

**Analyse selbsterregter Strömungsfelder im Verdichter-Leitrad
durch Kopplung von Particle Image Velocimetry und
Hitzdrahtanemometrie mittels Fast Fourier Transformation**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaft (Dr.–Ing.)
im Fachbereich Maschinenbau
der Universität Kassel

vorgelegt von

Dipl.–Ing. Rana Badreddine
aus Kassel

Kassel im Oktober 2010

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Februar 2011

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lawrenz

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Ing. O. Wunsch

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt und keine anderen als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Kassel, im Oktober 2010

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung	4
2 Stand der Forschung	6
2.1 Selbsterregte aerodynamische Phänomene	6
2.1.1 Gegenüberstellung von Rotierenden Instabilitäten und Rotierenden Ablösungen	7
2.1.2 Beschreibung des <i>Prestall</i> -Verhaltens und Vorhersage der Verdichterininstabilitäten	17
2.2 Methoden zur Messung instationärer Phänomene	22
2.2.1 Particle Image Velocimetry	23
2.2.2 Einsatz von PIV in Turbomaschinen	24
2.2.3 Einsatz von PIV innerhalb der Fluidodynamik	26
2.2.4 Problematik der zeitlichen Auflösung und Einordnung der Arbeit	30
3 Versuchsaufbau und Messtechnik	32
3.1 Realisierung der Karmanschen Wirbelstraße	32
3.2 Hitzdrahtanemometrie (HDA)	39
3.3 Fehlerbetrachtung	41
3.4 Messwerterfassung: Kopplung von PIV und HDA	42
4 Signalverarbeitung unter Einsatz der Fourier-Transformation	46
4.1 Klassische Analyse periodischer Signale	46
4.2 Verfälschungen in der Transformation	49
4.2.1 <i>Aliasing</i> -Effekt	49
4.2.2 <i>Leakage</i> -Effekt	51
4.3 Methodik der Zeitreihenanalyse	55

4.4	Einsatzbedingungen	56
5	Anwendung des Verfahrens am Beispiel der Karmanschen Wirbelstraße	57
5.1	Programmtechnische Umsetzung des Auswerteverfahrens	57
5.2	Darstellung der PIV-Ergebnisse	63
6	Anwendung der Methodik auf die Strömung in einem Leitgitter bei hoher aerodynamischer Belastung	67
6.1	Versuchseinrichtung	67
6.2	Die verfügbaren Datensätze	69
6.3	PIV-Einsatzmöglichkeiten am Ringgitterwindkanal	71
6.4	Analyse der verfügbaren Druck- und Hitzdraht-Signale	74
6.5	Anwendung des Auswerteverfahrens an den selbsterregten Strömungsphänomenen im Verdichter-Leitrad	78
6.5.1	Erkennung der Instabilitäten auf Basis des Algorithmus	78
6.5.2	Erweiterung des Auswerteverfahrens	81
7	Analyse der instationären Leitradströmung	87
7.1	Darstellung der klassifizierten Ergebnisse	87
7.1.1	Aufbau 1: axial versetzte Sensoren	88
7.1.2	Aufbau 2: In Umfangsrichtung angeordnete Sensoren	95
7.2	Diskussion der Ergebnisse	97
7.3	Bewertung des Analyseverfahrens	99
8	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
A	Signalamplitude
BFF	Blattfolgefrequenz
c	Absolute Geschwindigkeit
c_u	Umfangskomponente der absoluten Geschwindigkeit
c_{ax}	Axialkomponente der absoluten Geschwindigkeit
c_{RI}	Ausbreitungsgeschwindigkeit der aerodynamischen Instabilität
c_s	Schallgeschwindigkeit
f	Frequenz
f_R	Abtastfrequenz, Samplingrate
f_S	Signal-Frequenz
f_{RI}	Rotierende Instabilitäten-Frequenz
$HW_{1,2}$	Hitzdrahtsensor-Nummer
HDA	Hitzdrahtanemometrie
KWS	Karmansche Wirbelstraße
$KU_{2,3,4,6}$	Kulitessensor-Nummer
KL_{RI}	Frequenz-Klasse der Rotierenden Instabilität
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LES	Large Eddy Simulation
l	Sehnenlänge
\dot{m}	Massenstrom
m	Modenordnung in Umfangsrichtung
Ma	Mach-Zahl
PIV	Particle Image Velocimetry
$TR - PIV$	Time-resolved PIV

Symbol	Bedeutung
<i>DPIV</i>	Digital PIV
<i>Stereo – PIV</i>	Stereoscopic PIV
<i>Re</i>	Reynolds-Zahl
<i>RGW</i>	Ringgitterwindkanal
<i>RI</i>	Rotierende Instabilitäten oder <i>Rotating Instabilities</i>
<i>RS</i>	Rotierende Ablösung oder <i>Rotating Stall</i>
<i>Sr</i>	Strouhal-Zahl
<i>t</i>	Zeit
Δt	Zeitfenster, Signalausschnitt
<i>T</i>	Periodendauer
$x(t)$	Zeitsignal des Sensors x
$X(f)$	Fouriertransformierte von $x(t)$

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
π	Kreiskonstante
ν	kinematische Viskosität
φ	Phase, Phasenwinkel
ω_0	Kreisfrequenz

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die wesentliche Komponente moderner Flugtriebwerke und Gasturbinen, wodurch eine Druckerhöhung erfolgt, ist der Verdichter. Die Druckerhöhung in Verdichtern ist eine Voraussetzung für eine effiziente Leistungsabgabe. Über diese Komponente werden das Druckverhältnis und der Massenstrom des Triebwerks gesteuert, wovon der thermische Triebwerkswirkungsgrad abhängt und wodurch der Brennstoffverbrauch beeinflusst werden konnte (BRÄUNLING (2009) Kapitel 10).

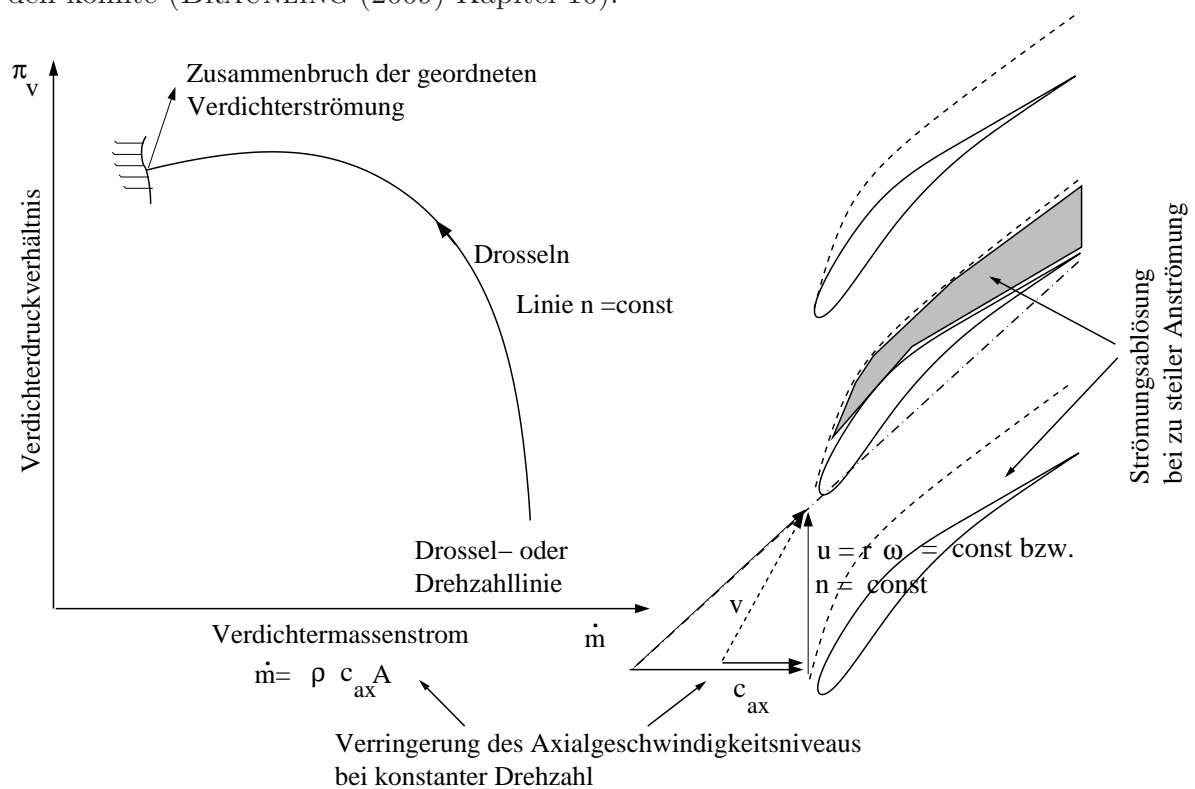


Abbildung 1.1: Skizze zur Drossel- oder Drehzahllinie eines Verdichters (BRÄUNLING (2009))

Hohe Verdichterdruckverhältnisse tragen ganz wesentlich zu niedrigen Brennstoffverbräuchen von Triebwerken bei (BRÄUNLING (2009)). Um die Herstellungskosten eines Triebwerks zu optimieren und das Gewicht zu reduzieren, werden geringere Stufen- und Schaufelzahlen angestrebt. Das Druckverhältnis einer einzelnen Stufe nimmt damit zu. Dadurch sind die Stufen hochbelastet. Es kann somit durch weiteres Androsseln von bereits aerodynamisch hochbelasteten Gittern leicht zu instabilen Betriebszuständen kommen. Die Drosselkurve endet vergleichsweise abrupt (siehe Abbildung 1.1 links). Die geordnete Verdichterströmung bricht zusammen und es herrscht ein instabiler Zustand in dem Verdichter.

Um Kosten zu sparen, werden die Druckverhältnisse und der Wirkungsgrad von mehrstufigen Verdichtern in der Triebwerksentwicklung optimiert. Im Zusammenhang mit der Lebensdauer eines Triebwerks ist ein stabiler Verdichterbetrieb besonders erforderlich. Die Strömungsphänomene in Axialverdichtern sind allerdings sowohl durch reibungsbehaftete als auch durch zeitabhängige Vorgänge gekennzeichnet. Auf der anderen Seite stehen die Wechselwirkungen zwischen Lauf- und Leitrad in Verbindung mit instationären und dreidimensionalen Strömungsphänomenen.

Das Androsseln führt beim Einstellen eines neuen Arbeitspunkts auf einer Drehzahllinie zur Abnahme des Massenstroms und zur Steigung der Dichte mit der Erhöhung des Druckverhältnisses (siehe Abbildung 1.1). Bei konstant bleibendem Kanalquerschnitt bedeutet dies auch eine Abnahme des Axialgeschwindigkeitsniveaus, sodass es schließlich zu einer zu steilen Anströmung der Profile kommt. Die Profile werden bis zu einem Zeitpunkt angeströmt, an dem sich die Strömung von der Verdichterbeschaufelung ablöst. Dies führt zu Auswirkungen auf die Strömungsvorgänge im einzelnen Gitter. Der Druck wird dementsprechend nicht mehr durch die Verdichterbeschaufelung aufgebaut. Das Verdichtergitter nähert sich der Stabilitätsgrenze, allerdings erfolgt noch kein Zusammenbruch der gesamten Verdichterströmung.

In diesem Zustand ist die Gitterströmung hochbelastet und es können selbsterregte Strömungen in Form Rotierender Instabilitäten (RI) oder in Form Rotierender Ablösungen (RS) auftreten, die sich aus dem Zusammenwirken aerodynamischer und akustischer Mechanismen ergeben (BAUMGARTNER ET AL. (1995), KAMEIER UND HAUKAP (2001), WEIDENFELLER (2002)). Die Gestalt dieser Instabilitäten kann auf unterschiedliche Weise in Erscheinung treten: Störungen größeren und kleineren Maßstabs mit unterschiedlichen Wellenlängen, einzellige oder mehrzellige Ablösungen am Umfang, einzelne oder mehrere Schaufelreihen betreffend (CUMPSTY (2004)). Der Druckaufbau bricht zusammen und der Massenstrom verändert sich, bis eine Umkehr der Strömungsrichtung

erfolgt.

Wie aus der Drossellinie in der Abbildung 1.1 zu sehen ist, stellt der Punkt, an dem der Zusammenbruch der geordneten Verdichterströmung erfolgt, einen der Punkte auf der Pumpgrenze für eine bestimmte Drehzahl dar. Ein Sicherheitsabstand zwischen der Arbeitslinie und der Pumpgrenze besteht deswegen beim stabilen Betrieb von Turboverdichtern. Dieser Abstand soll den Verdichter vor dem Pumpen schützen. Die Annäherung an die Pumpgrenze, die eine Steigerung des Wirkungsgrades bedeuten kann, fordert ein besseres Verständnis der zeitabhängigen Vorgänge in der Nähe dieser Grenze. Trotz des hohen technischen Standes in Turboverdichtern besteht noch Entwicklungspotenzial für die Erhöhung des Wirkungsgrades z. B. durch den Einsatz von formvariablen Schaufelprofilen (MÜLLER (2006)).

Ein bedeutender Forschungsschwerpunkt in modernen Axialverdichtern ist die frühzeitige Erkennung von instabilen Strömungsvorgängen. Es wird bereits im stabilen Kennfeldbereich des Verdichters nach Anzeichen von Instabilitäten gesucht, um die Annäherung an die Pumpgrenze zu erkennen. In der industriellen Praxis erfolgt die Früherkennung von Pumpen und von Rotierenden Instabilitäten in Verdichtern mittels verschiedener Mess- und Analyse-Methoden, angewandt auf hochfrequente Messsignale, wie z. B. aktiven Kontrollsystemen (PADUANO ET AL. (2001); BAE ET AL. (2005)). Die Funktionsweise dieser Systeme basiert auf der Einspritzung von Luft im Bereich der Spaltströmung. Moderne Entwurfskonzepte versuchen, durch eine entsprechend dreidimensionale Gestaltung der Beschauelung und der Ringraumgeometrie den stationären Phänomenen Rechnung zu tragen. Dem gegenüber sind die mit der Zeitabhängigkeit verbundenen Vorgänge noch weitgehend unverstanden, aber im Hinblick auf die Strömungsstabilität von ausschlaggebender Bedeutung. Bezüglich der Messung realer Strömungsfelder können die bisherigen Untersuchungen nur lokale Größen bzw. punktuelle Aufzeichnungen analysieren. Eine zwei- bzw. dreidimensionale Darstellung der selbsterregten Strukturen wird ein bedeutender Fortschritt sein. Die Entwicklung geeigneter Mess- und Auswertemethoden ist für die Vertiefung der Kenntnisse dreidimensionaler instationärer Strömungsvorgänge von großer Bedeutung.

Mit der Particle Image Velocimetry (PIV) steht heutzutage ein optisches Messverfahren zur Verfügung, das das Potenzial besitzt, derartige Phänomene zu analysieren. Seit den ersten PIV-Messungen im Windkanal der DLR-Göttingen in den frühen Neunzigern (KOMPENHANS ET AL. (1993)), ist das Einsatzgebiet von PIV im Bereich der Turbomaschinen in den vergangenen Jahren forciert worden. 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 (RAFFEL ET AL. (2007)). Die darin enthaltene Ensemble-Mittelung führt dazu, dass sich instationäre Vorgänge nicht auflösen lassen. Wenn ganze Strömungsfelder zeitaufgelöst mit der PIV-Technik erfasst und analysiert werden sollen, muss diese Technik weiterentwickelt werden.

Für die Weiterentwicklung dieser Messtechnik und die Anwendung auf selbsterregte Phänomene sind zwei wesentliche Aspekte zu beleuchten: Die Mess-Komponenten oder -Sensoren und die Auswertung der Bilderreihen. Letzteres ist das Thema der hier dargestellten Arbeit. An den eingesetzten Sensoren und Regelkonzepten wurden einerseits in den letzten Jahren viele Verbesserungen vorgenommen wie z. B. der Einsatz von Hochgeschwindigkeit CCD-Kameras, Doppelpuls-Lasern mit hoher Wiederholrate und großer Auswahl von Seeding-Partikeln. Dies ermöglicht die Einführung von Time-resolved-PIV und vielen anderen PIV-Systemen je nach Anwendungsart auf dem Markt. Andererseits spielt die Methode der Auswertung von PIV-Messdaten (Bilderreihen) die entscheidende Rolle zur Beschreibung des Strömungsverhaltens durch das Feld der Geschwindigkeitsvektoren.

Es wird in vielen Arbeiten versucht, die Ensemble-Mittelung durch andere Mittelungsverfahren zu ersetzen. In der Arbeit von HUPPERTZ ET AL. (2007) werden zur Untersuchung der Interaktion von Triebwerkstrahlen und Wirbeln im Nachlauf von Flügel-Modellen PIV-Bilder mit der Methode der zentrierten Mittelung ausgewertet. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Datensätze werden entlang der Zeitachse für gleiche Ortskoordinaten gemittelt. Damit die aus der Ensemble-Mittelung resultierenden Fehler minimiert werden, werden zunächst die Partikelverschiebung einzelner Koordinaten ermittelt und die dabei entstandenen Fehler minimiert. Der hauptsächliche Fortschritt bei dieser Auswertung basiert auf der Bestimmung der Koordinaten des Wirbelzentrums, das entlang der Koordinate verschoben wird. Die Ergebnisse zeigen signifikante Verbesserungen der Strukturen im Vergleich zur Ensemble-Mittelung und weisen die Interaktion von Triebwerksstrahl und Wirbel im Nachlauf von Tragflügeln nach.

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer Methode zur Identifikation instationärer, selbsterregter periodischer Strömungsfelder. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellte Mess- und Auswertemethode hat zum Ziel eine Berechnung der Phasenlage einzelner PIV-Bilder gegenüber einem langfristig hochauflösenden Referenzsignal. Erforderlich dafür ist die gleichzeitige Vermessung des Geschwindigkeitssignals des selbsterregten Phänomens mittels einer Hitzdrahtanemometrie oder des Drucksignals dieses Phänomens mittels einer zeitlich hochauflösenden Druckmessung. In der Nähe der PIV-Ereignisse wird das Signal mit der Fast-Fourier-Transformation analysiert. Die aus der PIV-Messtechnik aufgenommenen Bilder werden hinsichtlich des Wirbelortes nachsortiert und die Wirbelwanderung wird anhand einer Animation visualisiert. Die Ähnlichkeit von zwei Strömungsformen, der Karmanschen Wirbelstraße und der Rotierenden Instabilitäten, wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um an der Karmanschen Wirbelstraße die Funktionalität des Verfahrens zu demonstrieren. Das Verfahren wird auf Datensätze aus den Messungen an einem Verdichter-Leitgitter angewandt und dort werden die aerodynamischen rotierenden Strukturen genauer analysiert, damit es näher an die komplexeren realen Signalen herankommt.

2 Stand der Forschung

2.1 Selbsterregte aerodynamische Phänomene

Instationäre Strömungszustände in Turbomaschinen regen Schaufelschwingungen an, die die Zerstörung der Beschaukelung oder anderer Bauteile der Maschine verursachen können (BAUMGARTNER ET AL. (1995); HAUKAP (2006)). Die angeregten Schaufelschwingungen sind in fremderregte und selbsterregte Schwingungen gegliedert (KAMEIER UND HAUKAP (2001)). Die fremderregten Schwingungen sind Anregungsarten, die von außen oder durch die Mechanik aufgeprägt werden, z. B. Anregung der Schaufel durch drehzahlharmonische Frequenzen oder Schwingungsübertragung durch ein Getriebe. Unter selbsterregten Schwingungen sind die Anregungsarten gemeint, die durch die Strömung oder durch die Aerodynamik hervorgerufen werden, z. B. rotierendes Abreißen oder Pumpen, rotierende Instabilitäten, akustische Resonanzen sowie Flattern.

In diesem Kapitel werden die Strömungsinstabilitäten in Verdichtergittern beschrieben, die in der Literatur unter dem Begriff „selbsterregte“ Instabilitäten charakterisiert sind. Diese sind belastende, um die Achse laufende Strömungsstörungen (GREITZER (1980)). Einige können vor Erreichen der Stabilitätsgrenze (Pumpgrenze) auftreten, wie z. B. die Rotierenden Instabilitäten, und andere können jedoch beim Überschreiten dieser Grenze anfangen, wie z. B. die Rotierenden Ablösungen (siehe Kapitel 5 in der Arbeit von KAMEIER UND HAUKAP (2001)).

Man unterscheidet zwischen der Pumpgrenze und der Stabilitätsgrenze. Die Pumpgrenze eines Verdichters repräsentiert die Linie, die die Punkten aus mehreren Drehzahllinien verbindet, an denen die geordnete Verdichterströmung in einem Verdichterkennfeld zusammenbricht (siehe Abbildung 1.1 links). Wenn die Strömungsablösung nur in einzelnen Stufen vorkommt, wird von dem Erreichen der jeweiligen Stabilitätsgrenze einer Stufe gesprochen. Im Zusammenhang mit dem Gesamtverdichter wird der Begriff Pumpgrenze

ze benutzt. Beim Überschreiten der Pumpgrenze wird der Gesamtverdichter gefährdet (BRÄUNLING (2009)). Die Voraussetzung, dass ein Verdichter ins Pumpen gerät, ist das Abreißen der Strömung in allen Stufen.

Nach GREITZER (1980) erscheint zuerst das Abreißen der Strömung an den Schaufeln, dann folgen die Instabilitäten, die ihrerseits zu Rotierenden Ablösungen (Unregelmäßigkeiten in der Strömung in Umfangsrichtung) oder zum Pumpen (Schwankungen der Strömung in axialer Richtung) oder zu einer Kombination aus den beiden führen.

KAMEIER UND HAUKAP (2001) zeigen, dass selbsterregte Phänomene sich als ausgesprochen komplex erweisen. Die „Rotierende Instabilität“ speziell korreliert mit einer starken Schaufelschwingung, die in diesem Fall unabhängig von den der Blattfolgefrequenz oder von der Rotor-Drehzahl hervorgerufen wird. Weiterhin lässt sich in dieser Arbeit feststellen, dass diese selbsterregten Strömungsphänomene rotieren, und zwar sowohl im festen als auch im relativen System.

Die folgende Literatur gibt eine Übersicht von Arbeiten über selbsterregte aerodynamische Phänomene und speziell über die „Rotierenden Instabilitäten“ - *Rotating Instabilities* (RI) und die „Rotierenden Ablösungen“ - *Rotating Stall* (RS). Danach werden einige Veröffentlichungen über das Thema „spaltströmungsinduzierte Wirbel“ diskutiert. Als Letztes wird der aktuelle Stand der Forschung über zwei wichtige Indikatoren aufgezeigt, die in der Entstehungsphase mit hoher Gitterbelastung einhergehen, und mit großer Wahrscheinlichkeit das Erscheinen von RS oder RI in Verdichtern bewirken: Die Modalwellen und die *Spikes*.

2.1.1 Gegenüberstellung von Rotierenden Instabilitäten und Rotierenden Ablösungen

Der RS wird als ein Spezialfall der RI betrachtet, die demgegenüber eine Druckänderung im Relativsystem hervorrufen können (BAUMGARTNER ET AL. (1995)). Innerhalb eines begrenzten Betriebsbereiches treten vermutlich die aus Grenzschichtablösungen resultierenden Wirbel und die akustischen Eigenfrequenzen der untersuchten Strömungsräume in Wechselwirkung.

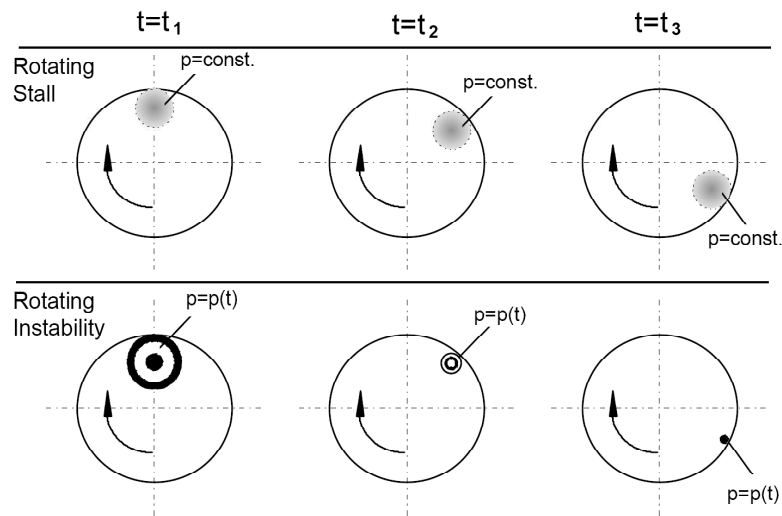


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung von der Druckvariation der rotierenden Ablösung und der rotierenden Instabilität mit der Zeit (BAUMGARTNER ET AL. (1995))

Die Abbildung 2.1 zeigt im oberen Teil das RS als eine Zelle mit konstantem Druck, die mit der Zeit eine neue Position in Umfangsrichtung annimmt. In unteren Bildteil werden die RI dargestellt. Die RI-Zelle rotiert mit variierendem Druck. Im Rahmen dieser Arbeit sind bei den untersuchten rotierenden Strukturen die RI gemeint, die sich auch für einen im rotierenden Bezugssystem stehenden Betrachter durch einen Frequenzbereich mit hohen Amplituden bemerkbar machen (BAUMGARTNER ET AL. (1995)).

