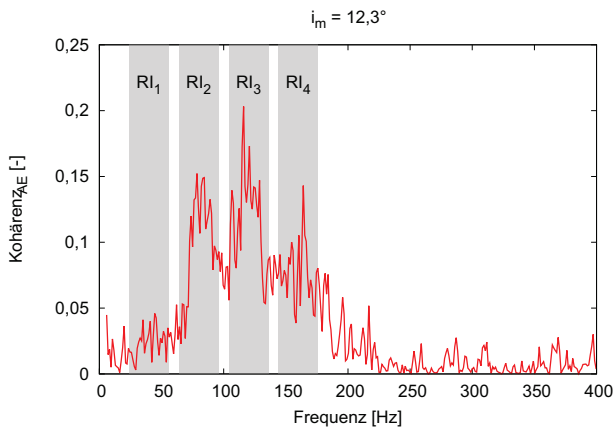


BILD 3: Kohärenz zwei um 20° versetzter in der Nabe installierter Durcksensoren des RGWK aus Messungen von Hermle [15]

Wie bereits erwähnt, werden zunächst im ersten Schritt zeitgleich Messungen mit PIV und Hitzdrahtanemometer durchgeführt. Um eine einheitliche zeitliche Zuordnung von PIV-Messung und Hitzdrahtsignal zu gewährleisten, wird zusätzlich das Spannungssignal des Lasers (Q-Switch-Signal) aufgezeichnet. Laut Hermle [10] liegt hinsichtlich der dominanten RI-Frequenzen (45, 90, 120 und 175 Hz) keine durchgängige Existenz vor. Folglich muss, ergänzend zur vorgestellten Methode, vor der Bestimmung des Phasenwinkels die Existenz der RI überprüft werden. Hierfür wird das Wavelet Autoleistungsspektrum (WALS) des Hitzdrahtsignals genutzt. Um PIV-Messungen zu erhalten, die nur den Einfluss einer bestimmten RI-Mode aufweisen, werden nur die Doppelbilder verwendet, welche im WALS des Hitzdrahtsignals ein lokales Maximum im relevanten Frequenzbereich aufweisen. Zusätzlich wird, wenn dieses Kriterium erfüllt ist, der Phasenwinkel bestimmt. PIV-Messungen, die ein lokales Maximum außerhalb des vorgegebenen Frequenzintervalls besitzen, zeigen Störungen oder andere Effekte und werden nicht weiter berücksichtigt.

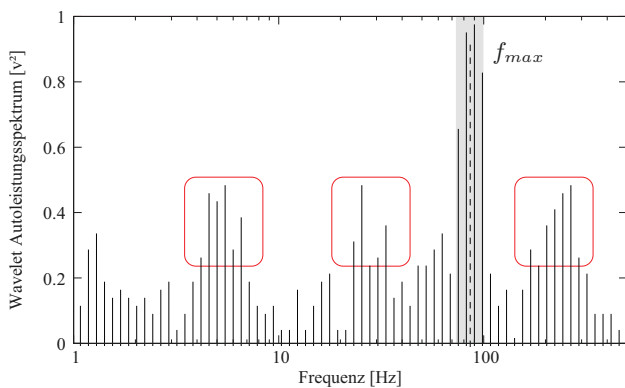


BILD 4: Exemplarisches WALS zum Zeitpunkt einer PIV-Messung mit Störanteilen

Bezüglich der weiteren Analyse werden nur die Spektren herangezogen, zu denen eine PIV-Messung vorliegt und die den Einfluss von RI zeigen. Dabei basieren die folgenden Ergebnisse auf der zweiten RI-Mode, die, ent-

sprechend Bild 3, eine charakteristische Frequenz im Bereich 76 bis 100 Hz besitzt. Die Idee hinter dieser Art der Filterung ist, dass eine im Hitzdrahtsignal dominante RI-Mode auch hinsichtlich des Geschwindigkeitsfeldes innerhalb der PIV-Messungen dominant sein muss. Bild 4