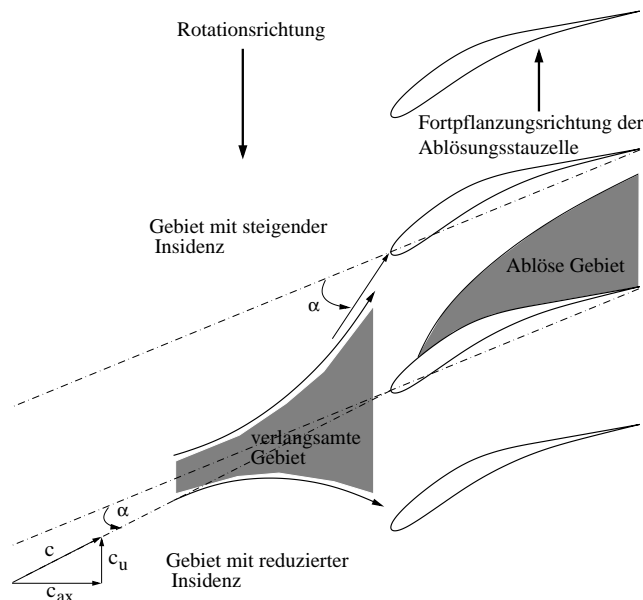


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Emmonstheorie zur Fortpflanzung der rotierenden Ablösezone (PAMPREEN (1993))

Das am häufigsten untersuchte Phänomen ist das RS in Verdichtern (SIMPSON UND LONGLEY (2007); VO ET AL. (2008b,a); VO (2010b); JIANG ET AL. (2009); IWAKIRI ET AL. (2009)). Die von EMMONS ET AL. (1955) entwickelte Vorstellung für RS basiert darauf, dass die Entstehung des RS durch starke Fehlanströmung mit hoher Inzidenz verursacht wird. Dies führt zu Strömungsablösungen auf der Saugseite an einem oder mehreren benachbarten Schaufeln (*Stall Zelle*). Ein erhöhter Strömungswiderstand in einer Teilung bewirkt daher, dass die Strömung auf beiden Seiten in der benachbarten Teilung abgedrängt wird (Abbildung 2.2). Es findet also eine zusätzliche Belastung der oberen Nachbar-Schaufel in Richtung der Umfangskomponente der Zuströmung statt. Dagegen wird die untere benachbarte Schaufel entlastet. Durch die starke Belastung der oberen Schaufel entsteht dort ein Ablösegebiet, sodass die blockierte Teilung in Umfangsrichtung durch das Gitter wandert.

Zur Unterscheidung zwischen RI und RS

Folgende Absätze beinhalten eine Übersicht der charakteristischen Unterschiede zwischen RS und RI.

RS:

Beim Erreichen des „instabilen“ Kennlinienbereiches ist RS eine in Umfangsrichtung lokale rotierende Strömungsablösung, die den Schaufelkanal teilweise versperrt. Die radiale Erstreckung des Ablösegebietes kann u. U. die gesamte Schaufelhöhe einnehmen. Entstehungsort ist der Blattspitzenbereich (MAILACH UND MÜLLER (1998); KAMEIER UND HAUKAP (2001); HAUKAP (2006)). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des RS liegt bei etwa 30% - 50% der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors. Die Ausbreitungsrichtung führt von der Druck- auf die Saugseite, d. h. für ein Rotorgitter bewegt sich die Zelle rückwärts relativ zur Rotordrehrichtung im absoluten System, aber für ein Statorgitter bewegt sie sich in dieselbe Richtung wie der Rotor. Der zeitgemittelte Massenstrom bleibt konstant, aber der lokale Massenstrom in einzelnen Schaufelkanälen ändert sich, wenn die Zelle mit der Strömungsablösung zu rotieren beginnt (CUMPSTY (2004)). Die Anzahl der rotierenden „Ablösezellen“ und der „statische Druck“ im Relativsystem der Zelle bleiben für den jeweiligen Betriebspunkt „konstant“. Es handelt sich bei rotierenden Ablösefrequenzen um Frequenzkomponenten mit „Harmonischen“, das Vielfache der Grundfrequenz, wie KAMEIER UND HAUKAP (2001) diese beschreibt. Sie machen sich als „schmalbandige“ Frequenzen in Amplitudenspektren bemerkbar (KAMEIER UND HAU-

KAP (2001); WEIDENFELLER (2002)). Die verursachte Strömung läßt sich als „chaotisch“ klassifizieren.

RI:

RI ist ein bereits im „stabilen“ Kennlinienbereich unter hoher Belastung auftretendes Phänomen, das ebenfalls in Umfangsrichtung rotiert. Die radiale Erstreckung beschränkt sich auf den Blattspitzenbereich, nämlich dem Spaltbereich der Schaufel. Die Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit ist dem des RS ähnlich. Die Konfiguration ist bezüglich „Anzahl und Größe“ „der Zellen instabil“, da der „statische Druck“ im Relativsystem der Zelle sich zeitlich „ändert“. Das charakteristische Signalmuster im Amplitudenspektrum besteht aus „breitbandigen“ Amplitudenüberhöhungen mit äquidistanten Maxima (PAMPREEN (1993); KAMEIER (1994)). Es handelt sich bei RI im Allgemeinen um „Summen-“ und „Differenzfrequenzen“ neben einer Grundfrequenz. Die Strömung ist als „periodisch“ klassifiziert.

In (KAMEIER ET AL. (2000)) wird von Untersuchungen am 4-stufigen Niedergeschwindigkeitsverdichter im rotierenden und im stehenden Bezugssystem hinsichtlich RI berichtet. Die Untersuchungen der RI, die durch eine Vergrößerung des Radialspalts an der Schaufelspitze erzeugt werden, erlauben ein tieferes Verständnis im Besonderen über den Einfluss von Gehäusegrenzschichten. Aus den Auswertungen leiten die Autoren daraus eine Grundlage für eine Datenbasis zur Identifizierung von RI ab, die von den Maschinenbetriebsbedingungen und von wesentlichen Einflussfaktoren für RI entnommen werden.

Eine Charakterisierung der Wechselwirkung strömungsinduzierter Anregungsmechanismen auf das Strömungsfeld einer Verdichterstufe wird in der Arbeit von KAMEIER UND HAUKAP (2001) ausführlich beschrieben. Dabei wird ein Verfahren beruhend auf statistischen Methoden zur Bestimmung geeigneter Aufnehmerpositionen entwickelt. Diese Arbeit dokumentiert auch die Erkenntnisse über das statistische Schwingungsverhalten von fremderregten und selbsterregten Verdichterschaukeln, und zwar folgendermaßen: Die statistische Untersuchung bei Fremderregung zeigt ausschließlich deterministisches Schwingungsverhalten. Die statistische Verteilung der Amplituden liefert eine Gauß'sche Normalverteilung. Statistiken von selbsterregten Schaufeln zeigen sowohl deterministisches als auch stochastisches Schwingungsverhalten. Die Amplitudenverteilung liefert in diesem Fall eine Rayleigh-Verteilung. Eine Anregung der Schaufeln durch RI zählt zu den selbsterregten Schaufelschwingungen. Es wird zwischen zwei Schwingungsverhalten

unterschieden: deterministisch und stochastisch. Die Amplituden der Schaufelschwingungen, die durch RI verursacht werden, sind nach Rayleigh verteilt.

Messungen mit hochauflösendem Druck- und Geschwindigkeitssensoren ergeben, dass die dominierenden Modi der RI im Blattspitzenbereich sich spiralförmig in Umfangsrichtung entgegen der Drehrichtung des Rotors mit einer geringeren Drehgeschwindigkeit ausbreiten (50% der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors) (MAILACH UND MÜLLER (1998)). In dieser Arbeit wird auch zwischen RI und RS differenziert. Als Entstehungsquelle einer einzelligen RS kann die tieffrequente Störung detektiert werden, deren Wellenlänge dem Umfang des Verdichters entspricht (erste Modenordnung: $m=1$).

Messungen von MAILACH ET AL. (2001) an einem 4-stufigen Niedergeschwindigkeitsverdichter kommen zu den Ergebnissen, dass die RI eine unmittelbare Folge von großem Radialspalt sind und nahe der Stabilitätsgrenze zeitgleich neben den beiden tieffrequenten wellenförmigen Störungen zu erwarten ist. Weitere Arbeiten von MAILACH UND VOGELER (2003, 2004) dokumentieren am selben Verdichter die Entwicklung der Grenzschicht und die Verteilung des instationären Druckfelds auf der Profil-Saugseite des Stators. Eine Instrumentierung eines Schaufelprofils mit piezoresistiven Drucksensoren und zusätzlichen Hitzdrahtmessungen ermöglichen eine zeitaufgelöste Messung des instationären Strömungsfeldes.

Zum tieferen Verständnis der RI führen MÄRZ ET AL. (2002) experimentelle Untersuchungen anhand von Druck-Messungen an einem Niederdruckverdichter für unterschiedliche Spaltweiten durch. Trotz der Erscheinungen von RI läuft der Verdichter aufgrund der spezifischen Spaltwirbelströmung weiter im stabilen Bereich: Die sich von der Saug- auf die Druckseite bewegende Spaltströmung kann nicht weiter zum nächsten Gitter wandern. Um diese experimentellen Ergebnisse mit numerischen Simulationen zu verifizieren, wird eine instationäre 3D-Navier-Stokes-Methode zur Lösung des gesamten Rotorgitters eingesetzt. Nach MÄRZ ET AL. (2002) ist der Wirbel als Folge der Überlagerung von drei Ereignissen zu sehen: dem klassischen Spaltwirbel, der axial gespiegelten Seitenwand-Strömung und der Zuströmung. Der Wirbel bewegt sich von der Saugseite auf die Druckseite mit annähernd der Hälfte der Rotor-Geschwindigkeit. In der Auswertung der Drucksignale wird kollektiv nach Phasenwinkeln gesucht und deren Positionen innerhalb einer Periodendauer in Klassen eingestuft, bis der gesamte Zyklus des Wirbels gedeckt wird.

Eine Alternative zum Einsatz der Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung ist

die Wavelet-Transformation. Die Wavelet-Transformation findet Anwendungen in vielen Bereichen der Technik, wie zum Beispiel der Systemidentifikation (ZABEL (2002)), der Signalanalyse (UHLMANN (2003)) und der Weiterverarbeitung des PIV-Geschwindigkeitsvektorfeldes (LI ET AL. (2001); CAMUSSI (2002)). Diese Transformation, die ähnlich wie die Faltung in der gefensterten Fourier-Transformation definiert ist, wird als inneres Produkt des Signals $x(t)$ mit verschobenen und skalierten Versionen einer einzigen Funktion $\psi(t)$ berechnet (MERTINS (2010)).

Die Wavelet-Transformation wurde gegenüber der Fourier-Transformation in der Arbeit von UHLMANN (2003) dargestellt, wo sie eine Zeit-Frequenz-Repräsentation liefert. Dagegen beschreibt die gefensterte Fourier-Transformation den Zeitbereich und den Frequenzbereich voneinander getrennt. Für eine Verbesserung der Effizienz in einem Gasturbinenkreisprozess wird die Verdichter-Komponente unter steigender aerodynamischer Belastung von UHLMANN (2003) untersucht. Bei der Analyse der Verdichterdruksignale wird die Wavelet-Transformation angewandt, um die aerodynamischen Verdichterinstabilitäten bei pumpgrenznahen Arbeitspunkten frühzeitig zu erkennen. Im Rahmen einer numerischen Untersuchung zeigt SPAKOVSKY (2004) zum ersten Mal die rückwärts laufenden Rotierenden Ablösungen in einem Radialverdichter und führt eine neue analytische Methode zur Modellierung der Strömung im stabilen Betriebsbereich in solchen Verdichtern ein. Das Modell wird auch anhand von experimentellen Untersuchungen an einem Radialverdichter validiert. Die Analyse hochauflösender Drucksignale im Zeitbereich zeigt starke periodische Schwankungen. Die Analyse im Frequenzbereich zeigt, dass die vierte harmonische Welle entgegen der Rotordrehrichtung dreht.

Experimentelle und numerische Untersuchungen der dreidimensionalen instationären Phänomene während RS werden von IWAKIRI ET AL. (2009) an einem Radialverdichter durchgeführt. Dabei wird das Gehäuse mit hochauflösenden Drucksensoren instrumentiert und die Drucksignale mit einer Wavelet-Transformation analysiert, um die Störungen im Signal abzuschätzen. Mittels hochauflösender, instationärer Wand- und Schaufeldruckmessungen können die RI an einem einstufigen Axialventilator nachgewiesen werden (HAUKAP (2006)). Für verschiedene Schaufelgeometrien (variable Spaltweite und Staffelungswinkel) wird eine gezielte Abstimmung der untersuchten Strömungsphänomene auf die unterschiedlichen Betriebsbereiche der Maschine ermöglicht. Durch den Einsatz einer extrem weichen und unverwundenen Beschau felung kann erstmals eine Strukturanregung infolge der RI reproduzierbar nachgewiesen werden. Als Ursache der RI werden die instationären Strömungsvorgänge im Blattspitzenbereich des Rotors und

deren Auswirkungen auf die gehäusenahen Wandgrenzschichten vermutet. Maßgeblicher Einflussparameter ist dabei die Spaltweite. Zudem wird mit zunehmender Annäherung an die Stabilitätsgrenze die Hauptströmung im Blattspitzenbereich durch das Auftreten des Spaltwirbels dominiert.

In einem transsonischen Verdichter werden niederfrequente Instabilitätsphänomene analysiert (GANNON (2009)). Das Verhalten und der Ort dieser Instabilitäten wurde genauer untersucht. Die analysierten Instabilitäts-Verteilungen und -Amplituden werden für verschiedene Arbeitspunkte in der Nähe der Pumpgrenze dargestellt. Mittels geeigneter Filter-Technik können die Amplituden dieser Phänomene im Zeitbereich gemessen werden. Verglichen mit den Amplituden in der Nähe der Blattfolgefrequenz zeigen die Signale signifikante Werte an. Die Untersuchungen von drei Arbeitspunkten kennzeichnen bei verschiedenen Drehzahlen immer wieder unterschiedliches Verhalten der niederfrequenten Phänomene.

Spaltwirbelinduzierte Vorgänge

Die Spaltströmung zwischen der Saug- und Druckseite an der Nabe oder am Gehäuse ist der wesentliche Parameter, der die Instabilitäten in Verdichtern verursachen dürfte (KAMEIER ET AL. (2000); MAILACH ET AL. (2001); MÄRZ ET AL. (2002); HAUKAP (2006); VO ET AL. (2008b); VO (2010a)).

An einem einstufigen Axialverdichter untersucht SAATHOFF (2001) ein hochbelastetes Gitter und liefert eine ausführliche Beschreibung der Entstehung und Entwicklung des Spaltwirbels sowie der Wechselwirkung der Gehäusegrenzschicht mit den Spaltwirbelströmungen. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen eine in Umfangsrichtung vollständige Ablösung der Gehäusegrenzschichten des Rotors, und zwar bei allen untersuchten Volumenströmen. Bei zunehmender Belastung infolge verringerten Volumenstroms wandert die Ablöselinie stromauf bis in die Eintrittsebene des Rotors. Die Analysen der instationären Messungen vor dem Rotor lassen den Schluss zu, dass das einsetzende RS durch ein *Spill-Forward* der Rotor-Spaltströmung ausgelöst wird und zur Ablösung der Gehäusegrenzschichten bei allen Volumenströmen entlang einer umfangsgerichteten Linie führt.

INOUE ET AL. (2001) untersuchen rotierende Ablösungen, hervorgerufen aus kleinen und großen Wellenlängen, an einem einstufigen Niederdruckverdichter mit Vorleitrad anhand rotorgetriggelter Wanddruck-Messungen und Hitzdrahtmessungen. Die Geschwindigkeits-

und Drucksignale werden anhand einer geeigneten Triggerung gemittelt. Die Ergebnisse zeigen kurzweilige Wirbelstrukturen, die bei den numerischen Untersuchungen von HOYING ET AL. (1999) als Folge abgelöster Wandgrenzschichten durch sogenannten *Spill-Forward* des Spaltwirbels beschrieben werden. Die Spaltweite wird dabei als Maß für die radiale Ausdehnung der Ablösung herangezogen. Die Analyse mittels Wavelet-Transformation bestätigt eine Wellenlänge der Ablösezellen in der Größenordnung der doppelten Teilung, und das wiederum korrespondiert mit der Wellenlänge einer RI.

Anhand von numerischen Simulationen stellt INOUE (2001) zwei typische Frequenzen von RI in Axialverdichtern dar. Die erste wird durch mehrzellige Störungen kleiner Größe und die Zweite durch das instationäre Verhalten des Spaltwirbels nach dem Zusammenbruch verursacht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirbelform einem Tornado ähnlich ist. Der Tornado-Anfang liegt auf der Saugseite und verbreitet sich vor dem Rotor in Richtung des Gehäuses weiter. Diese Form von *Spikes* wird nochmals in den numerischen Untersuchungen von LIN ET AL. (2008) bestätigt.

WERNET ET AL. (2002) untersuchen die Spaltströmung in einem Niedergeschwindigkeitsverdichter mittels Digital Particle Image Velocimetry. Die Ergebnisse zeigen, dass ein größerer Spalt eine höhere aerodynamische Belastung des Gitters verursacht. Der dadurch entstandene Spaltwirbel breitet sich stromauf weiter aus als im Auslegungspunkt, was eine Blockade im größten Bereich des Strömungskanals innerhalb einer Teilung verursacht.

Die Untersuchungen von WEIDENFELLER (2002) an einem stehenden Verdichtergitter zeigen, dass die RI selbst bei kleiner radialer Spaltweite auftreten können. Die Geschwindigkeit der RI, mit der sich die Störung in Umfangsrichtung ausbreitet, beträgt etwa 50 % der tangentialen Komponente der Zuströmung. Im Rahmen experimenteller Arbeiten werden die Wirbelsysteme dieses Ringgitters unter Einfluss verwundener Zulaufgrenzschichten und Spaltströmungen eingehend vermessen (WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2004)). Als Messmethoden kommen dabei pneumatische Fünfloch- und Dreilochsonden sowie die Hitzdrahtanemometrie zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen die Entwicklung des Spaltwirbels in Abhängigkeit des Belastungszustandes des Gitters. Der Spaltwirbel bewegt sich mit zunehmender Belastung stromaufwärts. Durch einen Transport von energiereichem Fluid verursacht der Spaltwirbel eine Stabilisierung der Grenzschicht, was als eine positive Wirkung betrachtet wird, da die Entwicklung des *Corner-Stall* abgeschwächt wird. Eine Beschreibung des *Corner-Stall*, der im saugseitigen Nabenbereich des untersuchten Leitgitter-Austritts vorherrscht, ist in dieser Arbeit auch enthalten. Um

die Zuströmverhältnisse nachzubilden, wie sie in realen Maschinen vorkommen, wird die radiale Verteilung des Zuströmwinkels im Nabebereich variiert. Die Variation erfolgt mithilfe eines konturierten Nabensegmentes (passive Maßnahme) und Massenstromentnahme (aktive Maßnahme) stromauf des untersuchten Gitters.

BAE ET AL. (2004) führen experimentelle Untersuchungen der Spaltströmungswirbel mit der Hitzdrahtanemometrie in einem Verdichter durch, um das periodische Verhalten der dort herrschenden Instabilitäten zu beschreiben. Die Arbeit beinhaltet auch eine numerische Berechnung zur Modellierung der periodischen Instabilität. Zur physikalischen Erklärung des Ursprungs der beobachteten Periodizität wird die Theorie der Nachlaufwirbel vorgeschlagen. Es handelt sich hier nicht um die Karmansche Wirbelstraße, sondern um zwei parallele rotierende Linienwirbel (CHEVALIER (1973)). In einer weiterführenden Arbeit erforschen die Autoren drei Techniken zur aktiven Kontrolle der Spaltströmung in Axialverdichtern (BAE ET AL. (2005)). Die Autoren untersuchen, sowohl die Einflüsse von drei Aktuatoren auf die Spaltwirbel, die am Gehäuse positioniert sind, als auch den Luftstrahl, der in unterschiedliche Richtungen ausströmen kann. Es gelingt in dieser Arbeit, die Spaltströmung zu reduzieren und damit ihre Nachteile auf die Hauptströmung zu mindern. Ein Aktuator, der einen Luftstrahl erzeugt, der hinsichtlich Richtung und Geschwindigkeit der Hauptströmung entspricht, erweist sich als die effektivste Lösung.

Die Strahl-Injektionstechnik wird auch in der Arbeit von DEPPE ET AL. (2006) an drei einstufigen, unterschiedlich konzipierten Niedergeschwindigkeitsverdichtern am Gehäuse im Gitteraustritt ausprobiert, um damit die Entstehung von RS zu unterdrücken. TAHARA ET AL. (2007) stellen eine neue Technik vor, woraus sich ein hohes Potenzial ableitet, um ein Warnsignal schon in der *Spikes*-Erkennungsphase zu erzeugen. Der dafür benötigte Risiko-Index hängt von dem Durchflussbeiwert, von der Spaltweite und von der Inzidenz ab. Dieser Index lässt sich aus den Drucksignalen entnehmen. Die hochauflösenden Sensoren sind auf der Rotor-Vorderkante am Gehäuse platziert worden.

YAMADA ET AL. (2007) zeigen anhand instationärer numerischer Strömungsberechnungen das Verhalten des Spaltwirbels an einem Betriebspunkt nahe der Stabilitätsgrenze in einem transsonischen Axialverdichter-Laufrad (NASA-Rotor-37). Die Gehäusegrenzschicht und die Grenzschicht auf der Profil-Saugseite im gehäusenahen Bereich werden detailliert für unterschiedliche Spaltweiten erforscht. Die Auswertungen zeigen, dass der Spaltwirbel in Wechselwirkung mit der Druckseite der benachbarten Schaufel tritt und

eine massive Verblockung im gehäusenahen Bereich nach sich zieht. Ferner wird gezeigt, dass der Wirbel einen periodischen Einfluss auf das Moment der Strömung in der Nachbarteilung im Blattspitzenbereich ausübt, wobei eine Anregung der Schaufel nicht ausgeschlossen wird. Eine Ausbreitung der periodischen Störung über den Umfang und damit ein Zusammenhang mit RI bei Annäherung an die Stabilitätsgrenze wird vermutet, kann aber aufgrund der Beschränkung der Rechnungen auf eine Rotorpassage nicht nachgewiesen werden.

YAMADA ET AL. (2008) forschen weiter am selben Thema und untersuchen numerisch das instationäre Spaltwirbel-Verhalten in Zusammenhang mit rotierenden Störungen nahe der Pumpgrenze, diesmal in vier Axialverdichtergittern. Die Ergebnisse zeigen, dass der Spaltwirbel-Zusammenbruch Instabilitäten oder auch rotierende Störungen, ähnlich wie die RI, verursacht. Aufbauend auf experimentellen Untersuchungen der Spaltströmung (HAH ET AL. (2006)) in einem Axialverdichter zeigt die numerische Simulation mittels LES in der Arbeit von HAH ET AL. (2008), dass die Spaltwirbelströmung einen erheblichen Einfluss auf das Strömungsfeld nahe der Stabilitätsgrenze hat. Das beschriebene Wirbelmodell zeigt eine dominante Frequenz, die nicht synchron mit der Rotordrehzahl läuft. Diese Frequenz ist mit der von MÄRZ ET AL. (2002) identifizierten RI-Frequenz vergleichbar.

2.1.2 Beschreibung des *Prestall*-Verhaltens und Vorhersage der Verdichterinstabilitäten

Wie bereits in der Einleitung beschrieben wurde, kann ein Verdichter beim Anfahren von Bereichen mit RS stabil laufen. Der Verdichter arbeitet nicht mehr stabil und das sogenannte Pumpen kann auftreten.

Bei lokaler Rückströmung bleibt ein Teil der Luft im Verdichter gefangen und rotiert mit den Schaufeln mit. Man spricht in diesem Fall vom RS. Dagegen strömt beim Verdichterpumpen das Medium zurück (CUMPSTY (2004)). Die Leistungscharakteristik eines unter RS stehenden Verdichters kann von größerer Bedeutung aufgrund des daraus folgenden Strömungsverhaltens sein. Also ist eine Vorhersage:

- der durch *Stall* verursachten Druckerhöhung
- des schwankenden Massenstroms
- des zugehörigen Betriebspunktes, an dem die Rückkehr vom instabilen zum stabilen Betriebsbereich stattfindet

erforderlich. Experimentelle Untersuchungen zeigen häufig, dass Verdichter trotz vieler Ablösegebiete in einem Schaufelgitter noch zufriedenstellend arbeiten können (CUMPSTY (2004)).