entspricht exemplarisch dem WALS des Hitzdrahtsignals zum Zeitpunkt einer PIV-Aufnahme, die, gemäß dem Kriterium $76 \text{ Hz} \leq f_{max} \leq 100 \text{ Hz}$, den Einfluss der zweiten RI-Mode zeigt. Neben einer dominanten Frequenz, bei ca. 90 Hz, sind weitere Effekte vorhanden (rot eingekreist), die die Strömung beeinflussen. Um solche stochastischen Frequenzen zu eliminieren, werden Phasenklassen gebildet. Innerhalb einer Phasenklasse wird anschließend aus allen darin vorliegenden PIV-Messungen ein Ensemble-Mittel berechnet, so dass für jede Phasenklasse ein mittleres Geschwindigkeitsfeld vorliegt. In diesen Untersuchungen hat sich eine Wahl von neun Klassen als sinnvoll erwiesen. Tabelle 2 gibt einen Überblick bezüglich einer Messebene bei $h = 14,5\%$ Kanalhöhe über die resultierenden Phasenklassen.

TABELLE 2: Phasenklassen bei 14,5% Kanalhöhe

Phasenklasse	Phasenwinkel	PIV-Bilder
[-]	[°]	pro Klasse [-]
1	-180 – -140	82
2	-140 – -100	59
3	-100 – -60	69
4	-60 – -20	65
5	-20 – 20	56
6	20 – 60	69
7	60 – 100	52
8	100 – 140	59
9	140 – 180	51
	Σ	562

Bemerkenswert ist, dass aus insgesamt 3600 PIV-Doppelbildern nur 562 den Einfluss der zweiten RI-Mode innerhalb des Strömungsfeldes zeigen. Dies entspricht 15,6% der Messreihe. Obgleich alle resultierenden PIV-

Messungen aufgrund der Filterung nur den Einfluss der zweiten RI-Moden darstellen sollten, ist es möglich, dass das Ensemble-Mittel der Phasenklassen Fehlmessungen enthält. Dieser negative Einfluss kann einerseits durch Störungen innerhalb der Strömung und andererseits durch statistische Fehler während der PIV-Analyse verursacht werden. Um dem entgegenzuwirken, kann einerseits die Anzahl der PIV-Messungen erhöht oder die Anzahl verwendeter Phasenklassen verringert werden. Ersteres wird durch eine längere Messzeit erreicht, wodurch wiederum die zu verarbeitende Datenmenge stark zunimmt. Im zweiten Fall wird die zeitliche Auflösung reduziert. Um diese Nachteile zu umgehen und gleichzeitig die störenden Effekte zu verringern, wird eine Filterung angewandt. Daher wird für die axialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten in jedem

Ortspunkt im PIV-Messgebiet eine Fast Fourier Transformation (FFT) über den Phasenklassen durchgeführt. Anschließend können die Geschwindigkeitsvektoren durch die dominante Harmonische der FFT rekonstruiert werden, so dass untergeordnete Frequenzanteile sich herausfiltern lassen. Es hat sich gezeigt, dass die mit der ersten Harmonischen gefilterten Verläufe die Änderung der Komponenten gut wiedergeben. Aus diesem Grund werden die im Folgenden darstellenden Vektorfelder der Geschwindigkeit anhand der ersten Harmonischen rekonstruiert.