Die meisten Autoren, die die Verdichter-Instabilitäten in der Literatur beschrieben haben, einigen sich über die Definition dieser Mechanismen und über die Folgen, die diese in der Strömung eines Verdichtergitters oder einer gesamten Anlage haben. Sie identifizieren bestimmte Parameter, wie z. B. eine relativ hohe Spaltweite (größer als 3% der Sehnenlänge) und eine Steigerung des Inzidenzwinkels, die solche Instabilitäten verstärken können. In jeder dieser Veröffentlichungen werden allerdings unterschiedliche Kriterien für die Entstehung solcher instationären Strömungsphänomene festgelegt, der als „Ablösungsbeginn“ *Stall Inception* von vielen Autoren benannt wird (CAMP UND DAY (1998); CUMPSTY (2004); VO ET AL. (2008a); SPAKOVSKY UND RODNER (2009)). Bei den resultierenden Kriterien für die Entstehung der Instabilitäten handelt es sich allerdings nicht um eine Verallgemeinerung. Demnach liegt es an jeder spezifischen Verdichter-Geometrie und -Auslegung, welche Faktoren, welche Kriterien oder welche Szenarien die Ausbildung solcher rotierender instationärer Strukturen veranlassen (VO (2010a)).

Viele Untersuchungen stellen unterschiedliche Konzepte für die Kontrolle von RS dar, um die Verdichter länger im stabilen Betriebsbereich zu halten (DAY ET AL. (1999); SPAKOVSKY ET AL. (1999); PADUANO ET AL. (2001); VO ET AL. (2008a)). Die aktiven Kontrollsysteme, realisierbar mittels Aktuatoren an der Gehäusewand, dienen dazu, die rückwärts geströmte Masse zu mindern und damit eine Vergrößerung des Betriebsbereiches zu erreichen.

Modalwellen und *Spikes*

Die Modalwellen und die *Spikes* sind Instabilitätsphänomene, die in Axialverdichtern vor Erreichen der Pumpgrenze auftreten und deswegen zu den Hauptindikatoren in der *Prestall*-Phase zählen. Die Arbeiten von GREITZER UND MOORE (1986) zeigen mit numerischen Simulationen das Auftreten von Modalwellen. Experimentell werden die Modalwellen in der Arbeit von TRYFONIDIS ET AL. (1995) bei neun verschiedenen Schnelllaufverdichtern nachgewiesen, wo sie mindestens 100 Rotorumdrehungen vor dem ersten Pumpstoß auftreten. MCDUGALL ET AL. (1990) zeigt anhand experimenteller Untersuchungen an einem Niedergeschwindigkeitsverdichter das Auftreten von Modalwellen. In dieser Arbeit wird die FFT zur Analyse instationärer Drucksignale eingesetzt und das RS identifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf weitere Veröffentlichungen hingewiesen werden, die die *Spikes* im Wesentlichen behandeln.

DAY (1993) findet an einem schnell laufenden vierstufigen Axialverdichter die *Spikes* im Blattspitzenbereich von mehreren Laufschaufeln und betrachtet diese als ein Merkmal für die Entstehung von einem Mechanismus. Der Beginn des *Stalls* in einem 4-stufigen Hochgeschwindigkeitsverdichter wird von DAY ET AL. (1999) untersucht. Das Thema der aktiven Kontrollsysteme wird beschrieben. Es werden Signalmerkmale aus den Messdaten im Laufe des Versuchs detektiert und die erforderlichen Maßnahmen getroffen, um die Instabilitäten so schnell wie möglich zu unterbinden. CAMP UND DAY (1998) studieren *Spikes* und Modalwellen und die physikalischen Unterschiede zwischen diesen Instabilitätsphänomenen in einem Niedergeschwindigkeitsverdichter. Die *Spikes* bleiben während dieser Untersuchungen nur für kurze Zeit erhalten und sind deswegen in vielen Fällen nicht identifizierbar. In diesen Fällen liegt meistens der Sensor nicht genau an der Position, an der die *Spikes* ausgelöst werden. Deswegen ist die Erkennung von *Spikes* im Signal gescheitert. Die erste Rotorstufe ist die anfälligste Stufe für einen *Spikes*-Beginn. Ferner zeigen die Ergebnisse einen Zusammenhang zwischen der Entstehung dieser beiden Ablöse-Mechanismen und dem Verdichter-Betriebspunkt. Das Stabilitätskriterium der beiden Phänomene unterscheidet sich: Die kurzwelligen Ablösestrukturen,

Spikes, stehen auf einer Seite in Beziehung mit dem dreidimensionalen instationären Strömungsverhalten, gekoppelt mit hohen Inzidenzwinkeln. Auf der anderen Seite stehen die langwelligen Ablösungen, die Modalwellen, in Beziehung mit zweidimensionaler Instabilität des gesamten Kompressionssystems.

MAILACH UND MÜLLER (1998) beschreiben diese Indikatoren als zwei verschiedene tieffrequente, wellenförmige Störungen, die im Bereich zwischen Auslegungspunkt und Pumpgrenze nachgewiesen werden können. Die eine Störung hat eine Wellenlänge, die gleich dem Umfang des Verdichters ist, und ist bereits im Auslegungspunkt auffindbar. Die zweite Störung, die erst nahe der Stabilitätsgrenze einiger Stufen zu beobachten ist, beschränkt sich auf wenige Laufschaufeln und kann nach der Überschreitung der Stabilitätsgrenze zum RS führen und somit als Warnung davor betrachtet werden.

Aufbauend auf den Untersuchungen von INOUE (2001) an einem einstufigen Niederdruckverdichter zur Klassifizierung von RS, wodurch kleine und große Wellenlängen entstehen, setzen INOUE ET AL. (2004) die Wavelet-Transformation zur Analyse von Drucksignalen ein. Diese Arbeit zeigt, ähnlich wie in der Arbeit von MAILACH UND MÜLLER (1998), dass das Auftreten von *Spikes* bereits vor dem Überschreiten der Stabilitätsgrenze zu identifizieren ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die *Spikes* durch unterschiedliche Stator-Rotor-Abstände direkt beeinflusst werden können. Die Ergebnisse bestätigen zusätzlich, dass der Übergang in das klassische RS zunächst mit dem Auftreten einer mehrzelligen Ablösestruktur verbunden ist. Am Gittereintritt sind Drucksensoren in der Umfangsrichtung versetzt am Gehäuse positioniert. Die Ergebnisse bestätigen die von MÄRZ ET AL. (2002) erfassten RI. Die Autoren halten es für möglich, dass diese durch einen Wirbeltransport von der Saug- auf die Druckseite verursacht werden können. Ferner wird es vermutet, dass RI nur bei gleichzeitigem Auftreten kurzweiliger Ablösestrukturen nachweisbar sind (INOUE ET AL. (2001)).

Eine detaillierte experimentelle Untersuchung des RS-Beginns wird von SIMPSON UND LONGLEY (2007) an einem einstufigen Niedergeschwindigkeitsverdichter präsentiert. Hierbei wird nur die aerodynamische Umgebung (z. B. der Inzidenzwinkel) des Rotorgitters geändert, damit sowohl *Spikes* als auch Modalwellen gleichzeitig erscheinen können und danach der Verdichter beim Androsseln in RS hineingeht. Die Rotor-Umgebung wird variiert, damit sich ein neu eingeführter meridionaler Beschleunigungskoeffizient C_{m-a} an der Blattspitze ändert.

$$C_{m-a} = \frac{v_{x,stromab}}{v_{x,stromauf}} \quad (2.1)$$

v_x ist die axiale Geschwindigkeit stromauf der Vorderkante. Die Ergebnisse bestätigen die Erklärung von CAMP UND DAY (1998) über den *Spikes*-Beginn, der auf dem Zusammenhang zwischen *Spikes* und der Inzidenz der Rotorschaukel am Gehäuse aufbaut. Die kritische Inzidenz hängt nicht nur von der Rotor-Geometrie, sondern auch von der aerodynamischen Umgebung ab. Ferner treten die Modalwellen, im Fall einer starken Vermischung der Strömung, unerwartet am Stator-Austritt auf. Das Auftreten von Modalwellen wird in diesem Fall nach dem Druckmaximum in das Verdichterkennfeld verschoben (Abbildung 2.3).

SPAKOVSKY UND RODUNER (2009) beschreiben mittels Wanddruckmessungen Instabilitäten kleiner und großer Wellenlängen auf der Sekundärkennlinie eines einstufigen radialen Turboverdichters. Die Ergebnisse zeigen, dass die verwundene Strömung am Rotoraustritt eine beachtliche Verschiebung der Stabilitätsgrenze bei hochbelastetem Verdichtergitter verursacht und damit der Beginn von *Spikes* und Modalwellen früher als erwartet beginnt.

Einen Hinweis auf aktuelle Arbeiten, die *Spikes* in Verdichtern sowohl in der Entstehungsphase als auch in der Entwicklung detektieren und kontrollieren, ist in der Review von TAN ET AL. (2010) angegeben. In dieser Review wird der Unterschied zwischen *Spikes* und Modalwellen beschrieben.

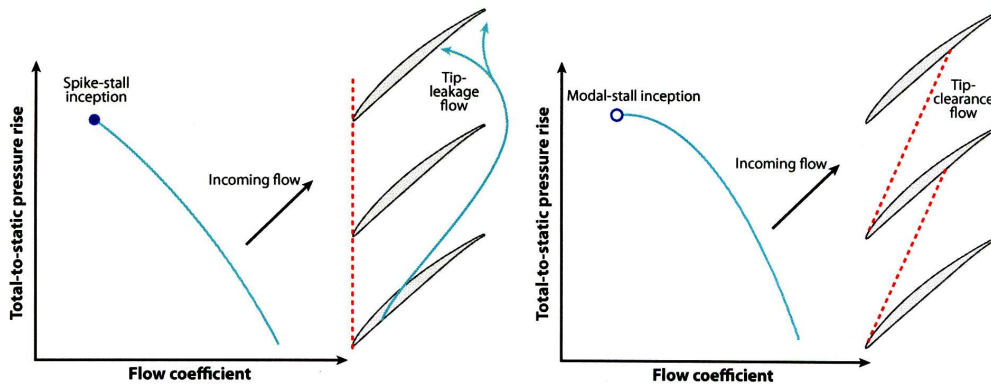


Abbildung 2.3: Kriteriumsvorschlag für den „Ablösungsbeginn“ aus den numerischen Berechnungen von VO ET AL. (2008b): Die gestrichelte Linie deutet auf die Position der Interaktionsebene zwischen der Spaltströmung und der Zuströmung hin

Abbildung 2.3 veranschaulicht das Modell für den Ablösungsbeginn anhand einer Verdichterkennlinie beim Androsseln und anhand der Interaktionsebene zwischen der Spaltströmung und der Zuströmung, vorgeschlagen zuerst von CAMP UND DAY (1998) und

dann in der Arbeit von VO ET AL. (2008b) bestätigt. Die gestrichelte Linie deutet auf die Position der Interaktionsebene hin. Das Modell betrachtet die Steigung der Betriebspunkte auf der Verdichterkennlinie, um zwischen *Spikes*- und Modalwellen-Beginn zu unterscheiden. Wenn der „Ablösungsbeginn“, *Stall*, an einem Betriebspunkt mit negativer Steigung stattfindet, treten *Spikes* auf (Abbildung 2.3 links). Modalwellen erscheinen allerdings vor dem *Stall*, wenn der Betriebspunkt auf dem Druckmaximum oder kurz dahinter liegt (Abbildung 2.3 rechts). Die Studien von VO ET AL. (2008b) und VO (2010b) über die *Spikes*-induzierten RS und von VO (2010a) über den Einfluss von *Spikes* in der Entstehung von RI liefern aussagekräftige Ergebnisse. In diesen Beiträgen wird eine Definition der kurzweiligen Ablösestrukturen anhand numerischer Berechnungen der Spaltströmung in einem Axialverdichter gegeben.

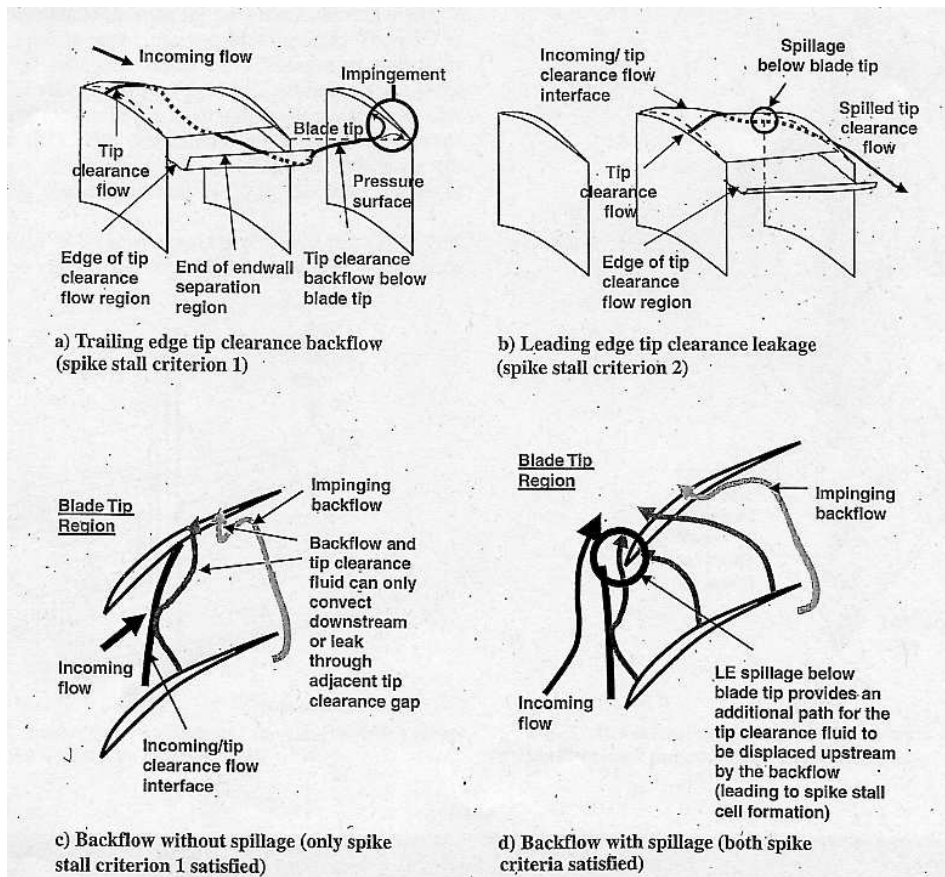


Abbildung 2.4: Skizze zur Darstellung der *Spikes*-Kriterien: Die Spaltströmung, dargestellt mit und ohne Umströmen der Vorderkante (VO (2010a))

Es werden zwei Kriterien für den Beginn von *Spikes* aufgestellt, die aus der Spaltströmung abgeleitet sind. Die Erste, dargestellt in der Abbildung 2.4 a), zeigt die Ausbreitungsrichtung der Spaltströmung aus dem Schaufelkanal heraus. In der Skizze ist die Rückkehr der Spaltströmung an der Hinterkante zu sehen. Das in Abbildung 2.4 b) skizzierte zweite Kriterium veranschaulicht, dass die Spaltströmung die kommende Strömung an der Vorderkante drängt und an der Vorderkante des nächsten Schaufelkanals umspült.

Anhand der Skizze der Spaltströmung an der Schaufelspitze lässt sich die Ausbreitung der Rückströmung in den Abbildungen 2.4 c) und d) zwei Bedingungen erkennen. Die erste Bedingung, in der Abbildung 2.4 c), beschreibt, wie die Interaktionsebene zwischen der Spaltströmung und der kommenden Strömung parallel zur Vorderkanten-Ebene im Schaufelkanal liegt und nicht zum nächsten Schaufelkanal ausläuft. In diesem Fall ist nur das erste *Spikes*-Kriterium erfüllt (siehe Abbildung 2.4 a)). Die Rückströmung kann auf die Hinterkante der Druckseite aufprallen oder durch die nächste Schaufelspalte über die Hinterkante hinausströmen. Die Interaktionsebene kreuzt in diesem Fall auch die nächste Schaufelspalte. Wenn beide Kriterien, dargestellt in a) und b), gleichzeitig erfüllt sind, entsteht die *Spikes*-Zelle. In diesem Fall folgt die Beschreibung der Spaltströmung (siehe die Skizze in Abbildung 2.4 d)), in dem die Interaktionsebene sich vor die Schaufelvorderkante drängt. Der Beginn der Rückströmung an der Hinterkante wird aus der Spaltströmung des benachbarten Schaufelkanals hervorgebracht. Das Umspülen der Spaltströmung an der Vorderkante wird dadurch zugelassen, zielführend zum Beginn der *Spikes*-Zelle. Die experimentellen Untersuchungen vom *Spikes*-Beginn in der Arbeit von DEPPE ET AL. (2006) stimmen mit den numerischen Berechnungen überein, die die beiden Kriterien widerspruchsfrei bestätigen.

Akustische Resonanz

Das Thema wird in vielen Beiträgen mit theoretischem und experimentellem Hintergrund behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird keine vollständige Übersicht über diese Veröffentlichungen gegeben, sondern nur ein Hinweis auf einige Arbeiten, die die Ursachen von akustischen Resonanzen in Axialverdichtern (PARKER (1968); CAMP (1999); HELLMICH UND SEUME (2008); OWCZAREK (2009)), in radialen Niedergeschwindigkeitsverdichtern (LAWLESS UND FLEETER (1995)), in Triebwerken (COOPER ET AL. (2004)) und in Turbomaschinen (GLIEBE (1993); THOMASSIN ET AL. (2009)) darstellen.

2.2 Methoden zur Messung instationärer Phänomene

Es liegen bereits zahlreiche experimentelle Untersuchungen vor, die zum besseren Verständnis von instationären Strömungsphänomenen beitragen. Zur qualitativen Vermessung von Wirbeln sind mehrere Messverfahren wie z. B. Anstrichbilder, die Schlieren-Methode und die Hintergrundschlieren-Methode entwickelt worden, die hochwertige Ergebnisse für die Dichtegradienten-Sichtbarmachung liefern können (FOTTNER (1993); SIEVERDING ET AL. (2000); KLINGE (2003); KLINNER ET AL. (2008)).

Viele hochauflösende Sensoren eignen sich zur Messung instationärer Phänomene. Die Druck- und die Geschwindigkeits-Signale können mithilfe piezoresistiver Drucksensoren bzw. Hitzdrähte mittels hoher Abtastfrequenzen aufgezeichnet werden. Derartige Vermessungen instationärer Phänomene, insbesondere hinsichtlich der Entstehungsphase, ermöglicht die Erforschung der Ursache dieser instationären Zustände und damit die Erweiterung des aerodynamischen Verständnisses der dreidimensionalen Strömungsphänomene in Axialverdichtern. Diese Messungen beschränken sich allerdings auf lokale Größen bzw. punktuelle Aufzeichnungen. Ein bedeutender Fortschritt bei den Untersuchungen der zuvor genannten Vorgänge wird erreicht, wenn ganze Strömungsfelder zeitaufgelöst mit der Particle Image Velocimetry (PIV) erfasst und analysiert werden können.

Für eine Verbesserung der Effizienz in einem Gasturbinenkreisprozess wurden von UHLMANN (2003) die instationären Phänomene in einem Verdichter bei pumpgrenznahen Arbeitspunkten untersucht. Dabei wendet der Autor die Wavelet-Transformation an den Verdichterdrucksignalen an, um die aerodynamischen Verdichterinstabilitäten frühzeitig zu erkennen. Die Ergebnisse aus der Wavelet-Analyse zeigen ähnliche Ergebnisse wie die aus der gefensternten Fourier-Analyse bei unterschiedlichen Betriebspunkten.

2.2.1 Particle Image Velocimetry

PIV ist eine leistungsfähige Messtechnik, zur Erfassung der Geschwindigkeitsvektorfelder zwei- und dreidimensionaler Strömungsphänomene. Deswegen findet diese Messtechnik breite Einsatzmöglichkeiten in Turbomaschinen. Das Messprinzip dieses optischen Messverfahrens basiert auf der Berechnung des Weges, den die Tracerpartikel, die in

der Strömung vorhanden sein müssen, in einer Zeiteinheit zurückgelegt haben. Für optische Techniken der Strömungsvisualisierung müssen diese Partikel sofortigen Änderungen der Strömung folgen können (RAFFEL ET AL. (2007)). Eine Untersuchungsebene wird hierzu durch eine Lichtschnittoptik illuminiert. Die Ebene wird mindestens zweimal durch kurze Blitze mit einer bekannten Trennungszeit (Δt) belichtet. Die Analyse dieser Partikelspuren läuft auf lokale Partikelversetzungen hinaus. Da die Trennungszeit zwischen den Aufnahmen bekannt ist, lassen sich hieraus Geschwindigkeiten ermitteln.

Das Wesentliche am PIV-Messverfahren ist die Erfassung des vollständigen Strömungsfeldes mit hoher räumlicher Auflösung bei begrenzter zeitlicher Auflösung. Es handelt sich dabei um „momentane“ Geschwindigkeitsvektoren, deren Richtungen und Beträge simultan erfasst werden können. Zur PIV-Messung sind folgende Komponenten notwendig: Ein Laser zur Beleuchtung des zu untersuchenden Strömungsfeldes, eine oder mehrere Kameras zur Bildaufnahme und Seeding-Partikel mit gleicher Dichte wie die Strömung. Bei der PIV sind sehr kurze Zeitabstände und eine ebenso kurze Impulsdauer erforderlich. Dies hat die Entwicklung spezieller Pulslaser und Kameras erforderlich gemacht. In dem Buch von RAFFEL ET AL. (2007) werden die Eigenschaften und Anforderungen für den Einsatz von PIV bei unterschiedlichen praktischen Anwendungen ausführlich betrachtet. Im folgenden Kapitel wird speziell auf das hier eingesetzte PIV-System eingegangen.

2.2.2 Einsatz von PIV in Turbomaschinen

WERNET (2000) gibt eine Übersicht über PIV-Entwicklungen zum Einsatz in Turbomaschinen. Die optische Zugänglichkeit, die Einbringung des Laserlichtschnitts, die Zufuhr von Seeding-Partikeln und die CCD-Kamera-Technologie werden in der Arbeit diskutiert. Die Ergebnisse von erfolgreichen PIV-Anwendungen in einem transsonischen Axialverdichtergitter und in einem radialen Turboverdichter werden dargestellt, um sowohl das zeitgemittelte als auch das zeitaufgelöste Geschwindigkeitsvektorfeld zu berechnen. Für die Messungen im Axialverdichter werden die Seeding-Partikel vor der Messebene lokal zugeführt. Durch turbulente Mischungsvorgänge ergibt sich die erforderliche homogene Verteilung, die für den Korrelationsprozess zur Auswertung der PIV-Bilder erforderlich ist. Auf der anderen Seite wird das Seeding für den Einsatz in dem radialen Verdichter in einem Beruhigungsverbehälter 10 Meter vor dem Rotor eingebracht.

TISSERANT UND BREUGELMANS (1997) wenden die PIV-Technik an einem subsonischen Axialverdichter-Laufrad an. Mithilfe eines optischen Periskops wird der Lichtschnitt in Kanalmitte so ausgerichtet, dass die Messebene parallel zur Rotor-Achse und zur Gehäusewand liegt. Bei dieser Konfiguration stellen die Autoren fest, dass die sogenannten *Out of plane* Geschwindigkeitskomponenten, die Radialkomponenten des Strömungsvektors, signifikant sind und einen Qualitätsverlust bei der Auswertung der PIV-Bilder hervorrufen.

Detaillierte PIV-Messungen des gesamten Ringraumes im selben Verdichter führen BALZANI ET AL. (2000) durch und vermessen die Strömung in mehreren Ebenen. Diese Arbeiten dienen dazu, die Gitterströmung bei kleinen Mach-Zahlen zu beobachten. Dazu wird der Lichtschnitt mithilfe einer Periskopsonde stromauf des optischen Zugangsfensters eingebracht. Aufgrund der Positionierung der Lichtschnittsonde in der Zuströmung und der geringen Umlenkung der Schaufeln kann der Bereich einer Teilung nahezu vollständig ausgeleuchtet werden. Der Bereich der Hinterkantenabströmung wird allerdings verschattet. Der Bereich der Kernströmung wird für verschiedene radiale Schnitte aufgenommen und die zweidimensionalen Strömungsfelder werden über der Schaufelhöhe erfasst. Ferner können die Autoren anhand einer Kombination von Linsen die Problematik des Periskops in Bezug auf die Lichtschnittdicke gut beheben und einen parallelen Lichtschnitt mit einem 2 mm dicken Strahl einstellen.

ESTEVALDORAL ET AL. (2000) setzen eine Zwei-Farb-CCD-Kamera mit einer Auflösung von 3000 x 2000 *Bildpunkten* an einem Niedergeschwindigkeitsventilator ein. Diese Art von Kameras kann die momentane Kennzeichnung der Seedingpartikel im Strömungsfeld doppelt aufnehmen. Damit kann die Mehrdeutigkeit von Richtungen der Partikelverschiebungen mithilfe von grünem und rotem Laserlicht behoben werden. Die Änderung des Geschwindigkeitsvektorfeldes wird untersucht beim Einstellen eines neuen Betriebspunktes. Vergleiche der zeitgemittelten PIV-Aufnahmen mit numerischen Untersuchungen zeigen, dass Reibungseinflüsse in den Nabengrenzschichten numerisch nicht vollständig erfasst werden können.

LEHR UND BÖLCS (2000) setzen PIV im ebenen Kanal in transsonischer Strömung ein und führen zeitaufgelöste Feldmessungen an einer Verdichterschaukel durch, um die Auswirkung von Schaufelschwingungen zu erforschen. Zuerst wird das stationäre Strömungsfeld vermessen. Dann werden phasengemittelte PIV-Messungen durchgeführt, um die zeitabhängigen periodischen Wirbelstrukturen in der Strömung zu erfassen. Die phasengemittelten Datensätze werden statistisch aufbereitet. Die Ergebnisse können das

Wirbelwandern auf der Saugseite erfassen, indem der Laser an diskreten Phasenlagen des schwingenden Schaufelprofils getriggert wird und eine phasenaufgelöste Sortierung der Einzelbilder erreicht wird. Die Ergebnisse zeigen zusätzlich den senkrechten Verdichtungsstoß auf der Schaufel-Saugseite.

Die PIV-Messungen von WERNET ET AL. (2001) an einem radialen Turboverdichter ergeben Momentanaufnahmen des komplexen Strömungsfeldes beim Verdichter-Pumpen. Die digitale PIV (DPIV) wird mit Druck-Messungen kombiniert, um das 'Prestall'- und das 'Presurge'- Strömungsverhalten zu untersuchen. Im stabilen Bereich können die Aufnahmen gute Ergebnisse über das Strömungsverhalten liefern. Der Verdichter wird allerdings so schnell zum Pumpen übergeleitet, dass keine signifikanten PIV-Aufnahmen während des Ablösungsbeginns verarbeitet werden können. LANG ET AL. (2002) führen PIV-Messungen an einer transsonischen Turbine durch. Der Laserlichtschnitt wird mit einer Periskopsonde stromab des Zugangsfensters eingebracht. Für die Stereo- PIV-Messungen werden der Laserlichtschnitt und zwei Kameras auf einer gemeinsamen Platte befestigt, damit rotorgetriggerte Aufnahmen gemacht werden können.

SANDERS ET AL. (2002) führt PIV-Messungen an einem einstufigen Verdichter mit Vorleitrad im subsonischen und transsonischen Betriebsbereich durch. Die Wechselwirkung rotierender und stehender Bauteile wird in dieser Arbeit untersucht, die ein instationäres Strömungsfeld in dem darauf folgenden Stator verursacht, wenn der Verdichter im transsonischen Bereich betrieben wird. Die rotorgetriggerten PIV-Messungen zeigen die zeitliche Entwicklung des Rotor-Wirbels im Stator. Zur Analyse der Abströmung eines ebenen Verdichtergitters führen WEIDENFELLER ET AL. (2003) experimentelle Untersuchungen mittels PIV bei einer Zuströmmachzahl von $Ma = 0,17$ und verschiedenen Zuströmwinkeln durch, um die Ausprägung des Kanalwirbels und des Spaltwirbels zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen die Lagen der Wirbelzentren und die Erstreckung der Wirbelachsen im Naben- und Gehäusebereich.

2.2.3 Einsatz von PIV innerhalb der Fluidodynamik

Auch außerhalb des Bereiches der Turbomaschinen etabliert sich ein zeitaufgelöstes PIV-System (Time-resolved TR-PIV PUST (2003)) im Bereich der Fluidodynamik zur Vermessung instationärer Strömungsphänomene bei der Umströmung von Körpern. KIM ET AL. (2006) untersuchen mit TR-PIV den Nachlauf eines Zylinders mit gestörter

Anströmgeschwindigkeit. Das PIV-System ist mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (250 *Bilder/s*) ausgerüstet. Die Abtastfrequenz ist 40-mal größer als die Wirbelablösefrequenz. Ein großer Datensatz aus 4096 Bildern wird aufgenommen, um bis zu 100 Wirbelzyklen zu analysieren.

Zur Messung der dreidimensionalen Strömung im Nachlauf eines Zylinders setzen SUNG UND YOO (2001) die TR-PIV ein, die mit einer Bildfrequenz zwischen 250 und 2000 Aufnahmen pro Sekunde und mit unterschiedlicher Kamera-Auflösung (480 x 420 *Bildpunkte* bzw. 160 x 140 *Bildpunkte*) arbeitet. Das mit dem PIV-System gewonnene Geschwindigkeitssignal an einer ausgewählten Position wird benutzt, um den einzelnen Aufnahmen eine Phasenlage zuzuordnen.

Die instationären aerodynamischen Kräfte, die an einem umströmten Körper mit einem quadratischen Querschnitt angreifen, werden von KURTULUS ET AL. (2007) unter Verwendung von TR-PIV ermittelt. Die Energie des angewandten Lasers beträgt 18 *mJ/Pulse* bei einer Frequenz von 1 *KHz*. Die Hochgeschwindigkeitskamera nimmt 1000 Doppelbilder pro Sekunde auf und hat eine Auflösung von 1024 x 1024 *Bildpunkten* (Bildpunktgröße = 17 μm). Das Interrogationsfenster war 31 x 31 *Bildpunkte* groß. WERNET (2007) untersucht die turbulente Strömung in einem kalten und einem heißen Düsenstrahl mittels TR-PIV-Technik. Die Aufnahmegeschwindigkeit des Systems erreicht bis zu 25 *KHz* mit einer Kamera-Auflösung von 640 x 80 *Bildpunkten*. Die Ergebnisse zeigen bei der Variation der Reynolds-Zahl, wie der konvektive Anteil der Turbulenz-Zunahme sich zwischen der kalten und der heißen Strömung bei derselben Mach-Zahl unterscheidet.

Auswertung von PIV-Bildern mit konventioneller PIV-Technik: phasengemittelte PIV-Messung

Um das Verständnis über die Spaltströmung zu verbessern, untersuchen WERNET ET AL. (2002) den Blattspitzenbereich eines Verdichterrisors mittels 3D-DPIV. Eine Periskopsonde wird stromauf des Rotors eingesetzt. Eine Sequenz von 100 Bildern wird rotorgetriggert aufgenommen und zeitlich gemittelt. Die Messungen zeigen eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen numerischer Simulationen. Dabei treten aber große Abweichungen in der Radialkomponente des Geschwindigkeitsvektors auf. Bei hoher aerodynamischer Belastung deuten die Messungen auf einen größeren Spaltwirbel hin, der sich stromauf weiter als im Auslegungspunkt ausbreitet. Damit wird eine Blockade im größten Bereich der Strömung innerhalb einer Teilung verur-

sacht.

Die erste Stufe einer zweistufigen axialen Pumpe wurde in der Arbeit von CHOW ET AL. (2003) mittels PIV untersucht. Die Beschaukelung vom Rotor und die vom Stator werden aus transparentem Material (Acryl) so angefertigt, dass der Brechungsindex der Profile dem der fließenden Strömung (in Wasser aufgelöstes Natriumiod) angepasst wird. Die Arbeit konzentriert sich auf das Strömungsfeld und die Turbulenz innerhalb des Rotor-Nachlaufs. Die PIV-Auswertung des getriggerten Messvorgangs liefert ein phasengemittelt stationäres Geschwindigkeitsvektorfeld. Durch Wiederholung der Messung an unterschiedlichen Rotorpositionen, die jeweils einer Phasenlage entsprechen, kann eine ganze Teilung erfasst werden. Wenn die Triggerung des PIV-Systems mit einem bestimmten Phasenwinkel erfolgt, wird das periodische Verhalten der Strömung in den phasengemittelten Ergebnissen detektiert. Die Eigenschaften des Phänomens der Hauptfrequenz werden ermittelt (siehe auch BREDE (2004)). Auffällige Phänomene werden veranschaulicht, wie z. B. die Entwicklung von Turbulenzen am Gitteraustritt, die aus dem sogenannten *'wake kinking and chopping'* entstehen (siehe auch UZOL ET AL. (2002)). Diese Benennungen beschreiben die Form und die Frequenz des Wirbels im Nachlauf der Rotorschaukel.

JIANG ET AL. (2009) setzen rotorgetriggerte PIV-Messungen in dem Rotorgitter ein, an dem RI in der Arbeit von MÄRZ ET AL. (2002) nachgewiesen wurden, um den „Ablösungsbeginn“ in einem axialen Niedergeschwindigkeitsverdichter zu visualisieren. Das Strömungsfeld nahe eines Schaufelprofils wird für zwei Eintrittsbedingungen, nämlich für gestörte und homogene Zuströmung, untersucht. Zeitlich hochaufgelöste Drucksignale am Gitteraustritt dienen dazu, die Entwicklung der abgelösten Instabilitäten und die Eigenschaften der Ablösungen im Verdichter zu analysieren. Die Signalaufnahme der Drucksensoren findet an drei Umfangspositionen statt. Die dynamische Entwicklung der Instabilität, die durch die gestörte Zuströmung verursacht wird, baut die Intensität der Ablösungen an der Verdichterschaukel ab. Die Ergebnisse zeigen, dass die eingeführte Störung in der Zuströmung einen positiven Einfluss auf den Verdichter hat. Aufgrund dieser Störung wird der Wirbel bei Fortpflanzung in der Umfangsrichtung abgeschwächt.

LIU ET AL. (2004) führen experimentelle Untersuchungen des instationären Strömungsfelds im Rotorgitter eines Axialverdichters mittels stereoskopischer PIV durch. Dieses PIV-System braucht zwei synchronisierte Kameras, die die gemessenen Ebenen im Blattspitzenbereich von zwei Ansichten aufnehmen. Der untersuchte Betriebspunkt liegt nahe

der Stabilitätsgrenze des Rotors. Die momentanen Geschwindigkeitsvektorfelder werden mittels phasengetriggelter PIV-Messungen errechnet und zeigen den Beginn und die Entwicklung des Spaltwirbels an, dessen Zusammenbruch eine größere Blockade im Gittereintritt verursacht. Damit entstehen wider Erwarteten höhere Verluste als die, die in der Auslegung berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen auch den Beginn und die Entwicklung des Eckenwirbels. In der Arbeit von LIU ET AL. (2004) wurde erklärt, dass die Aussagen hauptsächlich für Niedergeschwindigkeitsverdichter verwendbar sind.

Der Einsatz von PIV an einem einstufigen radialen Hochdruckverdichter wird mehrmals in der Literatur behandelt (HAYAMI ET AL. (2004); VOGES ET AL. (2006)). HAYAMI ET AL. (2004) untersuchen die Strömungsvektorfelder im Diffusor und im Vorlaufrad eines Verdichters mit einem Totaldruckverhältnis größer als sechs. Mittels eines Doppelpuls-PIV-Systems wird der Diffusor mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von $3 Hz$ untersucht. Der Rotor wird mittels eines Doppelbild-PIV-Systems mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von $1,5 Hz$ untersucht. Eine Vielzahl von Spiegeln und ein Lichtschnitt-Projektor leiten das Laserlicht an den zu untersuchenden Ebenen ein. Die Stoßwellen werden im Diffusor und im Rotor veranschaulicht. Die phasengemittelten PIV-Ergebnisse zeigen die dreidimensionale Konfiguration der Stoßwelle durch die Ermittlung der Geschwindigkeitsvektorfelder an fünf verschiedenen Radien im Rotor. Für zwei Durchflusskennzahlen zeigen die Ergebnisse, dass die Stoßwelle intensiver wird und ihre Position sich stromaufwärts bewegt, wenn die Durchflusskennzahl reduziert wird. In derselben Arbeit untersuchen HAYAMI ET AL. (2004) den radialen Verdichter nahe der Pumpgrenze und zeigen dort, dass der Gradient der relativen Mach-Zahl besonders an der Schaufelspitze groß ist und dass der Inzidenzwinkel besonders hinter einer Stoßwelle in großen Maßen positiv wird. Die Rotor-Stator-Interaktion wird mittels rotorgetriggerten PIV-Messungen untersucht. Das dadurch verursachte instationäre Vektorfeld wird visualisiert. Die Mach-Zahl-Isolinien zeigen eine Änderung in der Konfiguration der Stoßwelle an der Saugseite einer Diffusor-Leitschaufel. Diese Arbeit macht darauf aufmerksam, dass die momentanen Strömungsfelder, mittels konventioneller PIV-Systeme ermittelt, einzelne Phänomen-Strukturen mitsamt Rückströmung aufklären können. Die Untersuchungen von VOGES ET AL. (2006) beschränken sich auf den Diffusor eines neuentwickelten Verdichters mit einem Totaldruckverhältnis von sechs.

ESTEVALDORAL ET AL. (2007) führen PIV-Untersuchungen in einem transsonischen Verdichter bei unterschiedlichen Betriebspunkten durch, um die Instabilitäten in Strömungsfeldern, resultierend aus der Interaktion zwischen einem Wirbel-Generator und dem dar-

auf folgenden Rotor, zu studieren. Der Abstand zwischen dem Generator und dem Rotor wird auch mittels instationärer numerischer Berechnung bestimmt. Bei kleinerem Abstand werden phasengemittelte PIV-Messungen ermöglicht, da die Ablösefrequenz aus dem Generator synchron mit der Frequenz der Ablösungen am Rotor läuft.

Der Einfluss der Interaktion zwischen Rotor-Blattspitzenbereich und dem *Casing treatment* wird in einem transsonischen Axialverdichter von VOGES ET AL. (2008) experimentell und numerisch untersucht. Durch eine besondere Behandlung der Gehäusewand, *Casing treatment*, wird die Gehäusegrenzschicht verändert, um den Einfluss von Spaltströmung auf die Stabilitätsgrenze der Stufe zu mindern. Die experimentellen Untersuchungen werden mittels PIV an drei Ebenen mit verschiedenen Radien nahe des Gehäusespaltes durchgeführt. Eine Lichtschnittebene liegt innerhalb des Spalts. Der Einsatz von PIV an dem einstufigen Verdichter in dieser Arbeit zeigt, dass PIV für die Ermittlung von Geschwindigkeitsvektorfeldern in sehr engen Bereichen in Turbomaschinen eingesetzt werden kann.

FERREIRA ET AL. (2009) führen phasengemittelte PIV-Messungen an einer Windturbine mit vertikaler Rotationsachse durch. Das aerodynamische Strömungsverhalten wird auf der Rotorblatt-Saugseite und insbesondere die dynamischen Ablösungen bei verschiedenen Reynolds-Zahlen untersucht. Das gewonnene Geschwindigkeitsvektorfeld erfasst die komplette Umdrehung des Rotorblatts. Die Entwicklung von Wirbelabriss an der Rotor-Vorderkante und die Wirbelablösungen an der Rotor-Hinterkante werden anhand des phasengemittelten Zirkulationsvektorfeldes analysiert.

2.2.4 Problematik der zeitlichen Auflösung und Einordnung der Arbeit

Stehende Systeme haben den Vorteil des einfachen Versuchsaufbaus, der guten Zugänglichkeit für messtechnische Applikationen und bieten zusätzlich die Möglichkeit, Strömungsphänomene separat zu untersuchen (ULBRICHT (2002); WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2004)). Allerdings entfällt bei solchen Systemen im Vergleich zu rotierenden Gittern die Festlegung eines Triggersignals, das zu phasenaufgelösten PIV-Messungen nötig ist. In diesem Fall muss der Phasenwinkel der einzelnen PIV-Bilder auf andere Weise ermittelt werden.

Im stehenden Ringgitter existieren zwar periodische Vorgänge unterschiedlicher Frequenzen, jedoch lässt sich an diesem kein eindeutiges Triggersignal gewinnen. RI sind in den Rohdaten der Hitzdraht- oder der Druck-Signale über die Zeit nicht sichtbar (WEIDENFELLER (2002)). Heutzutage wird PIV oft an instationären Strömungsfeldern eingesetzt, weil diese Technik sich sehr gut sowohl für zeitlich als auch räumlich aufgelöste Messungen eignet.

Bei der Auswertung der PIV-Bilder setzen WERELEY UND MEINHART (2001) einen modifizierten Kreuzkorrelationsalgorithmus ein. Die dabei angewandte adaptive Interrogationstechnik zeigt, dass die Geschwindigkeitsvektoren im wandnahen Bereich genauer ermittelt werden können. TINAR UND CETINER (2006) erforschen selbsterregte Schaufelschwingungen mittels der PIV-Technik, die mit einer Beschleunigungsmessung korreliert wird. Obwohl die Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera deutlich geringer als die Frequenz der Schwingung ist und damit keine Auflösung einer ganzen Periode der Schwingung möglich ist, wird die Wirbelnachbildung in der periodischen Schwingung des Schaufelprofils detailliert analysiert. Die PIV-Bilder werden selektiv aufgenommen. Anhand einer Nachsortierung der Bilder kann die Wirbelentwicklung ausführlich beschrieben werden.

PEREIRA GOMES UND LIENHART (2007) untersuchen selbstinduzierte Schwingungen eines flexiblen Zylinders in einer laminaren Strömung mittels PIV. Die gemessene Ebene ist die zur Zylinderachse senkrechte Ebene. Die Analyse der Strömung-Zylinder-Interaktion ist das Ziel dieser Untersuchungen. Deswegen wird das PIV-System so angepasst, dass sowohl das zeitlich-phasen-aufgelöste Geschwindigkeitsvektorfeld in der Nähe des Zylinders als auch die instationäre Position des schwingenden Zylinders entlang einer Periode erfasst werden können. Der dafür benutzte Detektor erfasst die Schwingung des Zylinders anhand der PIV-Aufnahmen und ist in der Lage, die Aufnahmen gleich nach Phasenlage zu sortieren. Zwei Laser-Quellen werden benutzt, um den Schatten des Zylinders, verursacht durch den einen Laser, mit dem zweiten Laser zu beleuchten. Eine weiterführende Arbeit der Autoren behandelt die selbstinduzierten Schwingungen von zwei- und dreidimensionalen Strukturen in turbulenter Strömung mittels PIV (PEREIRA GOMES ET AL. (2009)).

Als 'Off-line'-phasengemittelte PIV-Messungen bezeichnet FISCHER ET AL. (2009) die Methode zur Phasennachsortierung von PIV-Bildern in einer Triebwerksbrennkammer mithilfe der Hilbert Huang Transformation (HHT). Diese Transformation ist eine empirische Methode, die ein breitbandiges Zeitsignal in einem schmalbandigen zerlegt. Die

Analyse mittels dieser Transformation liefert den Phasenwinkel und die Amplitude des Signals in einer Zeitfunktion. Im dargestellten Algorithmus wird ein Amplituden- sowie ein Frequenz-Filter benutzt. Es hat sich in den Ergebnissen dieser Arbeit herausgestellt, dass die Anwendung des Filters auf Signale mit höheren Frequenzen es schwieriger macht, einen bestimmten Frequenzbereich einzustellen. Der Grund dafür liegt an der sinkenden Anzahl der Messpunkte pro Periode. Der Einsatz des Algorithmus ist damit begrenzt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Visualisierung von selbsterregten Strömungsvorgängen oftmals nicht gewährleistet ist. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methodik, die dazu dient, solche instationären Phänomene zu visualisieren.

3 Versuchsaufbau und Messtechnik

In diesem Kapitel wird die Versuchseinrichtung zur Realisierung der Wirbelstraße dargestellt und die dafür benötigte Messtechnik.

3.1 Realisierung der Karmanschen Wirbelstraße

Umströmung von Zylinder

Nach der Newtonschen Theorie ist das Vorderteil eines Körpers für seinen Widerstand maßgeblich. Anhand der Newtonschen Formel wird die Widerstandszahl ζ_W zur Kennzeichnung der Körperform eingeführt. Die Widerstandszahl ζ_W , definiert nach Gleichung (3.1), wird mit dem dynamischen Druck $\frac{\rho}{2} c^2$ und dem größten Querschnitt senkrecht zur Anströmrichtung, A , dimensionslos gemacht,

$$F_W = \zeta_W \frac{\rho}{2} c^2 \cdot A \quad (3.1)$$

wobei F_W die Widerstandskraft, c die Anströmgeschwindigkeit und ρ die Dichte des Fluids ist. Die Bestimmung der ζ_W -Werte von Körperformen erfolgt durch experimentelle Untersuchungen.

In einer laminaren Strömung sind die Stromlinien im Nachlauf eines Zylinders gerade. Der Druck bleibt dabei konstant. Eine kleine kurz dauernde Druckschwankung, wie z. B. ein lokaler Unterdruck, bewirkt eine Krümmung der umliegenden Stromlinien. Wenn der Unterdruck sich verstärkt und sich in dem Strömungsfeld ausbreitet, kann es zum Einrollen eines Strömungsteils kommen. Der Wirbel wird gebildet.

Diese Wirbelbildung wird durch Reibungskräfte bzw. Schubspannungen gedämpft. Die laminare Strömungsform kehrt in die gerade Form zurück, wenn die Schubspannun-

gen größer als der Druckaufbau werden. Das Verhältnis zwischen den Druckkräften (Trägheit) und den Reibungskräften (Viskosität) unterscheidet sich nicht von der Reynolds-Zahl (BÖSWIRTH (2007)).

Mit wachsenden Reynolds-Zahlen wird zwischen unterschiedlichen Strömungsphasen differenziert: Von einem laminaren Nachlauf mit zwei Wirbeln am Zylinder, zu einem Beginn der pendelnden Bewegung, bis zu einer alternierenden Ablösung von Wirbelpaaren. Ab einer bestimmten Reynolds-Zahl kehren die Stromlinien nach einer Krümmung nicht mehr zurück. Diese periodischen Wirbelablösungen können einen Zylinder so zum Schwingen bringen, dass zylindrische Bauwerke bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit einstürzen können (Einsturz von Tacoma Brücke).

Das in diesem Kapitel zu messende selbsterregte Phänomen wurde von Theodore von KARMAN (1911) erstmals nachgewiesen und berechnet. Die Karmansche Wirbelstraße (KWS) ist ein periodisches Phänomen, das hinter einem Zylinder unter bestimmten Strömungsbedingungen entsteht. In der Wirbelstraße bilden sich zwei von der Strömung fortgetriebene Wirbelreihen, die sich jeweils in die entgegengesetzte Richtung drehen. Zwischen den beiden Wirbelreihen stellt sich eine pendelnde Bewegung der Flüssigkeit ein.

Der „Grundzustand“, eine periodische Struktur der Wirbelstraße im Bereich $125 \leq Re \leq 160$, zeigte ein extrem regelmäßiges Strömungsverhalten (BERGER (1964)). Die Grenzschicht bleibt laminar. Die Wirbelteilung bleibt annähernd unverändert, während die Breite der Wirbelstraße wächst und die Zirkulation der Wirbelkerne nimmt infolge Reibung ab (SIGLOCH (2007)). Das Hitzdrahtsignal wird durch eine klare Periodizität charakterisiert, die oberhalb dieses kritischen Reynolds-Zahl-Bereiches nach und nach abklingt. Die Struktur der Wirbel wird dann zunehmend chaotischer.

Die Wirbelstraße ist in vielen anderen Arbeiten noch ausführlicher erläutert KAPPLER (2002); EL AKOURY ET AL. (2008); PRASANTH UND MITTAL (2008). Zur Realisierung der KWS müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein. Zuerst wird die Größe des Zylinderdurchmessers festgelegt, der in direktem Zusammenhang mit der Anströmgeschwindigkeit steht. Die Strömung ist durch die dimensionslose Kennzahl, die Reynolds-Zahl, charakterisiert. Hierbei steht c für die Anströmgeschwindigkeit, ν für die kinematische Viskosität ($\nu_{Luft} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) und d für die charakteristische Ausdehnung des

Zylinders in diesem Fall den Durchmesser.

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (3.2)$$

Die Reynolds-Zahl ist sowohl proportional zu c als auch zu d . Es ist an Gleichung 3.2 zu erkennen, dass bei geringer Viskosität die Reynolds-Zahl sehr groß ist und damit starke Turbulenz vorhanden ist.

Um einen möglichst periodischen Verlauf des Strömungsfelds zu erzielen, der durch äußere Einflüsse nicht leicht gestört werden kann, wurden die Messungen mit einem Zylinderdurchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ und bei einer Anströmgeschwindigkeit von $0,9 \text{ m/s}$ ($\pm 0,1 \text{ m/s}$) durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit kann nicht beliebig klein eingestellt sein, da sonst bereits kleine Störungen aus der Umgebung große Auswirkungen auf die Homogenität der Geschwindigkeit hervorrufen. Die Anströmgeschwindigkeit wurde mittels PIV zunächst dadurch eingestellt, dass ein Geschwindigkeitsvektorfeld einmalig berechnet wurde. Hieraus resultiert eine Reynolds-Zahl zwischen $Re = 106$ und $Re = 133$.