6. ERGEBNISSE

Die experimentellen Untersuchungen wurden bei einer Mach-Zahl von 0,3 und einer Inzidenz von $12,3^\circ$ durchgeführt, wobei der Betriebspunkt in der Zuströmung bei 50% Kanalhöhe eingestellt wurde. Die Geschwindigkeit sowie die Inzidenz wurden in der Zuströmung mit einer pneumatischen Fünflochsonde, die 17,5 mm stromauf der Vorderkante installiert war, gemessen. Die Reynolds-Zahl liegt bei dem eingestellten Betriebspunkt bei 420 000. Aus früheren Untersuchungen [6, 15] ist bekannt, dass für diesen Betriebspunkt RI vorliegt. Bild 5 zeigt das mittlere Geschwindigkeitsfeld für alle 562 PIV-Messungen bei 14,5% Kanalhöhe. Zusätzlich sind die Positionen der Schaufel (schraffiert) und die des Hitzdrahtanemometers (Kreuz) kenntlich gemacht. Bedingt durch die Anordnung des Laser-Endoskops stromab des Messgitters resultiert ein verschattetes Gebiet stromauf der Schaufel. Das Hitzdrahtanemometer wurde innerhalb des verschatteten Gebiets installiert, um eine negative Auswirkung auf die PIV-Messung durch Reflexionen zu vermeiden. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich an der Schaufelvorderkante.

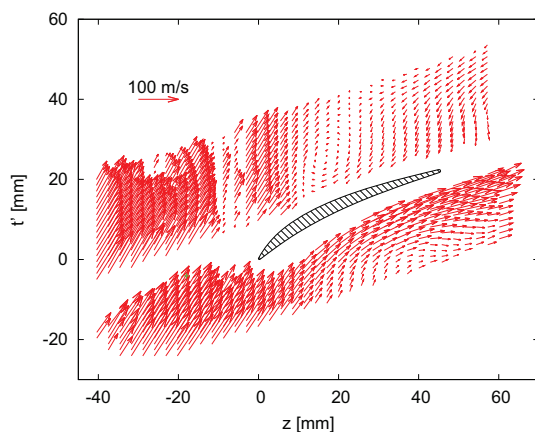


BILD 5: Mittleres Geschwindigkeitsfeld 2. RI-Mode bei 14,5% Kanalhöhe aus [10]

Saugseitig wird die Strömung verzögert und trifft bei etwa $z = 10$ mm auf eine starke Ablösung, so dass die Zuströmung an dieser Stelle eine Umlenkung in Umfangsrichtung erfährt. Der Ursprung des Ablösegebiets liegt in einem ausgebildeten Hub-Corner-Stall, der bereits im Auslegungspunkt ($i_m = 0^\circ$) vorhanden ist. Innerhalb dieser Ablösung ist eine Rotationsrichtung der Zirkulation entsprechend dem Uhrzeigersinn zu erkennen. Auf der Druckseite ist der Einfluss des Hub-Corner-Stalls der Nachbarschaufel zu erkennen. Ausgehend von der Vorderkante ist ab $z = 10$ mm und $t =$

-10 mm die Geschwindigkeit deutlich reduziert. Die Größe der Ablösung nimmt in Umfangsrichtung ab etwa $z = 60$ mm wieder ab. Durch die Zirkulation des Hub-Corner-Stalls resultiert auf der Druckseite bei $z = 60$ mm eine erhöhte Umlenkung. Die Bilder 6 und 7 zeigen die zeitliche Entwicklung des Strömungsfeldes basierend auf den Ensemble-gemittelten Phasenklassen entsprechend Tabelle 2, wobei nur jede zweite Klasse dargestellt ist. Dabei bilden die Phasenklassen eine Periode der zweiten RI-Mode ab. Für jede Phasenklasse wurde das mittlere Geschwindigkeitsfeld (Bild 5) subtrahiert, so dass die relative Strömungsänderung gezeigt wird. Die hier dargestellten Vektorfelder wurden, wie im Abschnitt 5 erklärt, bei der ersten Harmonischen FFT-gemittelt. In der Phasenklasse 1, deren mittlerer Phasenwinkel -160° entspricht, ist im vorderen Schaufelbereich eine Verzögerung der Strömung zu erkennen. Dieses Gebiet erstreckt sich auf der Saugseite bis etwa $z = 10$ mm und auf der Druckseite sogar bis etwa $z = 30$ mm. Dadurch wird eine erhöhte Inzidenz verursacht. Das Verzögerungsgebiet verschwindet fast vollständig für Phasenklasse 3 (mittlerer Phasenwinkel -80°) und erscheint mit nahezu geändertem Vorzeichen für Phasenklasse 5 (mittlerer Phasenwinkel 0°), so dass die Strömung beschleunigt und die Schaufel im Bereich der Vorderkante entlastet wird. Anschließend ist für die Phasenklasse 7 wieder eine Abnahme der relativen Geschwindigkeitsvektoren auf ein mit Phasenklasse 3 vergleichbares Niveau zu verzeichnen. Für die Phasenklasse 9, bei der der mittlere Phasenwinkel -160° beträgt, entspricht das relative Vektorfeld nahezu der Ausgangssituation. Die betragsmäßig größten Änderungen der relativen Geschwindigkeitsvektoren sind im Gebiet der Schaufelvorderkante in der Zuströmung zu finden, wobei die Werte weiter stromauf wieder abnehmen. Daraus lässt sich folgern, dass das Phänomen nicht aus einer Pulsation der Zuströmung resultiert. Es wird davon ausgegangen, dass das periodische Phänomen durch das Gitter selber induziert wird. Dies steht in Übereinstimmung mit Schräpp et. al. [5], der den Zusammenbruch des Spaltwirbels in der Passage als Ursache für eine periodische Blockage angibt. Zusätzlich kann anhand der Bilder 6 und 7 ein zweites Phänomen beobachtet werden. Bezüglich der Druckseite bei $z = 44$ mm sind die relativen Geschwindigkeitsvektoren für Phasenklasse 3 auf die Druckseite gerichtet und drücken die Strömung gegen die Schaufel. Wird Phasenklasse 7 betrachtet, so hat sich die Richtung an dieser Stelle vollständig umgekehrt. Folglich verändert sich der durch die Ablösung blockierte Bereich infolge des RI-Einflusses periodisch. Daraus könnte ebenfalls eine periodische Änderung der Geschwindigkeitsvektoren im Bereich der Vorderkante resultieren.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt Ergebnisse eines mit einem Hitzdrahtanemometer kombinierten PIV-Systems an einer ringförmigen Verdichter Stator-Kaskade. Die verwendete Methode ermöglicht die Analyse instationärer Strömungsphänomene, obwohl das genutzte PIV-System eine Messrate deutlich unterhalb der Frequenz des zu untersuchenden Phänomens aufweist. Im Fokus dieser Arbeit steht das Phänomen der rotierenden Instabilität. Anhand des mittleren Strömungsfeldes kann bei einer Inzidenz von $12,3^\circ$ eine saugseitig befindliche große Ablösung beobach-

tet werden, die durch einen starken Hub-Corner-Stall verursacht wird. Das zeitaufgelöste relative Geschwindigkeitsfeld verdeutlicht die periodische Pulsation der Geschwindigkeit in der Zuströmung nahe der Schaufelvorderkante.