Die andere dimensionslose Größe, die einen Zusammenhang zwischen einer Zeitskala, einer Geschwindigkeit und einer charakteristischen Länge herstellt, ist die Strouhal-Zahl. Die Strouhal-Zahl steigt zunächst mit zunehmender Reynolds-Zahl an und bleibt dann in einem weiten Reynolds-Zahl-Bereich auf einem konstanten Niveau für dieses Ablösephänomen. Die Untersuchungen von ROSHKO (1954) liefern hierzu eine Strouhal-Zahl von $Sr = 0,18$. Zusammen mit dem Durchmesser des Zylinders führt dies zu einer Wirbelfrequenz zwischen $f = 72 \text{ Hz}$ und $f = 90 \text{ Hz}$ nach folgender Gleichung:

$$Sr = \frac{f \cdot d}{c} \quad (3.3)$$

Experimenteller Aufbau

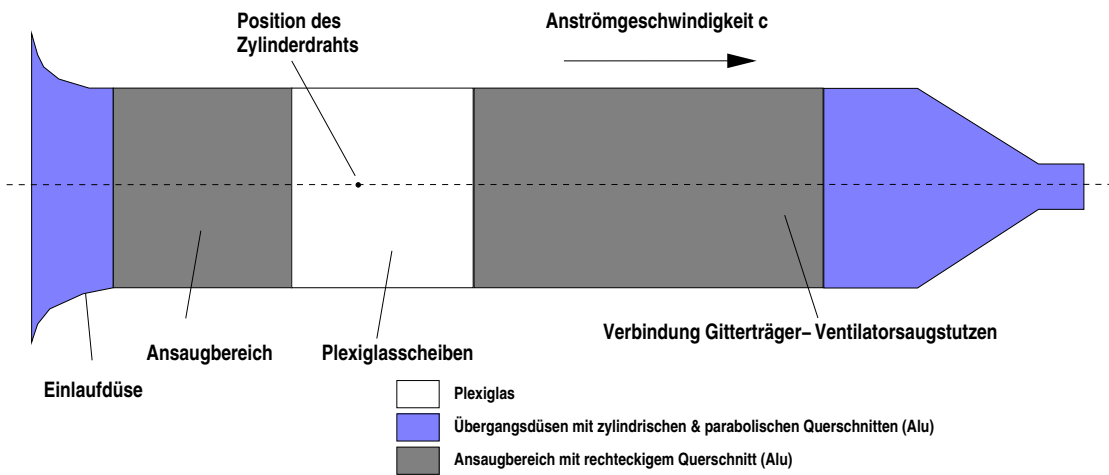


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Windkanals

Das Experiment wurde in einem Windkanal mit quadratischem Querschnitt durchgeführt (Abbildung 3.1). Der 2 m langen Kanal hat einen rechteckigen Strömungsquerschnitt mit einer Breite von $B = 206\text{ mm}$ und eine Höhe von $H = 70\text{ mm}$.

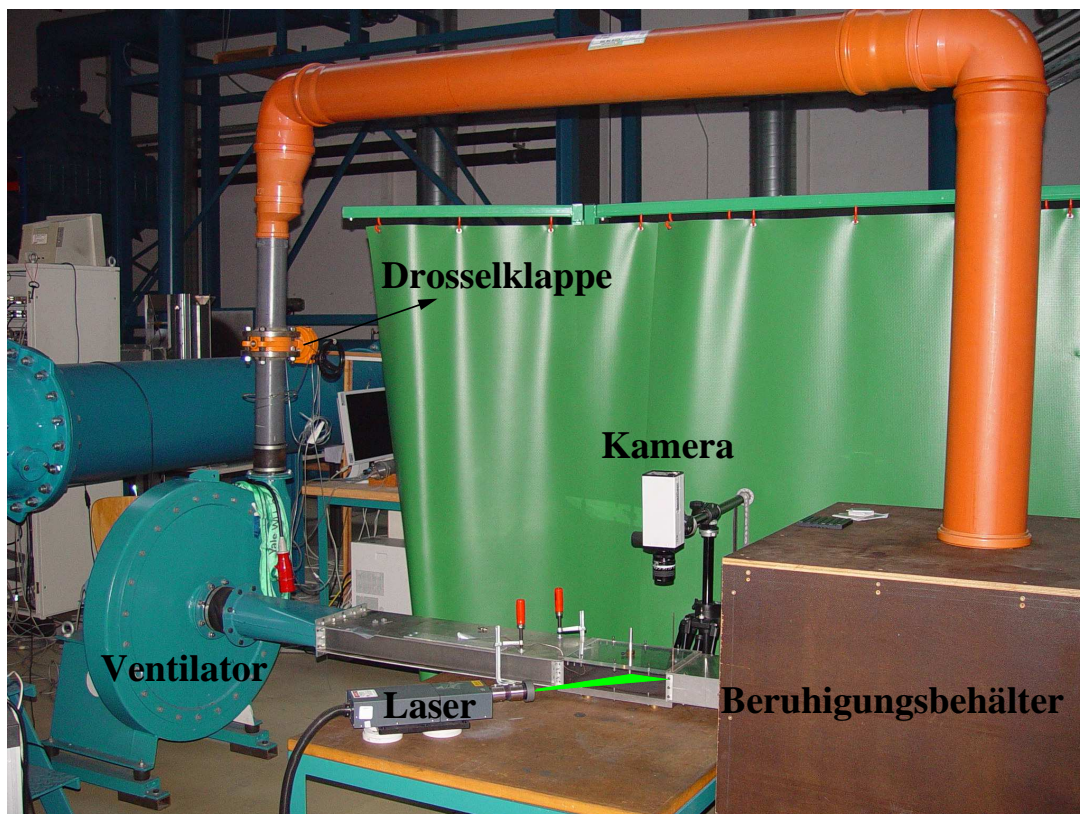


Abbildung 3.2: Foto der Versuchseinrichtung

Abbildung 3.2 zeigt ein Foto der Anlage. 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. Stromab folgt ein Übergangsstück, das in das zylindrische Ansaugrohr des Ventilators führt. Auf der Druckseite kann mithilfe einer Drosselklappe der Durchsatz zusätzlich verändert werden. Vom Ventilatoraustritt führt die Druckleitung das Fluid zurück in den Beruhigungsbehälter. Die optische Zugänglichkeit ist durch Plexiglasscheiben an den Seitenwänden und auf der Oberseite gewährleistet.

Im Rahmen der hier durchgeführten PIV-Messungen dienen Voruntersuchungen dazu, das Strömungsfeld ohne Kamera-Auswertung 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 3.3 dargestellte Ergebnis wurde unter diesen Bedingungen mit einer CCD-Kamera und Laserbeleuchtung gewonnen. Das Bild zeigt eine ähnliche Struktur wie in der Fotografie von KAUTZKY (1997).

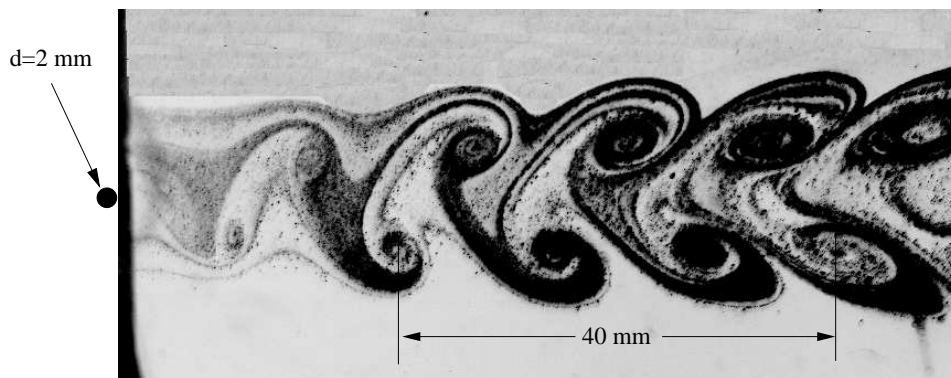


Abbildung 3.3: Visualisierung der Karmanschen Wirbelstraße durch Einbringen von Seeding

Einsatz von PIV-Messtechnik

Es existieren viele Beiträge experimenteller Art über die KWS. Einen sehr umfangreichen Literatur-Überblick zum Thema KWS liefern WILLIAMSON (1996); KAUTZKY (1997) und WILLIAMSON UND GOVARDHAN (2004). Eine Übersicht gibt die Arbeit von

HUANG ET AL. (2006), der eine dreidimensionale Vermessung der Wirbelstruktur mit der PIV-Technik im Nachlauf eines Zylinders durchgeführt hat. Der schematische PIV-

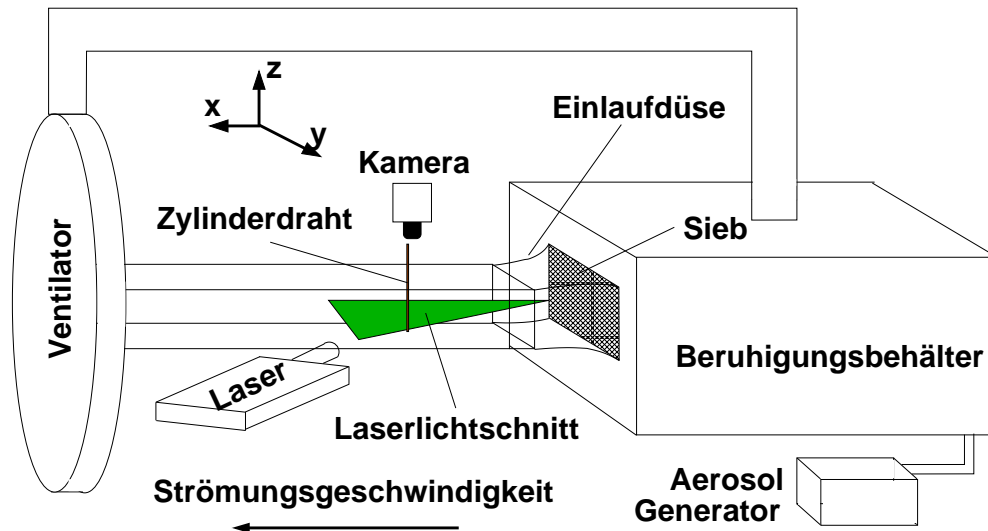


Abbildung 3.4: Skizze des Kreislaufs

Aufbau auf dem Versuchsträger wird in Abbildung 3.4 ersichtlich. Zur Berechnung des Geschwindigkeitsvektorfelds im Nachlauf des Zylinderdrahts wurde die Ebene senkrecht zur Zylinderachse mit PIV vermessen. 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 in axialer Richtung senkrecht zur Zylinderachse, und mit der Kamera wird ein Bereich von etwa $50 \times 45\text{ mm}$ im Nachlauf des Zylinders erfasst. Die Bilder werden mit einer PCO-Sensi-Cam-Kamera und einem 35 mm -Nikkor-Objektiv aufgenommen. Der CCD-Chip erreicht eine Auflösung von $1024 \times 1280\text{ Bildpunkten}$ und ermöglicht eine maximale Wiederholrate von 250 ms . Er kann maximal 4 Bilder pro Sekunde aufnehmen und speichern. Die Blende wurde auf $F = 2.0$ eingestellt. Die Objektivachse steht senkrecht auf der Lichtschnittebene. Die Optik der Kamera ist so eingestellt, dass der gemessene Feldabschnitt mit einer Fläche von $990 \times 890\text{ Bildpunkten}$ auf dem CCD-Chip abgebildet wird.

Die Konzentration der Partikel im Strömungsfeld hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswertung mit dem Verfahren der Kreuzkorrelation, deswegen muss eine optimale Partikelverteilung innerhalb der Messstrecke erzielt werden. Um eine günstige Partikelverteilung bei der PIV-Messung zu erhalten, wurde ein Sieb an der Einlaufdüse befestigt. Zusätzlich erfolgt die Partikeleinspritzung in einen Beruhigungsbehälter, der sich

vor der Einlaufdüse befindet (Abbildung 3.4). Der mittlere Durchmesser der Partikel beträgt laut Hersteller des Aerosolgenerators $d_p = 1 \mu m$.

Als Erstes wurde ein Kalibriervorgang, wie er in jeder PIV-Messung üblich ist, durchgeführt. Das Koordinatensystem und der Maßstab werden dabei so festgelegt, dass auf den PIV-Aufnahmen eine eindeutig skalierbare Zuordnung der Strömungsfelder möglich ist. Ein Zusammenhang zwischen den Bildpunkten des CCD-Chip und dem festgelegten Koordinatensystem wird damit für die Messung ermittelt.

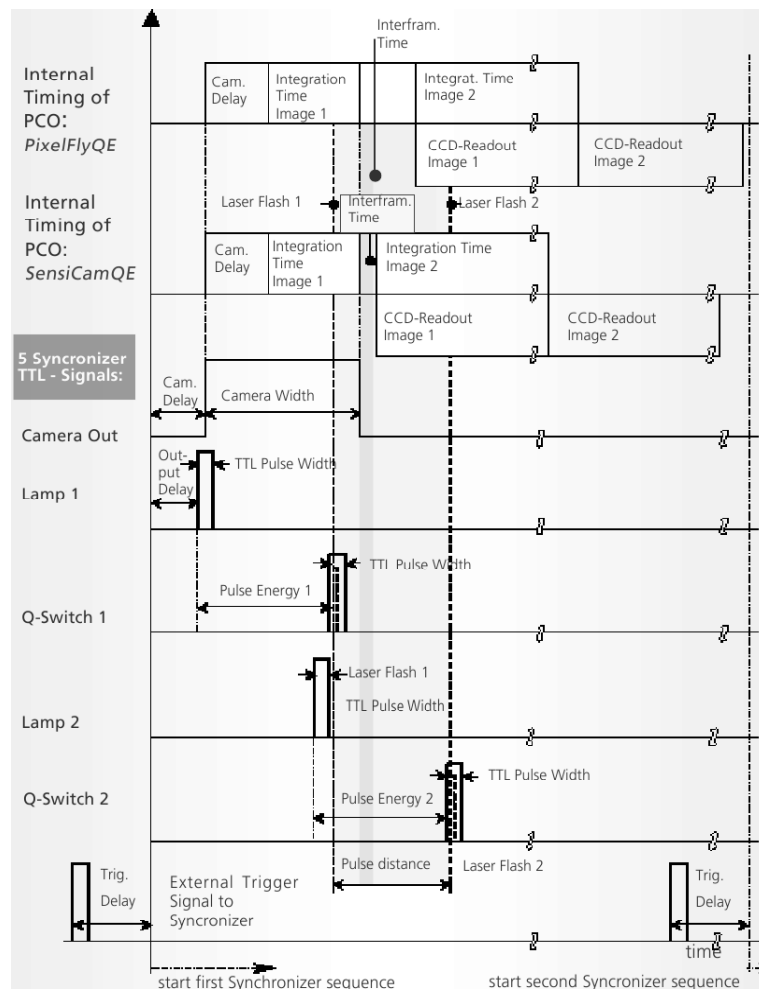


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Synchronisation zwischen Laserlichtlampen und Q-Switches der Kamera (Manual ILA (2009))

Die Laserlichtlampen und das Auslösungssignal der Kamera, der Q-Switch, werden mit einem Synchronizer der Fa. ILA getriggert. Durch ihn werden die Laserpulse sowie die

Aufnahme der Doppelbilder gesteuert. Das Display des Synchronizers ermöglicht die Einstellungen der Belichtungszeiten, des Pulsabstandes und der Laserenergie. In der Abbildung 3.5 ist eine schematische Darstellung der Synchronisation des Lasers mit der Kamera dargestellt.

Zur Erfassung der PIV-Aufnahmen und anschließenden Auswertung wird die Software VidPIV (Version 4.6) der Firma ILA verwendet. Viele Autoren haben sich mit der Anwendung der Kreuzkorrelation in PIV-Messungen befasst. Die Bestimmung des Partikelbildversatzes wird in RAFFEL ET AL. (2007) ausführlich beschrieben. Bei der Analyse und Auswertung der PIV-Korrelationen handelt es sich hauptsächlich um die Antwort auf die Frage: Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilbild A bei einer bestimmten Verschiebung mit Bild B übereinstimmt. Im Buch von RAFFEL ET AL. (2007) wird erklärt, wie man ein Partikelbildmuster in dem ersten Teilbild auf dem zweiten wiederfinden kann. Das Interrogationsfenster hat eine Größe von 64×64 *Bildpunkten*, der Abstand dazwischen beträgt 16 *Bildpunkte* (75% überlappend). Eine Kreuzkorrelation, die auf einem FFT-Interrogationsverfahren basiert, wird zur Berechnung der lokalen Partikelverschiebung des ausgewählten Berechnungsquadrates benutzt. Dabei wird der größte Korrelationspeak in Strömungsrichtung berechnet. Die Geschwindigkeitsvektoren einzelner Berechnungsquadrante lassen sich durch bekannten Zeitversatz berechnen.

Die Anwendung der herkömmlichen PIV-Auswertung basiert auf einer Mittelung von mehreren Geschwindigkeitsvektorfeldern, die jeweils aus einer Vielzahl von PIV-Aufnahmen resultiert. Diese Art von Mittelungsverfahren lässt eine Analyse instationärer Strömungsfelder nicht zu. Die Auswertung sollte anders erfolgen, und zwar laut der Grundidee, die in Kapitel 4.3 erläutert wird. Im nächsten Kapitel werden die Hitzdrahtanemometrie, Voruntersuchungen für die Positionierung des Hitzdrahtsensors und deren Einsatz in dem durchgeführten Messvorgang vorgestellt.

3.2 Hitzdrahtanemometrie (HDA)

Das Messprinzip der Hitzdrahtanemometrie (HDA) basiert auf dem Wärmeverlust eines beheizten Körpers, der von einem Fluid umströmt wird. Dabei steht die Menge des Wärmeverlustes in Beziehung zur Fluidgeschwindigkeit, so dass bei bekanntem Wärmeverlust die Geschwindigkeit des Fluids ermittelt werden kann. In der Regel wird eine

geschlossene Anemometerschaltung nach dem Konstanttemperaturanemometer-Prinzip (CTA) betrieben. Anhand eines Regelkreises wird bei Abkühlung der Sonde durch die Erhöhung der elektrischen Stromstärke der Hitzdraht auf konstanter Temperatur gehalten (BRUUN (1995)).

Das Messsignal wird an einen 16-kanaligen Messwertaufnehmer (Spider 8) weitergeleitet. Eine Verstärkung und eine Offset-Korrektur des Ausgangssignals des Anemometers erlauben eine optimale Anpassung der Messwerterfassung an den Spannungsbe-
reich des Messwertaufnehmer-Eingangs. Die instationären Signale der HDA werden mit folgenden Leistungsmerkmalen aufgenommen: Der Vielstellenmesswertaufnehmer wird mit einer Abtastfrequenz von $4,8\text{ KHz}$ pro Kanal (maximale Abtastfrequenz $9,6\text{ KHz}$) benutzt, wobei eine digitale Filterung bei $1,2\text{ KHz}$ durch einen variablen Besselfilter erfolgt. Diese einstellbare digitale Filterung verhindert zudem die *Aliasing*-Effekte. Dabei beträgt die Grenzfrequenz des Hitzdrahtsensors mit Anemometerbrücke 150 KHz (DANTEC (1998)).

Der Zusammenhang zwischen Fluidgeschwindigkeit und dem Spannungssignal am Ausgang des CTA-Moduls ist nicht linear. Für quantitative Messungen ist eine Kalibrierung der Sonde notwendig. Für die Auswertung in dieser Arbeit ist die absolute Größe der Geschwindigkeiten jedoch nicht von Bedeutung. Sie wurde daher nicht erfasst. Nur die qualitativen Signalschwankungen sind für die Ermittlung der Phasenlage der einzelnen PIV-Messungen gegenüber dem Hitzdrahtsignal wichtig.

Einsatz der Hitzdrahtanemometrie (HDA)

Wie bereits bei der Beschreibung der Wirbel erwähnt wurde, nimmt die Zirkulation der Wirbelkerne infolge Reibung ab SIGLOCH (2007). Aufgrund dieser natürlichen Ausdehnung der Wirbelkerne wird dort kein charakteristisches Hitzdrahtsignal geliefert. Die Position des Hitzdrahts ist von großer Bedeutung. Der Verlauf der Geschwindigkeit ändert sich selbst für eine minimale Verschiebung der Sondenposition (siehe Abbildung 3.6). Viele Messungen konnten nachweisen, wie empfindlich die Wirbelströmung auf Störungen durch den Hitzdraht reagiert (BERGER (1964)). Der Hitzdraht wurde deswegen in unterschiedlichen Abständen ($x = 5\text{ d}$; $7,5\text{ d}$; 10 d und 15 d) im Zylindernachlauf quer zur Wirbelstraße (parallel zur Zylinderachse) eingesetzt und die Verläufe wurden mit einem digitalen Oszilloskop veranschaulicht.

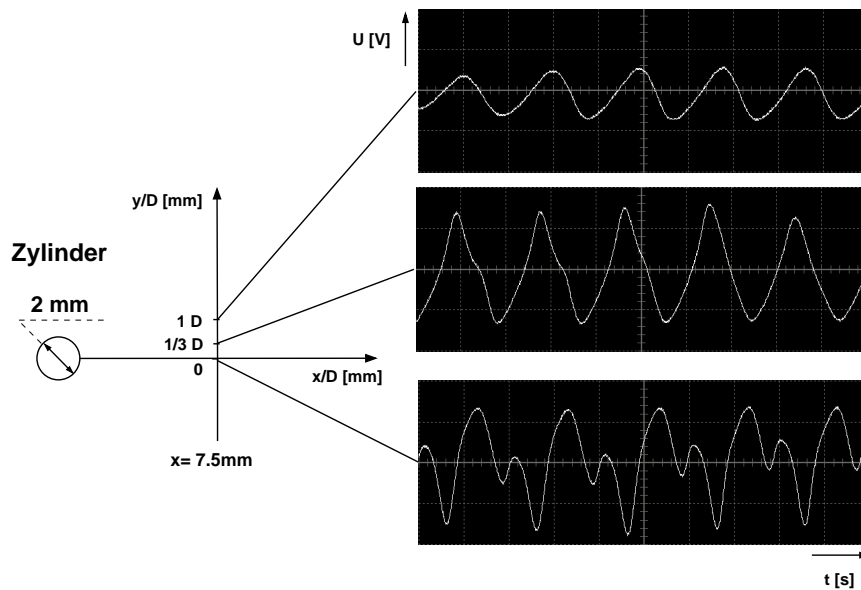


Abbildung 3.6: Positionen der Hitzdrahtsonde im Nachlauf des Zylinders

Ein Beispiel bei $x = 7,5 d$ zeigt die Abbildung 3.6 bei drei unterschiedlichen Querpositionen. Die Position des Hitzdrahtes wurde so gewählt, um damit zum einen ein klares periodisches Signal des Wirbels zu erhalten und zum anderen das Strömungsfeld mit der Sondenhalterung möglichst wenig zu stören. Auf diese Weise läßt sich das Geschwindigkeitsvektorfeld aus den PIV-Ergebnissen gut veranschaulichen. Der $5 \mu\text{m}$ -Draht des Hitzdrahtsensors befindet sich 28 mm stromab des Zylinders, der die Wirbelstraße induziert (etwa $x = 15 d$). Senkrecht zur Anströmung ist er in der Messebene um 3 mm ($1,5 d$) gegenüber dem Zylinder in y -Richtung versetzt.

3.3 Fehlerbetrachtung

Eine Messung liefert je nach Qualität der Messtechnik und der Messwerte den wahren Wert, der durch eine angegebene Genauigkeit die zu messende Größe repräsentiert. Zusätzlich spielt die Qualität der Ortsbestimmung ebenfalls bei der weiteren Verarbeitung der PIV-Bilder und der Genauigkeit der Auswertung eine wichtige Rolle. Die messtechnischen Toleranzen, wodurch die Genauigkeit einer Messung bestimmt wird, werden in dieser Arbeit nicht genau behandelt. Die Toleranzen der HDA bei der Erfassung von Spannungen sind deutlich kleiner als die normalen Schwankungen der gemessenen

senen Größen während ihrer Erfassung. Andererseits werden die Toleranzen der PIV-Technik durch die Betrachtung einiger Fehlerquellen in den nächsten Abschnitt umgefasst.

Durch die kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung der PIV-Technik in den letzten Jahren sind die Fehlerquellen in den PIV-Komponenten minimiert worden. Die Ursachen der Fehler können aus verschiedenen Quellen resultieren. Manche sind vernachlässigbar, wie z. B. Die Positionsbestimmung der kartesischen Koordinatenpunkte auf dem Kalibriergitter, die eine Ungenauigkeit von $\pm 0,25\text{mm}$ verursachen kann. Andere sind schwer abschätzbar, wie z. B. die Mittelung der Messbilder insbesondere bei der Mittelung von instationären Strömungen.

Eine Fehlerquelle ist ebenfalls bei der Auswertung der Daten zu beobachten, die durch die Kreuzkorrelation der Bilder und die Integration der Verschiebungen verursacht werden. Die Kreuzkorrelation stellt eine Mittelung über ein Auswertefenster dar und liefert nur ein Verschiebungsvektor für jedes Auswertefenster. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeitsgradienten innerhalb des Auswertefensters nicht dargestellt werden können. Die bei der Kreuzkorrelation auftretenden Fehler betragen maximal 0,05 pixel, da eine Verschiebung von 0,1 pixel noch als Messwert gewertet werden kann RAFFEL ET AL. (2007).

Die Einstellung der Anströmgeschwindigkeiten verursachte zu Beginn der experimentellen Untersuchungen Schwierigkeiten, da Schwankungen in dieser Größe im Vergleich zum normalen Wert aufgrund der manuellen Einstellung der Drosselklappe auftreten können. Die Anströmgeschwindigkeit wurde zuerst mit PIV und dann mit den bekannten Messgrößen in der Messstrecke für isentrope Zustandsänderung berechnet. Die mittels PIV gemessene Geschwindigkeit stimmt mit der aus den Strömungswerten errechneten Geschwindigkeit überein. Die nächste Fehlerquelle liegt bei der Justierung der PIV-Komponente in der Messungsvorbereitung. Der Winkel zwischen Lichtschnittebene und Kamerablickwinkel ist manuell justiert und beträgt nicht genau 90° . Aus diesem Grund weicht die reale Auflösung der Kamera von den theoretischen Werten ab.

3.4 Messwerterfassung: Kopplung von PIV und HDA

Hintergrund

Um die statistische Auswertung der PIV-Aufnahmen vornehmen zu können, muss den Bildern ein Phasenwinkel zugeordnet werden. Dies ist jedoch direkt nicht möglich, da die zeitliche Folge der PIV-Doppelbilder eine gegenüber der Wirbelfrequenz deutlich geringere Frequenz aufweist, sodass aus diesen Daten eine Phasenlage nicht bestimmt werden kann. Zudem fehlt ein äußerer Mechanismus, der die Ablösefrequenz determiniert. Die herkömmliche PIV-Messtechnik, wie schon in Kapitel 2.2.1 angedeutet, ist für die Ermittlung von zeitgemittelten Strömungsvorgängen ausgelegt. Die Ergebnisse können keine periodischen und pulsierenden Vorgänge zeigen (BREDE (2004)). Eine zeitaufgelöste Vermessung der KWS ist nur mithilfe TR-PIV mit einer hohen Aufnahme­frequenz einer CCD-Kamera möglich (KIM ET AL. (2006); KURTULUS ET AL. (2007); KÄHLER UND HAIN (2007)). Der bedeutendste Fortschritt bei diesen Untersuchungen in der Dissertation wird dadurch erreicht, dass ein instationärer Vorgang der KWS mit der herkömmlichen PIV-Methode „ohne Triggersignal“ in Kombination mit Hitzdrahtsignalen zeitaufgelöst untersucht werden kann.

Messvorgang

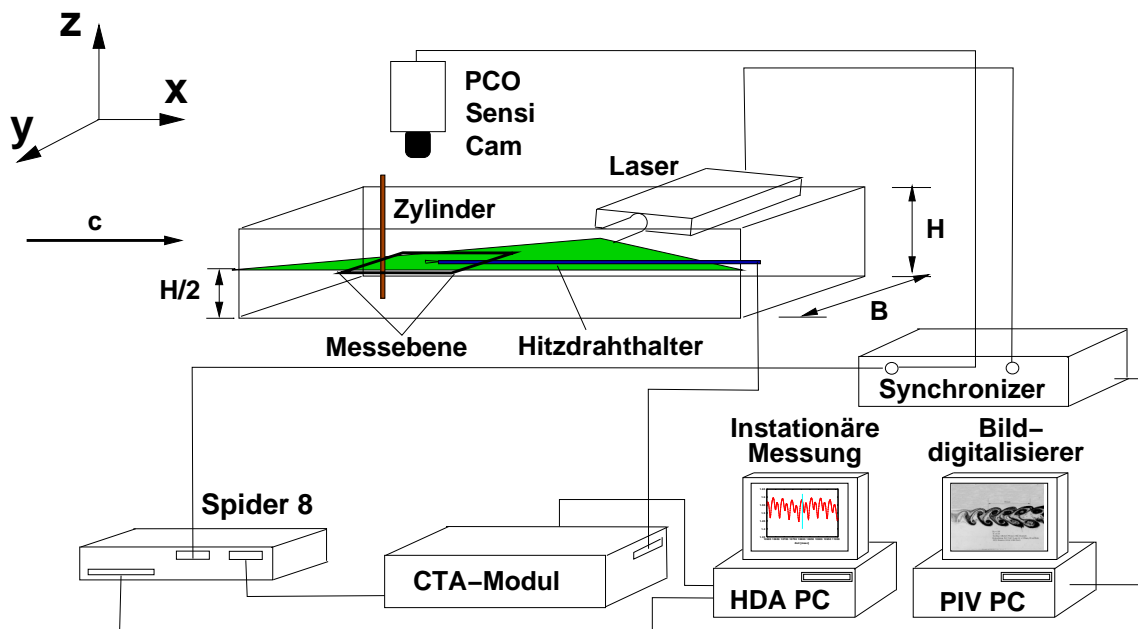


Abbildung 3.7: Schema der Messstrecke mit Datenerfassung: Die Darstellung beider Signale auf einer gemeinsamen Zeitachse

Parallel zur PIV-Messung wird ein lokales, aber zeitlich hochaufgelöstes Signal mittels einer Hitzdrahtsonde aufgezeichnet. Der Q-Switch-Ausgang der Kamera wird auch neben der Aufzeichnung des Hitzdraht-Spannungssignals mit dem Spider 8 aufgenommen. Die parallele Abtastung aller Kanäle des Messwertaufnehmers ermöglicht eine synchrone Aufzeichnung des Hitzdrahtsignals und der Signale, die die Auslösung der Kamera markieren (Abbildung 3.7). Ein typisches Ergebnis einer Hitzdrahtmessung zeigt Abbildung 3.8 ein über der Zeitachse aufgenommenes Spannungssignal. Hieraus ergibt sich eine Periodendauer von etwa 12 ms .

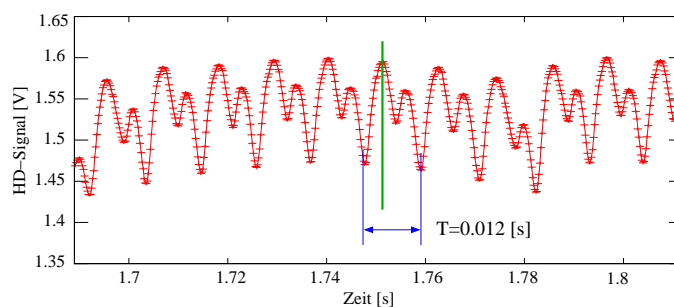


Abbildung 3.8: Hitzdrahtsignal der Wirbelstraße mit Angabe der Periodendauer

Für eine aussagekräftige PIV-Auswertung sind mindestens $n = 25$ Bilder pro Wirbelposition in einer Bilderreihe für die Mittelung notwendig (Dokumentation der Firma ILA). Eine Periode wird in $T_n = 72$ Schritte diskretisiert. Dies liefert einen Phasenunterschied von 5° zwischen einzelnen Stellungen der Wirbel. Die benötigte Mindestanzahl von Bildern ist insgesamt $T_n \cdot n = 1800$ Bilder.

Die Kamera kann 250 Doppelbilder speichern, weil der RAM-Speicher der Kamera auf 1 Gb RAM begrenzt ist. Die 250 Bilder werden auf den internen CCD-Chip gespeichert und weiter an den PC übertragen. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität der Kamera sind mindestens 7 Messreihen erforderlich, um die benötigte Mindestanzahl von Bildern zu erreichen. In den vorliegenden Untersuchungen wurden 9 Messreihen durchgeführt und insgesamt 2250 Doppelbilder aufgenommen. In der Software VidPIV wird der *Burst Buffer*, die eingegebenen Bilddaten von einem Burstspeicherpuffer, auf z. B. 250 Bilder und das *Time-out* auf 600 s festgelegt.

Der Synchronizer-Ausgang, der Q-Switch, sendet ein Signal an das Vielstellmessgerät. Der Hitzdraht gibt die Signale an einen weiteren Kanal des Spiders weiter. Nach dieser

Bilder-Messreihe beendet die Software die Aufnahme. Die Parameter der Messvorgänge sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet.

Zylinder: d	2 mm
Strömung:	Luft $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Re	120
Sr	0,18
c	0,9 m/s
PIV:	
Kamera MR	4 Hz, 35 mm Objektiv, $F = 2,0$
Laser Nd:YAG	50 mJ/Puls
	15 Hz, Stärke 1 mm
Pulsabstand	1000 μs
Seeding	Alkohol-Wasser-Öl Gemisch
Messebene	50 x 45 mm (990 x 890 Bildpunkte)
HDA	
Hitzdraht	Eindrahtsonde P11 Dantec
D bzw. L	5 μm bzw. 1,25 mm
Messwertaufnehmer (Spider 8)	MR= 4800 Hz

Tabelle 3.1: Strömungseigenschaften und messtechnische Parameter

4 Signalverarbeitung unter Einsatz der Fourier-Transformation

Zeitaufgelöste Signale stellen mathematische Funktionen dar, die eine Reihe von Messgrößen beinhalten. Die Messgrößen stehen untereinander in Beziehung. Die Fourier-Transformation wird in vielen Büchern für die Analyse von Signalen behandelt. Darüber wird in diesem Kapitel ein kurzer Überblick gegeben. Mit der Transformation der periodischen Signale sind Verfälschungen möglich, die zu Fehlinterpretationen führen können. Hierzu wird im folgenden Abschnitt auf *Aliasing*, *Leakage* und *Oberschwingungen* verwiesen.

Im folgenden Kapitel wird nur auf den *Aliasing*-Effekt und den *Leakage*-Effekt näher eingegangen, da diese in direktem Zusammenhang mit dem hier angewandten Analyseverfahren für zeitaufgelöste Signale in Kapitel 5 stehen.

4.1 Klassische Analyse periodischer Signale

Periodische Signale sind Zeitfunktionen, deren Zeitverläufe sich nach einer bestimmten Periodendauer T wiederholen. Dies bedeutet, dass deren Zeitfunktion die folgende Bedingung erfüllt:

$$x(t) = x(t \pm kT) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

Ein Spezialfall von periodischen Funktionen sind die sogenannten harmonischen Schwingungen. Ihre wichtige Rolle ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass auch sehr komplizierte periodische Funktionen sich durch Überlagerungen von Sinus- und Cosinuswellen verschiedener Frequenzen darstellen lassen.

Die „harmonische Analyse“ oder die Fourier-Analyse ermöglicht die Trennung der im Signal enthaltenen periodischen Funktionen und die Berechnung der Frequenzen und Amplituden. Diese Frequenzen sind in den gemessenen Rohdaten nicht eindeutig bestimmbar, da viele irrelevante Informationen im Signal enthalten sind, wie z. B. Rauschen, das mithilfe eines Filters teilweise entfällt. Die Fourier-Reihe der Zeitfunktion $x(t)$ lässt sich folgendermaßen darstellen (HOFFMANN (1998)):

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (4.2)$$

Die Gleichung 4.2 enthält außer dem Gleichanteil $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ eine Summe harmonischer Funktionen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der sogenannten Kreisfrequenz ω_0 des analysierten Signals sind.

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4.3)$$

Jeder dieser Frequenzen ist eine Amplitude c_n und ein Phasenwinkel φ_n zugeordnet,

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.4)$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{-b_n}{a_n}\right) \quad (4.5)$$

wobei die Entwicklungskoeffizienten a_n und b_n die Amplituden des Cosinus- bzw. Sinus-Anteils der Reihe sind.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n \omega_0 t) dt \quad (4.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (4.7)$$

Für diskrete Signale erfordert die Berechnung der Fourier-Transformation viele Multiplikationen. Die „Schnelle Fourier-Transformation“ (FFT) in Gleichung 4.8 fand breite Anwendung in der Spektralanalyse wegen des geringeren Rechenaufwands ($N \log_2 N$ anstatt N^2 mit \log_2 Logarithmus zur Basis 2) (HOFFMANN (1998)). Mithilfe der FFT werden die sogenannten Spektren eines Signals repräsentativ abgebildet, indem die harmonischen Anteile des Signals gezeigt werden können. Ein Amplitudenspektrum zeigt Spektrallinien (Maß der Amplituden) und deren zugehörige Frequenzkomponenten in einem betrachteten Signalabschnitt. Der Abstand der Linien ist mit der Kreisfrequenz ω_0 indirekt proportional zur Periodendauer (Gleichung 4.3).

Fourier-Transformation nichtperiodischer Signale

Der Ansatz der Fourier-Reihe auf einer nicht-periodischen Funktion $x(t)$ verhält sich anders, nämlich erfolgt die Zerlegung statt in einer Fourier-Reihe in diesem Fall in einem Fourier-Integral (Gleichung 4.8). Die Funktion $x(t)$ wird als eine periodische Funktion behandelt, deren Periodendauer T in Richtung unendlich tendiert ($T \rightarrow \infty$), mit anderen Worten, deren Spektrum kontinuierlichen Verlauf besitzt ($\omega_0 \rightarrow 0$) (HOFFMANN (1998)). Die Fourier-Transformierte einer nicht periodischen Funktion $x(t)$ vom Zeitbereich in den Frequenzbereich hat folgende Definition:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.8)$$

Eine verständliche Übersicht der Zusammenhänge und Sätze in der Spektralanalyse gibt HOFFMANN (1998) in ausführlichen Tabellen, die die Eigenschaften von Spektren sowie die Unterscheidung der Transformation für unterschiedliche Signalklassen (periodisch/nicht periodisch oder zeitkontinuierlich/zeitdiskret) darstellen.

Die wesentlichen Eigenschaften der Fourier-Transformation wie z. B. die Faltungseigenschaft und die Phasenverschiebungseigenschaft haben sich als sehr hilfreich bei der Signalverarbeitung erwiesen. Diese Eigenschaften wurden in mehreren Arbeiten eingesetzt, und zwar dort, wo Kreuzleistungsspektren, Autoleistungsspektren und Kohärenz zur Signalabschätzung benötigt werden (BENDAT UND PIERSOL (1980); MAILACH ET AL. (2001); WEIDENFELLER (2002)).

Die Phasenverschiebungseigenschaft besagt, dass die Analyse des Signals zu unterschiedlichen Zeiten keine Veränderungen der Amplituden des Frequenzspektrums zur Folge hat. Da die Leistungsberechnung nur ein Betragsquadrat enthält, zählt diese Eigenschaft als eine Möglichkeit, die Signale unabhängig von der Phase zu kennzeichnen (BABOVSKY ET AL. (1987)). Die Anwendung des Faltungssatzes in der Praxis wird als Filterung im Frequenzbereich verstanden. So wird beim Filtern von Signalen die Signalfunktion $x(t)$ mit einer Filterfunktion $h(t)$ gefaltet. Durch eine Transformation des Signals in den Frequenzbereich und dann eine Multiplikation der Fourier-Transformierte $X(f)$ mit der Transformierten $H(f)$ der Filterfunktion wird diese Faltung realisierbar. $H(f)$ heißt auch Übertragungsfunktion des Filters. Rücktransformation des Produktes $S(f) \circ H(f)$ in den Zeitbereich liefert die gewünschte Faltung $s(t) \circ h(t)$ HOFFMANN (1998). „Filter sind Übertragungssysteme, die im Frequenz- bzw. Bildbereich eine gewisse Selektion vornehmen“ STRAMPP UND VOROZHTSOV (2004).

4.2 Verfälschungen in der Transformation

Die Erscheinungen in der Fourier-Analyse werden leicht verstanden, wenn man sich eine Sinusschwingung mit bekannter Periodendauer und bekanntem Phasenwinkel aufzeichnet und damit experimentiert. Ein konkreteres Beispiel ist das folgende Sinussignal mit einer Frequenz $f_S = 50 \text{ Hz}$ und einem Phasenwinkel $\varphi = 0^\circ$:

$$x(t) = A \cdot \sin(f_S \cdot 2\pi t + \varphi) \quad (4.9)$$

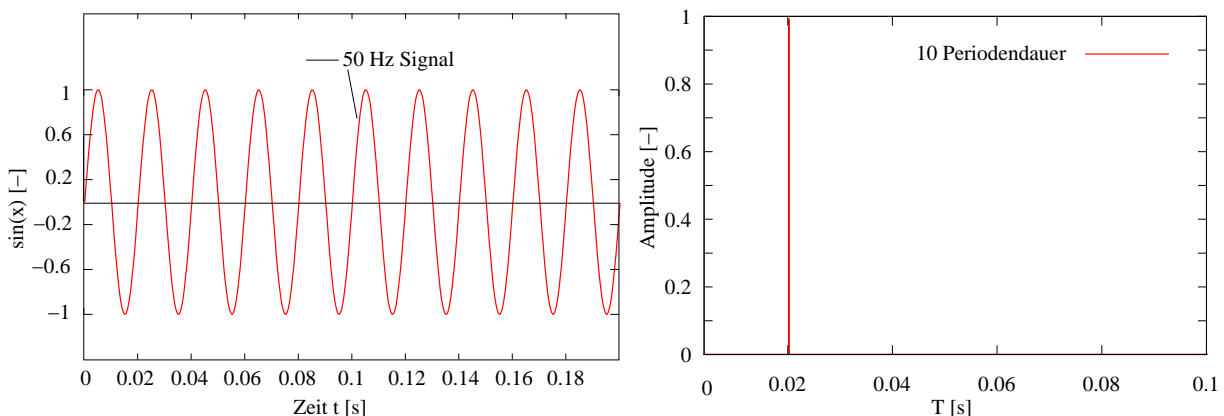


Abbildung 4.1: Amplitudenspektrum eines Sinussignals in einer vordefinierten Fensterbreite Δt , die das 10-Fache der Periodendauer T beträgt

Das Sinussignal wird in einem Zeitfenster Δt betrachtet, dem ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer T entspricht ($\Delta t = 10T$). Das Spektrum zeigt eine Linie bei der Grundfrequenz $t = 0,02 \text{ s}$, in der Abbildung 4.1 rechts abgebildet. Die Höhe der Linie entspricht in dem Spektrum der Amplitude $A = 1$.

4.2.1 *Aliasing*-Effekt

Jedes Messsignal wird in der Regel mit einer konstanten Abtastfrequenz f_A erfasst. Die Abtastfrequenz beschreibt die Wiederholungsrate für die Aufnahme eines Messwerts. Mit der Abtastfrequenz wird also versucht, das mit der Frequenz f_S laufende Signal diskret aufzuzeichnen. Je höher die Abtastfrequenz wird, d.h. der Zeitversatz zwischen den Messwerten kleiner wird, desto besser kann das ursprüngliche Signal rekonstruiert

werden. Zusammen mit der Betrachtung des Signals in einem Zeitfenster spricht man in diesem Fall von zeitdiskretisierten bandbegrenzten Signalen.

Bei der Auswahl der Abtastfrequenz sollte allerdings das Abtast-Theorem beachtet werden und die damit verbundenen Konsequenzen für die Signal-Rekonstruktion im Auge behalten werden (HOFFMANN (1998); BUTZ (2000)). Das Theorem besagt, dass ein bandbegrenztes Signal aus seinen Abtastwerten f_A mithilfe der Samplingreihe exakt rekonstruiert werden kann, wenn die Abtastfrequenz mehr als doppelt so hoch wie die höchste im Ursprungssignal enthaltene Frequenz f_S ist: $f_A > 2 f_S$. Durch ungenügende Abtastung des Signals kommt es zur Verfälschung oder zum *Aliasing*. Die Abtastfrequenz ist durch den benutzten Messwertaufnehmer einstellbar. Wie im Kapitel 3.4 erwähnt wurde, wurde die Abtastung der erwarteten 81 Hz Ablösefrequenz der Karmanschen Wirbelstraße auf $f_A = 4800 \text{ Hz}$ konstant gehalten. Damit konnte das Abtast-Theorem von Shannon für ein bandbegrenztes Signal eingehalten werden. Die Nyquistfrequenz $f_{Nyq} = \frac{1}{2} f_A$ beträgt in diesem Fall $f_{Nyq} = 2400 \text{ Hz}$, d.h. eine Aufzeichnung mit dieser Abtastrate kann Signale mit Ablösefrequenzen bis zu 2400 Hz ohne Verluste rekonstruieren.

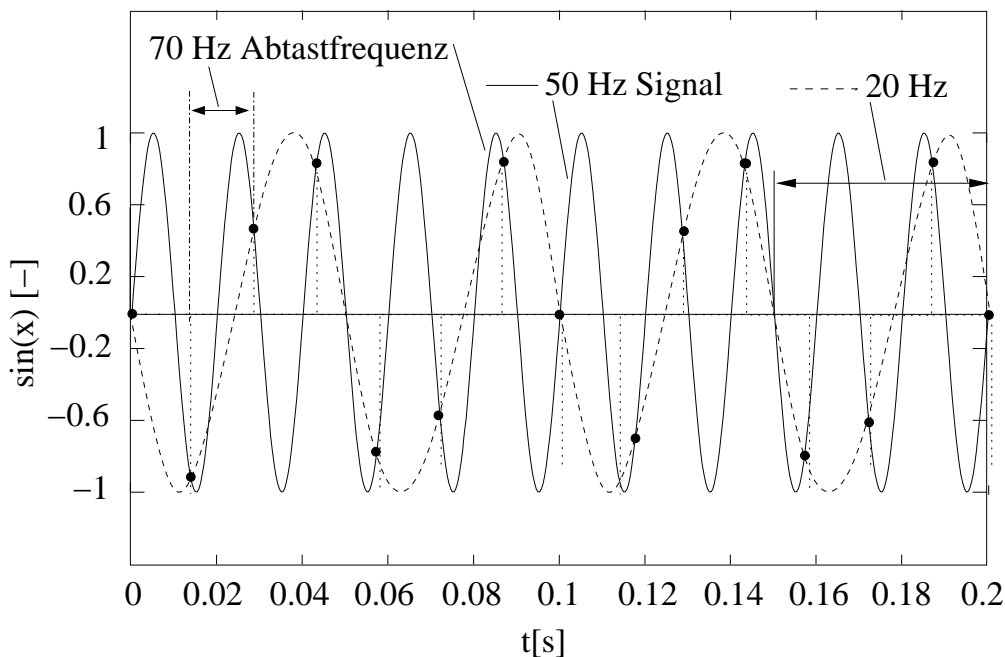


Abbildung 4.2: Beispiel zum *Aliasing*-Effekt

Abbildung 4.2 zeigt eine 70 Hz-Abtastung an diskretisierten Messpunkten (dunkle Punkte) des 50 Hz-Signals. Dieser endliche Beobachtungsabstand hat eine relativ langwellige Schwingung der Frequenz 20 Hz (gestrichelter Verlauf) zur Folge.

4.2.2 Leakage-Effekt

Der *Leakage*-Effekt ist das im Spektrum beobachtete Phänomen, das eine Überhöhung von zusätzlichen Harmonischen in der Umgebung von der Hauptfrequenz zeigt. Dies passiert, wenn eine Verletzung der Periodizität im ausgewählten Zeitausschnitt des Signals mit der Fourier-Transformation analysiert wird (SCHLITGEN UND STREITBERG (2001)).

In diesem Kapitel wird hauptsächlich untersucht, was mit dem Spektrum geschieht, wenn anstelle eines kompletten gemessenen Signals nur ein Zeitausschnitt der Länge ΔT „zentriert“ um ein Ereignis der Spektralanalyse unterzogen wird. In den meisten Fällen beträgt dieser Zeitausschnitt ein nicht genau ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer. Eine Verfälschung des Spektrums oder der *Leakage*-Effekt wird beobachtet, was durch zusätzliche Amplitudenpeaks im Spektrum gekennzeichnet wird. Dies bedeutet im mathematischen Sinn, dass das Originalsignal $x(t)$ mit einer Rechteckfunktion multipliziert wird. Diese Rechteckfunktion ist nur entlang des definierten Analysezeitfensters $[-\frac{\Delta t}{2}, \frac{\Delta t}{2}]$ gleich dem Wert 1 und nimmt außerhalb dieses Fensters den Wert 0 an (HOFFMANN (1998)). Die verursachte Überhöhung an den Rändern wird üblicherweise so gelöst, indem $x(t)$ mit anderen Fensterfunktionen, z. B. Hanning- oder Hamming-Fenstern, multipliziert und damit einer gefensterten Fourier-Transformation zugeordnet wird.

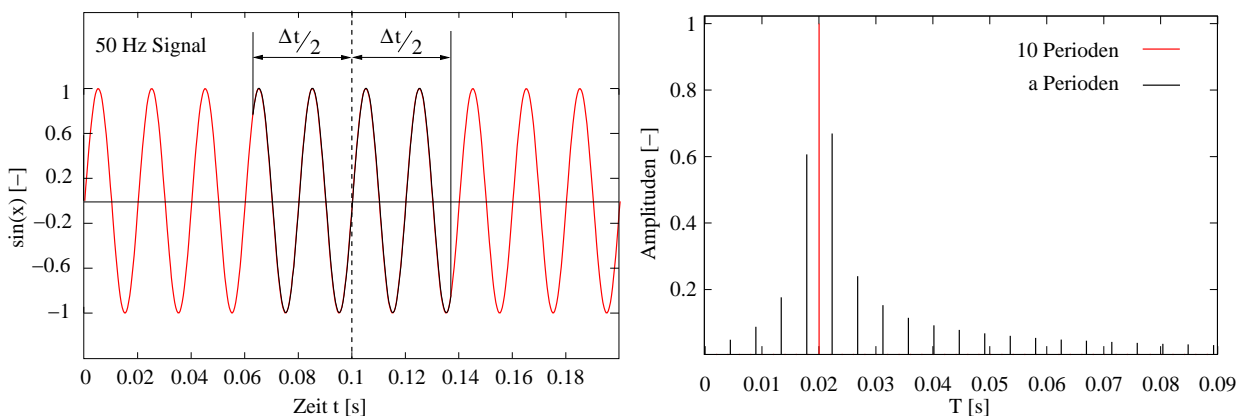


Abbildung 4.3: Amplitudenspektrum eines Sinussignals in einem willkürlich ausgewählten Signalabschnitt

In dieser Arbeit wird der *Leakage*-Effekt anders gelöst, und zwar indem eine Variation des analysierten Zeitausschnitts durchgeführt wird. Ein Beispiel am Sinussignal sollte

der oben benannte Effekt erklären. Dasselbe Signal wie in Abbildung 4.1 links wird nun in einem willkürlich ausgewählten Abschnitt des Signals betrachtet z. B.: Zeitausschnitt beinhaltet a Perioden, mit $a = 3,5$. Das Spektrum liefert nun mehrere schwarze Linien neben der Grundfrequenz (siehe Abbildung 4.3). Wie Abbildung 4.3 zeigt, weist das Amplitudenspektrum Artefakte auf. Die maximale Amplitude des Signalausschnitts der Länge aT liegt nicht mehr bei der Grundfrequenz, sondern rechts und links daneben mit zwei unterschiedlichen Amplituden, die zu anderen Harmonischen gehören und die höchsten Amplituden sind. Der Betrag dieser beiden Amplituden ist 60–70% geringer als die maximale Amplitude des Signalausschnitts mit der Länge $10T$.