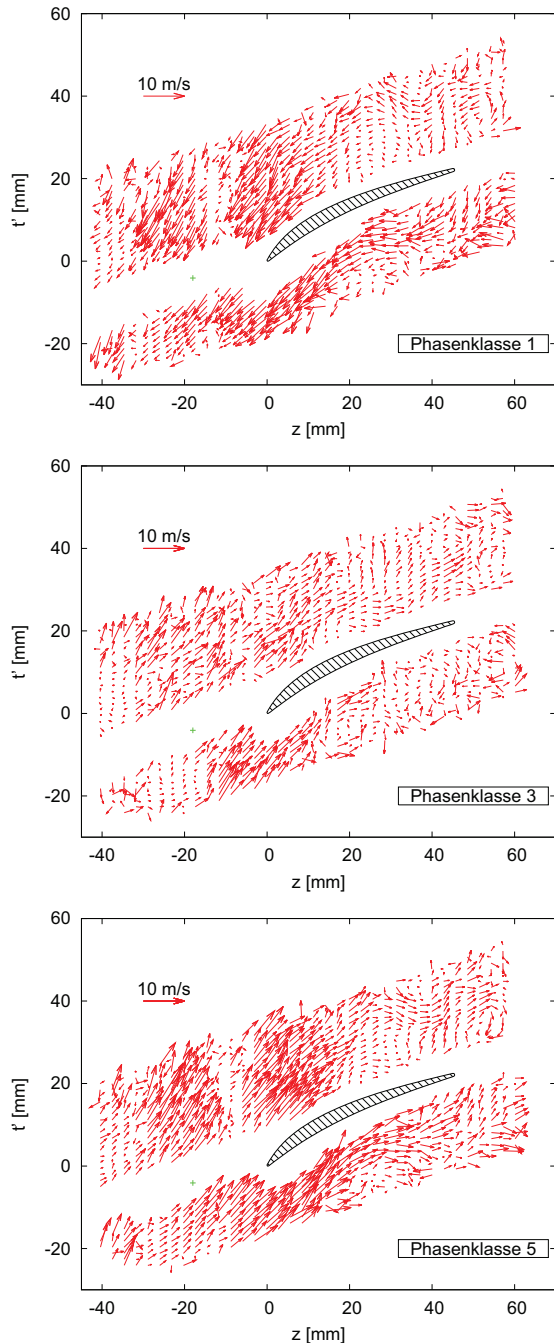


BILD 6: Gefilterte relative Geschwindigkeitsfelder bezüglich der Phasenklassen 1,3 und 5 aus [10]

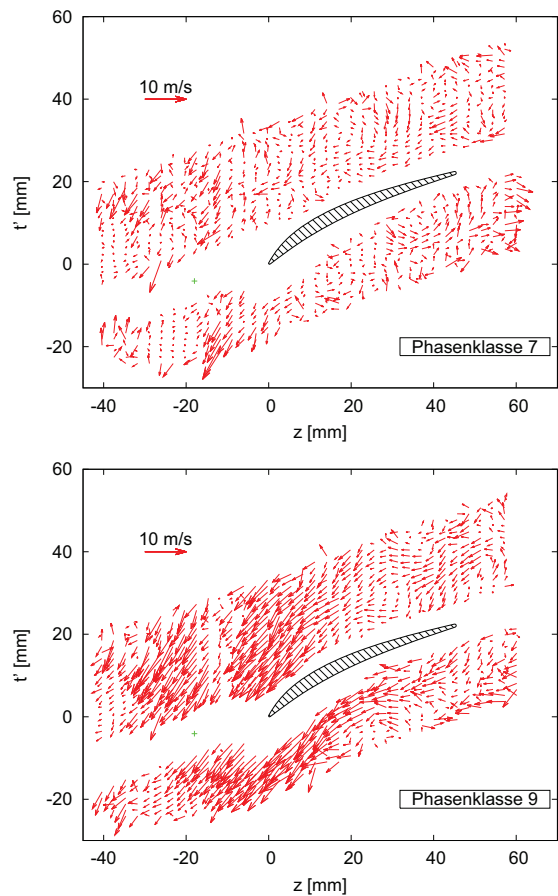


BILD 7: Gefilterte relative Geschwindigkeitsfelder bezüglich der Phasenklassen 7 und 9 aus [10]

Dieser periodische Wechsel der Zuströmung besitzt eine gewisse Ähnlichkeit zu einer Situation, in der rotierende Ablösung vorliegt. Im Gegensatz dazu ist die Passage jedoch nicht vollständig blockiert.