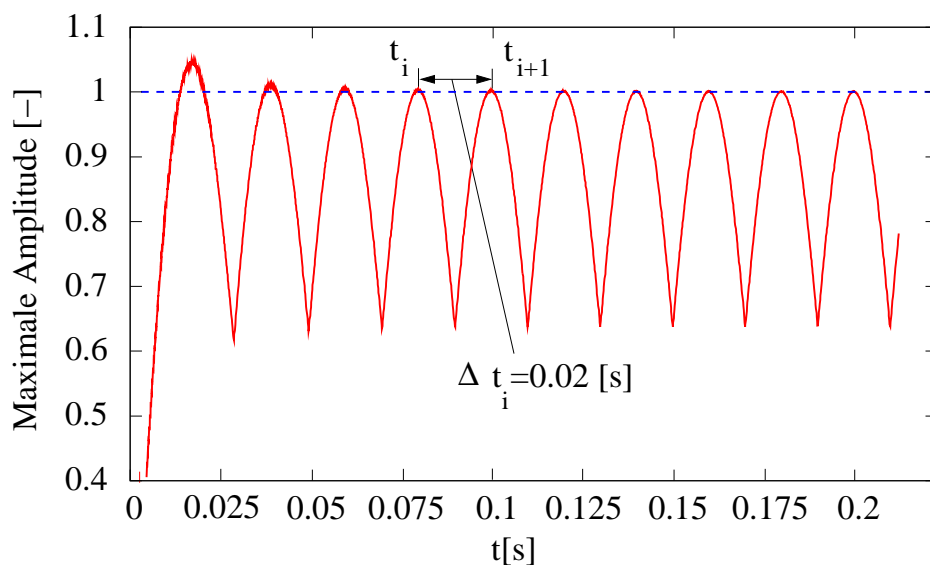


Abbildung 4.4: Maximaler Amplituden-Verlauf eines Sinussignals bei Variation des Zeitfensters der Fourier-Analyse

Um den richtigen Signalausschnitt zu finden, wird das ursprünglich willkürlich ausgewählte Fenster zuerst relativ groß genommen. Dann wird dieses Fenster sukzessive verkleinert und jedes dieser verkleinerten Fenster mit FFT analysiert. Als Letztes wird dessen maximale Amplitude aus jedem Spektrum entnommen. Die GröÙte von allen Amplituden wird markiert und deren Signalausschnitt als der richtige oder „optimale“ Signalausschnitt bezeichnet und ausgewählt. In Abbildung 4.4 werden die markierten maximalen Amplituden in Abhängigkeit der mit FFT analysierten zugehörigen Länge des Signalausschnitts in Sekunden aufgetragen. In dieser Abbildung ist ein zyklischer Verlauf zu beobachten. Zwischen zwei Maxima ist ein Abstand, der einer Periodendauer von $T = 0,02$ s entspricht. Das Signal wurde allmählich verkürzt bis auf eine Länge, die kürzer als die einer Periodendauer ist. Es zeigte sich für den Fall $t < T$,

dass Unregelmäßigkeiten im Verlauf der maximalen Amplituden auftreten. Die mit FFT analysierte Fensterbreite muss mindestens eine Periodendauer betragen, um die Amplitudenhöhe von $A = 1$ im Spektrum zu zeigen. Wie an einer vorigen Stelle erklärt wurde, führen Fenster, die nicht Vielfache der Periodendauer umfassen, zum *Leakage*-Effekt.

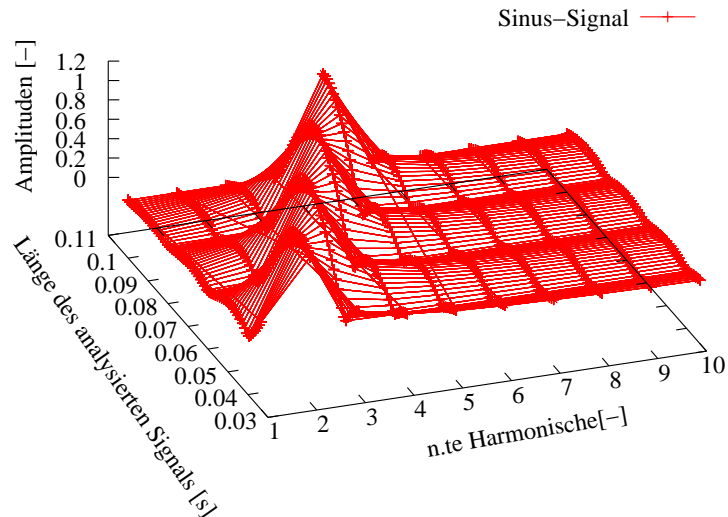


Abbildung 4.5: 3D-Darstellung der Frequenzverteilung über die Fensterbreite eines 50 Hz-Sinus-Signals

In der 3D-Darstellung wird der Verlauf der Frequenzen, die zu den maximalen Amplituden gehören, über der analysierten Signalbreite gezeigt (Abbildung 4.5). Eine Signalvariation erfolgt zwischen 0,033 s und 0,5 s. Eine andere Darstellung dieses Verlaufs zeigt die Abbildung 4.6. Die roten Stellen zeigen die stärksten Amplituden.

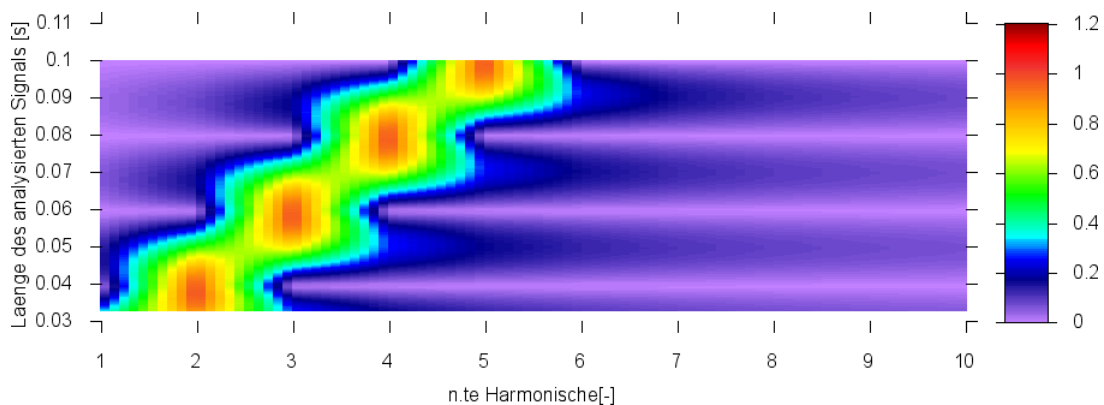


Abbildung 4.6: 3D-Farb-Darstellung der Frequenzverteilung über die Fensterbreite eines 50 Hz-Sinus-Signals, Signalvariation von 0,033 s bis 0,5 s

Nun wird die reine Sinusfunktion durch ein mithilfe eines Random-Generators erzeugtes Rauschen gestört (Eine Reihe von Pseudo-Nummern zwischen Null und eins, mit einem Störfaktor von 0.5), damit sie den realen Signalen ähnelt. Das gestörte Sinussignal wird in Abbildung 4.7 dargestellt.

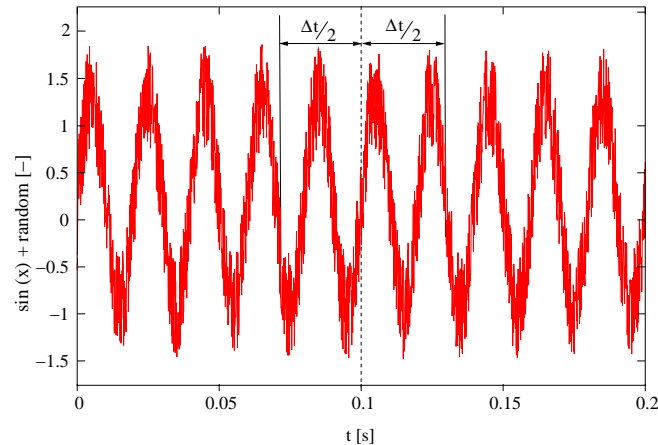


Abbildung 4.7: Verrauschte Sinusfunktion

Den Verlauf der maximalen Amplituden in Abhängigkeit von den analysierten Signalausschnitten für eine jeweils gestörte und ungestörte Sinusfunktion zeigt Abbildung 4.8.

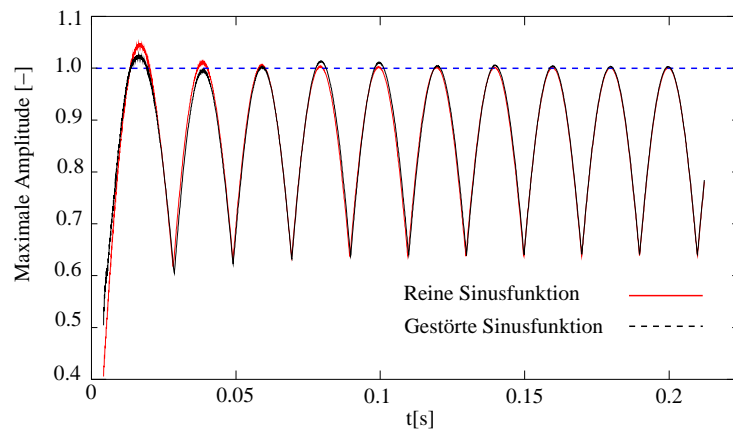


Abbildung 4.8: Maximaler Amplituden-Verlauf einer Sinusfunktion und einer mit Rauschen gestörten Sinusfunktion gegenüber der Variation der Länge des ausgewählten Signalabschnitts in Sekunden

Dieser Abbildung ist eine wichtige Eigenschaft zu entnehmen: Das Rauschen im Signal beeinflusst zwar die Höhe der maximalen Amplituden, aber eine Änderung in den

Abständen zwischen den Maxima ist nicht zu erkennen. Dieser Abstand entspricht in der Abbildung 4.4 der Periodendauer Δt_i .

Aus diesen Untersuchungen werden die relevanten Erkenntnisse gewonnen, die demonstrieren, wie das Verfahren versagt. Darauf wird in dem kommenden Unter-Kapitel 4.4 näher eingegangen.

4.3 Methodik der Zeitreihenanalyse

Die Grundidee der Auswertemethode ist es, den PIV-Bildern eine Phasenlage relativ zur periodischen Wirbelablösung zuzuordnen. Hierzu wird das Hitzdrahtsignal herangezogen und mit einem FFT-basierenden statistischen Verfahren analysiert, um die PIV-Bilder nachträglich zu gruppieren und jeweils ein Ereignis zuzuordnen. Die aufgenommenen Bilder werden auf der Zeitachse mit markiert. Um die so gekennzeichneten PIV-Messungen wird ein hinreichend großes Fenster „zentriert“ gelegt und das Hitzdrahtsignal einer FFT-Analyse unterzogen. Dabei liefert die Frequenz mit der größten Amplitude einen Hinweis auf die Grundfrequenz. Als Kriterium dient die Änderung der Amplitude der Grundfrequenz bei Variation der Größe des Zeitfensters. Mit der Festlegung des Zeitfensters kann dann der PIV-Aufnahme ein Phasenwinkel zugeordnet werden und es ergibt sich ebenfalls die Periodendauer. Damit können die einzelnen PIV-Aufnahmen anhand ihrer Phasenwinkel verschiedenen Klassen zugeordnet werden. Die statistische Auswertung der PIV-Aufnahmen in einer Klasse erfolgt dann in üblicher Weise (siehe Kapitel 5.2). Es ist an der Stelle wichtig, die folgenden Merkmale zu erwähnen:

- Die Frequenz eines selbsterregten Strömungsphänomens bleibt über längere Zeitfenster keineswegs stabil. Diese Problematik wird benutzt und als wichtiger Aspekt für den Erfolg des Verfahrens angegeben. Dazu wird empfohlen in dem Buch von HOFFMANN (1998) auf der Seite 39 nachzuschauen. Es wird ein periodisches Signal betrachtet mit einer Periodendauer T , das periodensynchron abgetastet wird. Die konstante Abtastung bedeutet dabei eine Wiederholung der Messwerte in allen abgetasteten Perioden. In diesem Fall liefert das Spektrum bei allen Ereignissen ein und denselben Phasenwinkel.
- Bei einer Fouriertransformation eines Signals in den Frequenzbereich ist sowohl

der Phasenwinkel als auch die Frequenz direkt von dem analysierten Zeitabschnitt abhängig (siehe auch HOFFMANN (1998)). Daraus folgt, dass die ausgewählten Zeitfenster, mit der größten Amplitude, der optimale Zeitabschnitt sein sollte, woraus ein richtiger Phasenwinkel erzielt wird, da dieses Fenster ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer beinhalten würde.

4.4 Einsatzbedingungen

Die folgenden Bedingungen haben sich für den Einsatz des Auswerteverfahrens als hilfreich erwiesen:

- Die Frequenz der Signale für verschiedene PIV-Ereignisse soll gewisse Unterschiede zeigen. Wenn keine Schwankungen im Signal enthalten sind, resultieren daraus mehr oder weniger Phasenlagen für alle PIV-Ereignisse, die in einem begrenzten Winkelbereich liegen. Empfehlenswert ist es, auf die Erklärung der Methodik in Kapitel 4.3 zu verweisen. Es ist an der Stelle wichtig zu erwähnen, dass die Frequenzen selbsterregter Strömungsphänomene über längere Zeitfenster keineswegs stabil bleiben. Dieser Nachteil wird benutzt und als Einsatzbedingung für den Erfolg des Verfahrens angegeben. Das bedeutet, dass das Verfahren an einem reinen Sinus scheitert.
- Es hat sich als hilfreich erwiesen, dass der analysierte Signalausschnitt so ausgewählt wird, dass er mehrere Perioden beinhaltet, damit lokale Frequenzschwankungen die Ergebnisse nicht zu stark beeinflussen. Auf der anderen Seite darf der analysierte Signalausschnitt nicht sehr groß sein, da die hochfrequenten Phänomene dann dominanter im Signal werden, was die Analyse verfälschen könnte. Periodisch auftretende Phänomene, die nur kurz innerhalb des Zeitfensters im Messsignal auftreten, können vor oder nach dem Ereignis stattfinden und sind nicht zwangsläufig zum Zeitpunkt des Ereignis zu finden.
- Die Anzahl der insgesamt aufgenommenen Bilder sollte ausreichend sein, damit die PIV-Ensemble-Mittelung in einzelnen Klassen nach der Sortierung der PIV-Bilder für mindestens 25 Bilder pro Phasenlage durchgeführt wird (ILA).

5 Anwendung des Verfahrens am Beispiel der Karmanschen Wirbelstraße

Die Umsetzung des Analyseverfahrens erfolgt mit direkter Anwendung auf die in Kapitel 3.1 realisierte Karmansche Wirbelstraße. Die gemessenen Hitzdrahtsignale und die PIV-Signale liegen nun in einem Messvorgang als Datensatz vor. Zur Analyse der darin enthaltenen periodischen Phänomene bedient man sich Methoden und Verfahren der Signalanalyse. Zu einem besseren Verständnis der Datenauswertung des Hitzdrahtsignals in dieser Arbeit werden ein paar wichtige Schritte des Auswerteverfahrens im Kapitel 4.2 an einem rein periodischen Signal getestet. Mittels des im folgenden Kapitel dargestellten Auswerteverfahrens werden Merkmale extrahiert, die eine Zuordnung der einzelnen PIV-Bilder zu dem periodischen Hitzdrahtsignal ermöglichen.

5.1 Programmtechnische Umsetzung des Auswerteverfahrens

Der Entwurf des Programmcodes wird mit dem Flussdiagramm in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Entwicklung des Analysealgorithmus unter Anwendung der Fast-Fourier-Transformationen erfolgt nach folgenden Schritten:

- **Einlesen der Messsignale und Aufbereitung der Messdaten:**

Das Hitzdrahtsignal und das Q-Switch-Signal, die aus der PIV-Messung vorliegen, werden als Erstes eingelesen. Die Anzahl der PIV-Bilder für alle 9 Messreihen beträgt $i = 2250$. Die Aufzeichnung von jedem der PIV-Bilder wird in dem Q-

Switch-Signal als Sprung-Funktion veranschaulicht.

- **Markieren jedes PIV-Bildes als ein PIV-Ereignis auf der Zeitachse:**

Die Zeitpunkte der PIV-Bilder, die synchron mit den Hitzdraht-Daten aufgenommen worden sind, werden in der folgenden Arbeit als „PIV-Ereignisse“ bezeichnet.

Die folgenden Schritte werden für jedes PIV-Ereignis wiederholt.

- **Auswahl eines Zeitfensters Δt :** Der Algorithmus beginnt mit der Festlegung eines Zeitfensters zentriert um die PIV-Ereignisse. Nachdem einige ausgewählte Zeitfenster ausprobiert worden sind, wurde festgestellt, dass die Startfenster sinnvollerweise mindestens eine vollständige Periodendauer der Strömungsinstabilität enthalten muss. Die Fenstergröße speziell für das Hitzdrahtsignal der Karmanschen Wirbelstraße ist auf $166,6\text{ ms}$ (800 Messpunkte) festgelegt, die mit der Länge der Rechtecke rechts und links der PIV-Ereignisse übereinstimmen (Abbildung 5.2). Die ausgewählten Zeitfenster um die PIV-Messung enthalten damit nicht von vornherein ein ganzzahliges Vielfaches der Periode und die anschließende FFT-Analyse weist Artefakte auf.
- **Variation der Länge des betrachteten Signalausschnitts:** Um das richtige Zeitfenster zu finden, wird es sukzessive verkleinert. Abbildung 5.3 zeigt hierzu exemplarisch für drei PIV-Messungen die Abhängigkeit der aus der FFT-Analyse hervorgegangenen maximalen Amplitude von der Fenstergröße. Ein Signalausschnitt von 800 Messpunkten wurde „zentriert“ rundum jedes PIV-Ereignisses herausgenommen. Dann wird dieser Signalausschnitt verkleinert bis zur einer Fensterlänge von 400 Messpunkten. Dieses Zeitfenster beinhaltet etwa $6T_{KWS}$ bis $12T_{KWS}$, wobei T_{KWS} die erwartete Periodendauer der Karmanschen Wirbelstraße ist und $T_{KWS} = 0,012\text{ s}$ beträgt. Die erwartete Periodendauer wird aus der Berechnung der Strouhal-Zahl ermittelt (Kapitel 3.1).
- **Fourier-Transformation über jeden Signalausschnitt und Bestimmung der maximalen Amplituden:** Die Harmonische mit der maximalen Amplitude wird an dieser Stelle bestimmt.
- **Analyse des Zusammenhangs zwischen der Fensterbreite und der**

zugehörigen maximalen Amplitude: Der zyklische Verlauf der maximalen Amplituden kennzeichnet mit seinen lokalen Maxima die Zeitfenster, die mit hoher Wahrscheinlichkeit gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer abdecken (Abbildung 5.3, markierte Maxima-Stellen). Der Verlauf der maximalen Amplituden wird zuerst geglättet. Die optimale Fensterbreite wird anhand der maximalen Amplitude bestimmt.

In Abbildung 5.4 wird das Hitzdrahtsignal mit beispielsweise drei PIV-Ereignissen über der Zeitachse jeweils in der zugehörigen optimalen Fensterbreite dargestellt. Auf der anderen Seite zeigt Abbildung 5.5 das Hitzdrahtsignal in der Nähe von den drei PIV-Ereignissen jeweils entlang der ermittelten Periodendauer.

- **Einsatz der Fourier-Transformation über die Periodendauer und Zuordnung jedes PIV-Ereignisses zu einer Phasenlage:** Mit der Fourier-Transformation wird noch mal das Hitzdrahtsignal über die Länge der berechneten Periodendauer analysiert und der Phasenwinkel berechnet.
- **Statistische Auswertung zur Klassifizierung der PIV-Bilder nach Phasenpositionen:** Nachdem ein Phasenwinkel für jedes PIV-Ereignis ermittelt wurde, können die PIV-Bilder nach Klassen sortiert werden. Für diese Sortierung läuft eine Aufteilung der Periodendauer in 5° -Schritten ab. Die Phasenpositionen der Bilder werden über 72 Klassen in einem Histogramm verteilt, das die Anzahl von Bildern bei jeder Phasenposition in den einzelnen Klassen zeigt (Abbildung 5.6, links). Dabei werden PIV-Messungen nicht berücksichtigt, deren jeweilige zugehörige Periodendauer sich vom Mittelwert deutlich unterscheidet. Die zugelassenen Frequenzen liegen zwischen 80 Hz und 95 Hz .

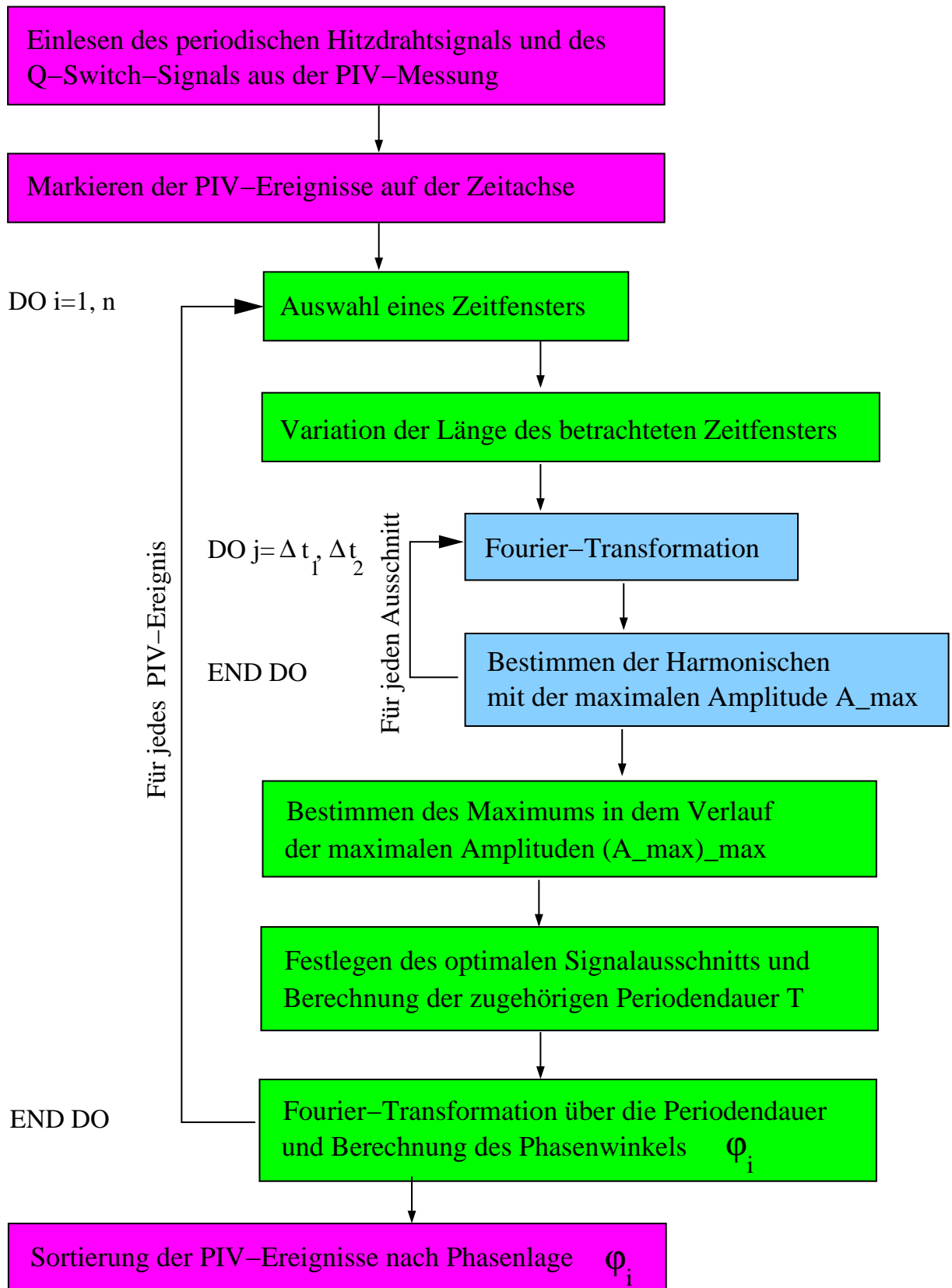


Abbildung 5.1: Flussdiagramm des Auswerteprogramms

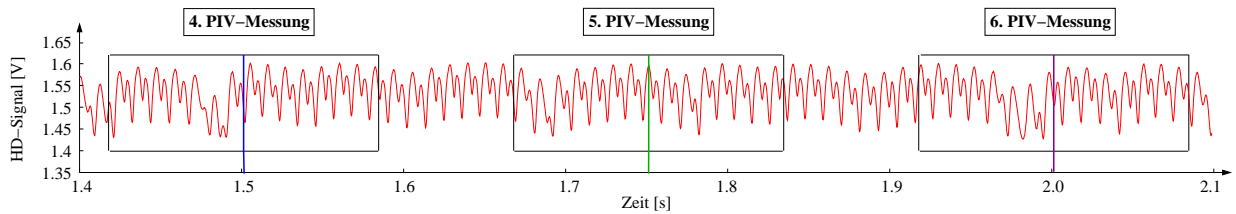


Abbildung 5.2: Hitzdrahtsignal mit Markierung der PIV-Ereignisse und Zeitfenster als Rechteck für FFT

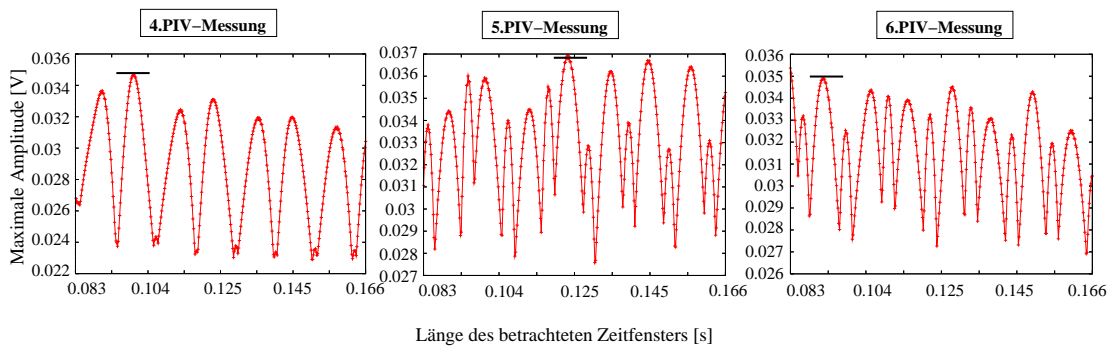


Abbildung 5.3: Amplituden der Grundfrequenz in Abhängigkeit von der Fenstergröße. Die höchste Amplitude wird mit einem horizontalen Strich gekennzeichnet.