Bezüglich der Hitzdrahtmessung zeigen nur etwa 15,6% der Messreihe den Einfluss der zweiten RI-Mode im Strömungsfeld. Daher existieren je Phasenklasse nur zwischen 48 und 74 Doppelbilder, aus denen ein Ensemble-gemitteltetes Vektorfeld berechnet wird. Es wird vermutet, dass durch eine höhere Anzahl an Messungen stochastische Fehler reduziert werden können. Zukünftige Untersuchungen konzentrieren sich neben der experimentellen Analyse weiterer Betriebspunkte auf eine Reduktion des verschatteten Gebietes sowie die Analyse ähnlicher periodischer Effekte in Verdichtergittern mit der vorgestellten Methode. Ebenso lässt sich durch eine Weiterentwicklung der in Abschnitt 5 erläuterten Filterung die Aussagekraft der Methode verbessern.

LITERATUR

- [1] Kameier, F., 1994. Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen-Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen. VDI Fort-

- schrittsbericht Nr. 243, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [2] Baumgartner, M., Kameier, F., and Hourmouziadis, J., 1995. "Non-Engine Order Blade Vibration in a High Pressure Compressor". *ISABE - Twelfth International Symposium on Airbreathing Engines*.
- [3] Kameier, F., and Neise, W., 1997. "Experimental Study of Tip Clearance Losses and Noise in Axial Turbomachines and Their Reduction". *Journal of Turbomachinery*, **119**(3), pp. 460–471.
- [4] Mailach, R., Lehmann, I., and Vogeler, K., 2001. "Rotating Instabilities in an Axial Compressor Originating From the Fluctuating Blade Tip Vortex". *Journal of Turbomachinery*, **123**(3), pp. 453–460.
- [5] Schrapp, H., Stark, U., and Saathoff, H., 2008. "Breakdown of the Tip Clearance Vortex in a Rotor Equivalent Cascade and in a Single-Stage Low-Speed Compressor". *ASME Conference Proceedings*, **2008**(43161), pp. 115–129.
- [6] Weidenfeller, J., 2001. Experimentelle Untersuchung der stationären und instationären Strömung eines Axialverdichtergitters. VDI Fortschrittsbericht Nr. 429, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [7] Beselt, C., Pardowitz, B., van Rennings, R., Sorge, R., Peitsch, D., Thiele, F., Ehrenfried, K., and Thamsen, P.-U., 2013. "Influence of the Tip Clearance Size on Rotating Instability in an Axial Compressor Stator". *10th European Turbomachinery Conference*.
- [8] Vo, H. D., Tan, C. S., and Greitzer, E. M., 2008. "Criteria for Spike Initiated Rotating Stall". *Journal of Turbomachinery*, **130**(1), p. 011023.
- [9] Gallus, H. E., and Mertens, B., 1995. Mischungsvorgänge I, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 531. Tech. rep., Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen.
- [10] Hermle, G., 2014. Experimentelle Untersuchung der rotierenden Instabilität im Axialverdichtergitter. Dissertation (in Druck), Universität Kassel.
- [11] Hermle, G., and Lawrenz, M., 2013. "Experimentelle Untersuchungen instationärer Sekundärströmung im Axialverdichtergitter". *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2013*(DLRK2013_3560).
- [12] Badreddine, R., and Lawrenz, M., 2009. "Zeitaufgelöste Messung selbsterregter Strömungsfelder durch Kopplung von Hitzdrahtanemometrie und Particle Image Velocimetry". In Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, Erlangen, GALA.
- [13] Cantwell, B., and Coles, D., 1983. "An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder". *Journal of Fluid Mechanics*, **136**, pp. 69–94.
- [14] Perrin, R., Cid, E., Cazin, S., Sevrain, A., Braza, M., Moradei, F., and Harran, G., 2007. "Phase-averaged measurements of the turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number by 2C-PIV and 3C-PIV". *Experiments in Fluids*, **42**(1), pp. 93–109.
- [15] Hermle, G., and Lawrenz, M., 2013. "Unsteady secondary flow in an annular compressor cascade". *Proceedings of the ASME 2013 Gas Turbine India Conference*(GTINDIA2013-3560).