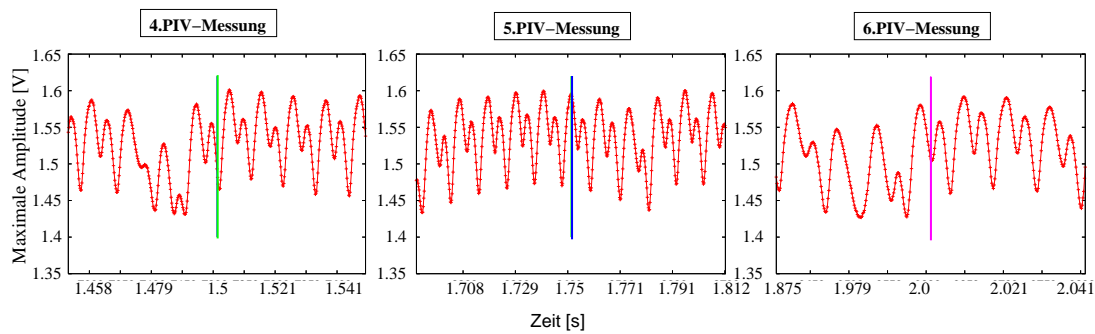


Abbildung 5.4: Hitzdrahtsignal über die Zeitachse beispielsweise für drei PIV-Ereignisse: Die dargestellten Zeitabschnitte zeigen einzelne PIV-Ereignisse über der optimalen ermittelten Zeitfenster.

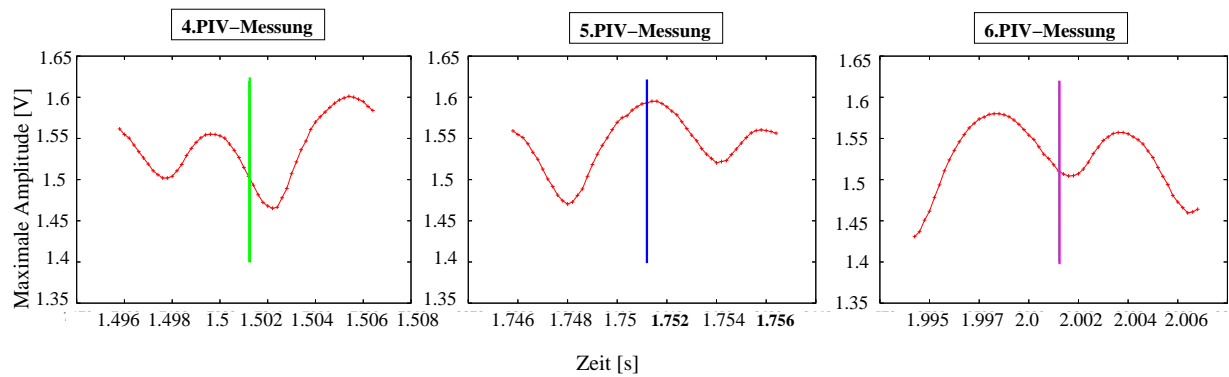


Abbildung 5.5: Hitzdrahtsignal über die Zeitachse beispielsweise für drei PIV-Ereignisse: Die dargestellten Zeitabschnitte zeigen einzelne PIV-Ereignisse über der ermittelten Periodendauer T_i

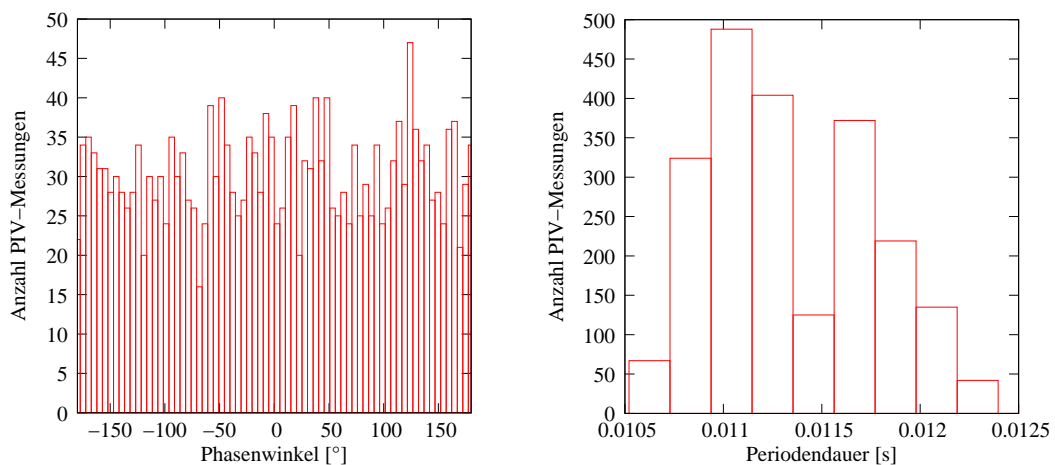


Abbildung 5.6: Statistische Analyse der PIV-Messungen, links: Histogramm der Phasenlage rechts: Histogramm der Periodendauer

5.2 Darstellung der PIV-Ergebnisse

Nachdem in den einzelnen Klassen, denen jeweils ein Phasenwinkel zugeordnet ist, eine hinreichende Anzahl von PIV-Bildern vorliegt, wird die statistische Auswertung und die Mittelwertbildung mit der Software des Auswertesystems (VidPIV der Firma ILA) vorgenommen. Die Abbildung 5.7 zeigt die gesamte Messebene, die von der PIV-Kamera aufgenommen wird. Der schraffierte Teil markiert den Bereich der Hitzdrahtsonde samt Halter, der in der Auswertung der PIV-Bilder ausgeblendet wurde. In dem Fenster (ersichtlich in Abbildung 5.7 als ein Rechteck) wird die Messebene fokussiert, damit die Wanderung des Wirbels klarer dargestellt wird. Als Ergebnis sind in Abbildung 5.8 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 der negativen x-Richtung der Mittelwert von 0,9 m/s subtrahiert worden. Innerhalb des betrachteten Fensterausschnitts ist der Transport eines Wirbels während einer Periode in den Darstellungen in Abbildung 5.8 durch die Kennzeichnung des Zentrums mit dem Symbol + verdeutlicht.

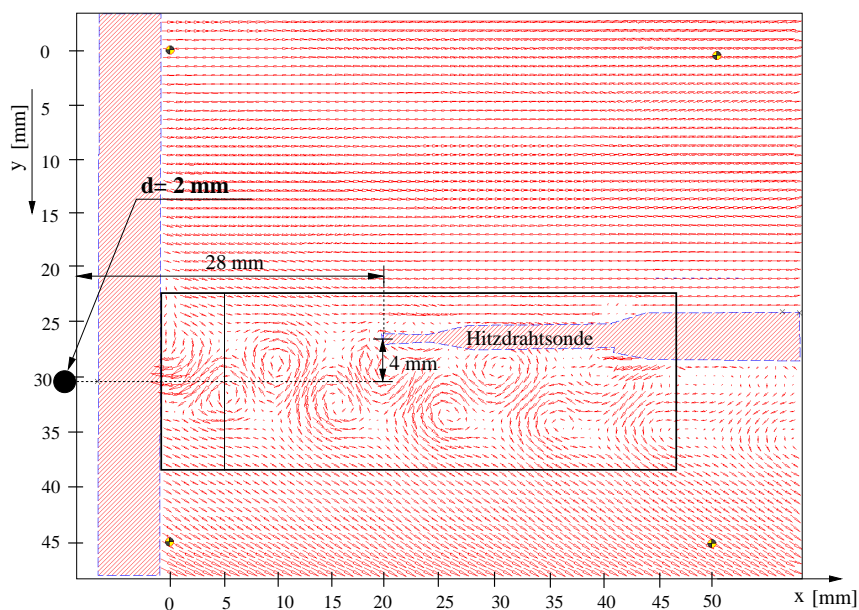
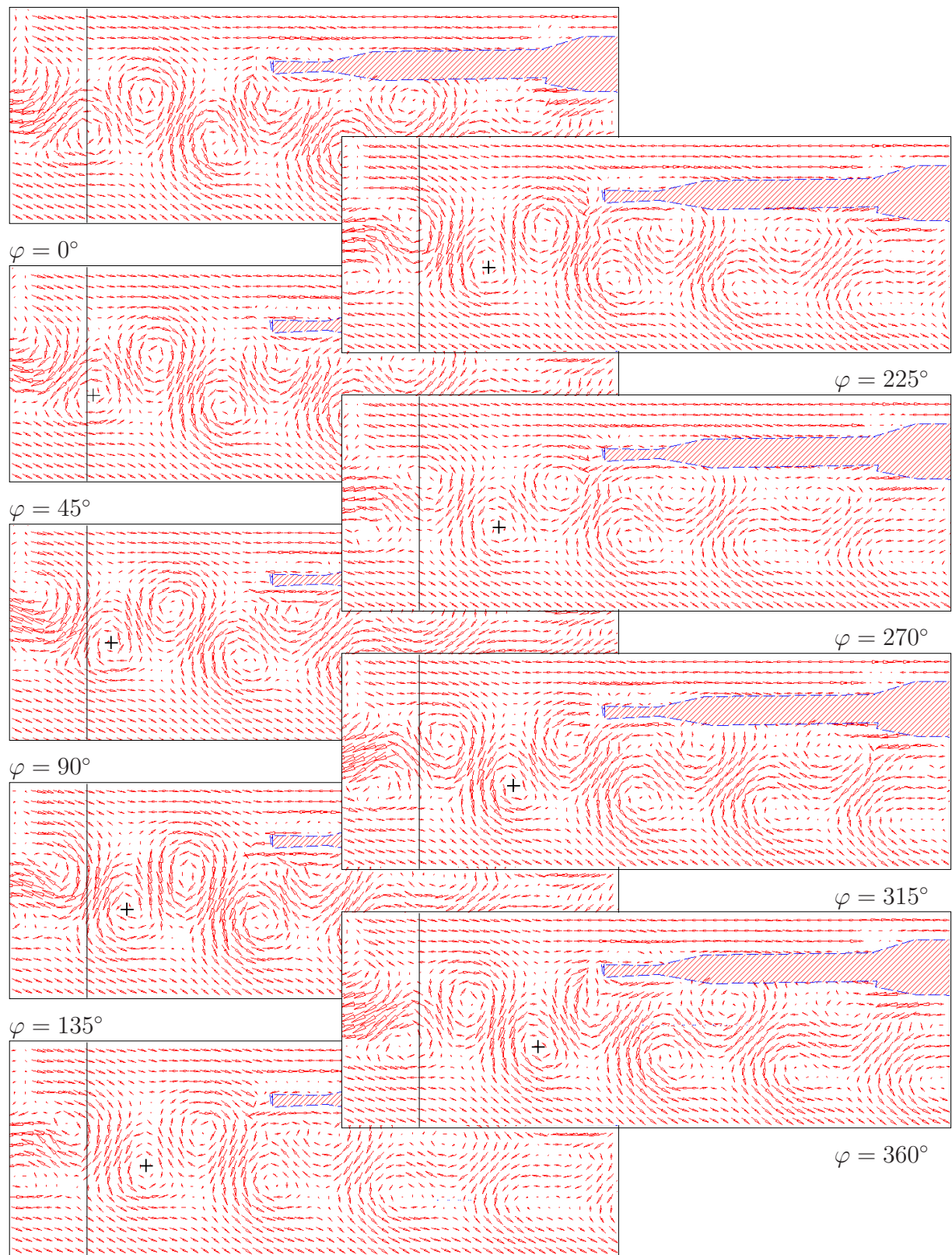


Abbildung 5.7: Die gesamte Messebene mit Positionen des Zylinders und der Hitzdrahtsonde.



$\varphi = 180^\circ$

Abbildung 5.8: Bilderfolge der Wirbelablösung als Ergebnis der Auswertung der PIV-Bilder

Einen genaueren quantitativen Einblick in die instationäre Strömung liefert die in Abbildung 5.11 gezeigte lokale Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten u und v in x - bzw. y -Richtung während einer Periode. Die ausgewählten Koordinaten liegen bei $x = 0$ und $y/d = 16$, $x/d = 10$ und $y/d = 16$ und $x/d = 5$ und $y/d = 14$. Wie die Darstellungen zeigen, sind der ersten Harmonischen, die als durchgezogene Linie eingetragen ist, 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.

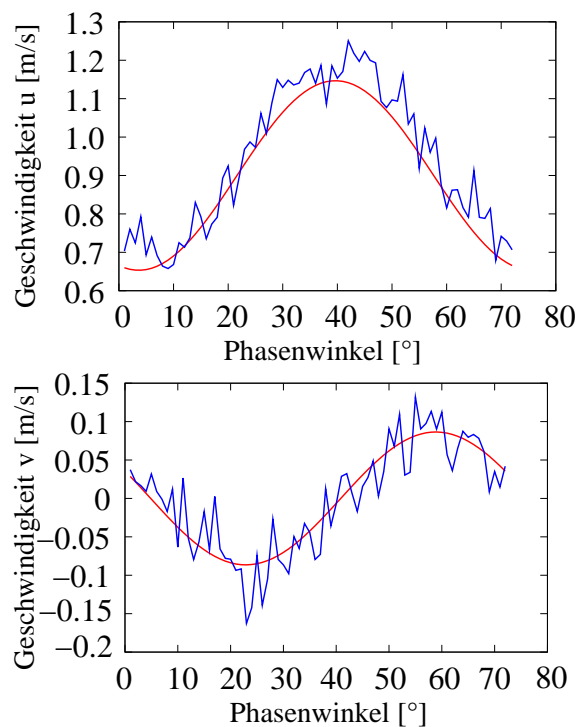


Abbildung 5.9: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten in x und y -Richtung während einer Periode an den Koordinaten $x = 0$ und $y = 32$.

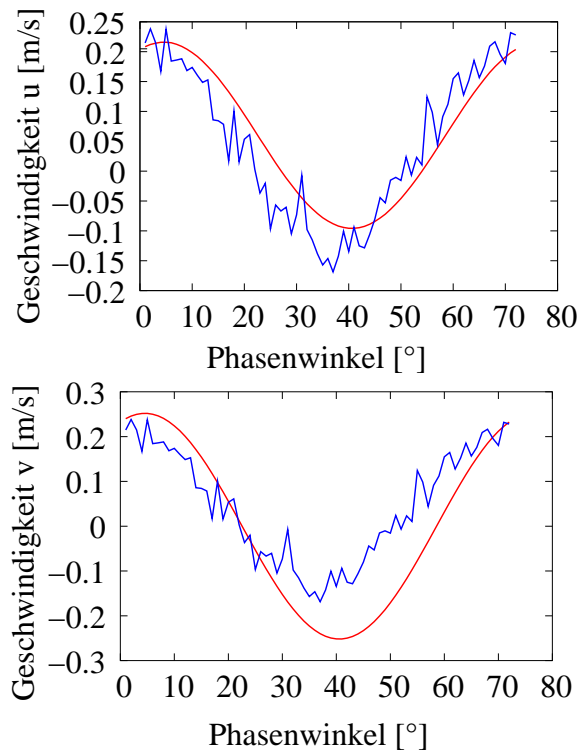


Abbildung 5.10: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten in x und y-Richtung während einer Periode an den Koordinaten $x = 20$ und $y = 32$.

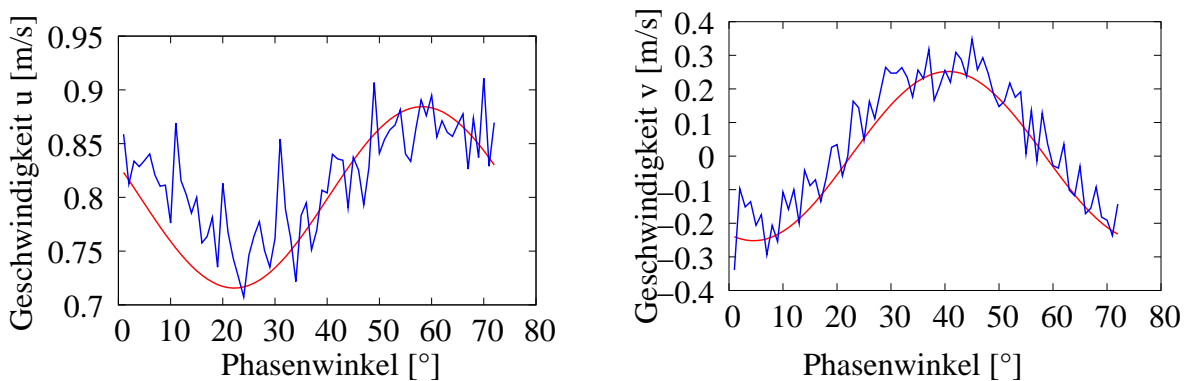


Abbildung 5.11: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten in x und y-Richtung während einer Periode an den Koordinaten $x = 10$ und $y = 28$.

6 Anwendung der Methodik auf die Strömung in einem Leitgitter bei hoher aerodynamischer Belastung

In dem folgenden Kapitel wird zuerst auf den Ringgitterwindkanal (RGW) am Fachgebiet Strömungsmaschinen der Universität Kassel eingegangen. Zum Aufbau der PIV-Komponenten an der Messstrecke werden die Möglichkeiten dann in dem Abschnitt 6.3 kurz erläutert, da die Änderung der Bauteile im Verdichter-Leitrad im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, konnten entsprechende PIV-Messungen nicht durchgeführt werden. Für die Anwendung der Auswertemethodik wird in diesem Fall auf die Datenbasis zurückgegriffen, die aus früheren experimentellen Untersuchungen am RGW gewonnen worden sind und im Kapitel 6.2 beschrieben werden. Um den Prozess der Phasenwinkelbestimmung nachbilden zu können, werden in diesen Untersuchungen entlang der Zeitachse künstliche Marken gesetzt, die die fehlenden PIV-Messungen simulieren.

6.1 Versuchseinrichtung

Die Messstrecke wird in einen Luftkreislauf eingebunden, der zur Versorgung von Massenstrom zuständig ist. Die Abbildung 6.1 zeigt die gesamte Versuchsanlage im Labor des Fachgebiets. Ein Radialverdichter ist die Hauptkomponente, der mit einem maximalen Druckverhältnis von $\Pi = 1,8$ und einem zugehörigen Massenstrom von $\dot{m} = 8 \text{ kg/s}$ die drei Messstrecken mit Luft versorgt. Ein Wärmetauscher sorgt für die Fluidkühlung. Zu Kontrollzwecken wird daran anschließend der geförderte Massenstrom in einem Venturirohr nach DIN 1952 bestimmt, bevor das aufbereitete Fluid der Versuchsstrecke zugeführt wird. Der Kreislauf bietet weiter die Möglichkeit, eine Kalibrierstrecke und ein

ebenes Gitter mit Luft zu versorgen. Das Ansaugen der Umgebungsluft erfolgt hierbei durch die mit Filtern versehene Düse im Kalibrierkreis. Das Einstellen des Massenstromes geschieht über das Vordrallgitter des Radialverdichters bzw. eine Bypassklappe in der Saugleitung.

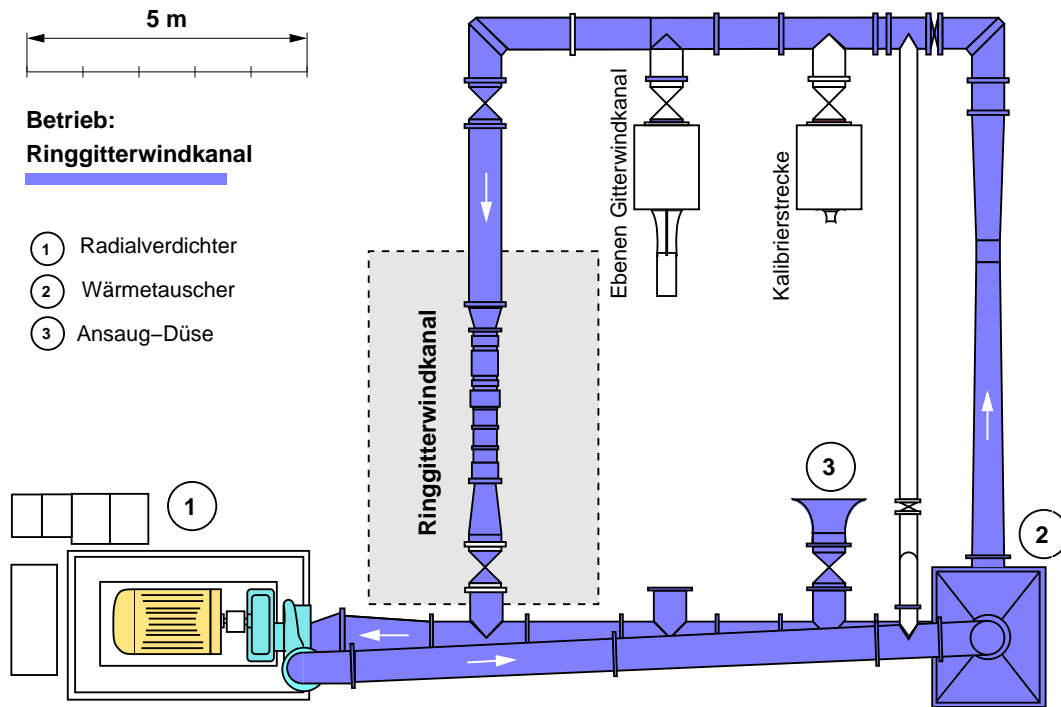


Abbildung 6.1: Der Luftkreislauf (WEIDENFELLER (2002))

Der RGW in Abbildung 6.2 stellt die eigentliche Messstrecke dar. Das Leitrad besteht aus 17 prismatisch gefertigten Schaufeln, die am Gehäuse befestigt sind. Der Strömungskanal im Prüfstand wird durch eine zylindrische Naben- und Gehäusekontur gebildet. Ein Drallerzeuger, der in Nabe und Gehäuse befestigt ist und die Nabe auf der Zuströmseite trägt, ermöglicht eine Umlenkung der axial kommenden Strömung bis zu 55° . Der Zuströmwinkel zum Messgitter kann im Bereich von $-39^\circ \leq \alpha_1 \leq -55^\circ$ variiert werden (WEIDENFELLER (2002)).

Der Ringraum zwischen dem Drallerzeuger und dem Messgitter mit einer Länge von 580 mm hat keine weiteren Einbauten, um eine möglichst rotationssymmetrische Zuströmung zum Messgitter zu gewährleisten. Hinter dem Messgitter wird nach 285 mm die Nabe mithilfe von symmetrischen Stützrippen gelagert (Abbildung 6.2). Weit stromab der Stützrippe wird der Ringquerschnitt in einen Kreisquerschnitt überführt, bevor der

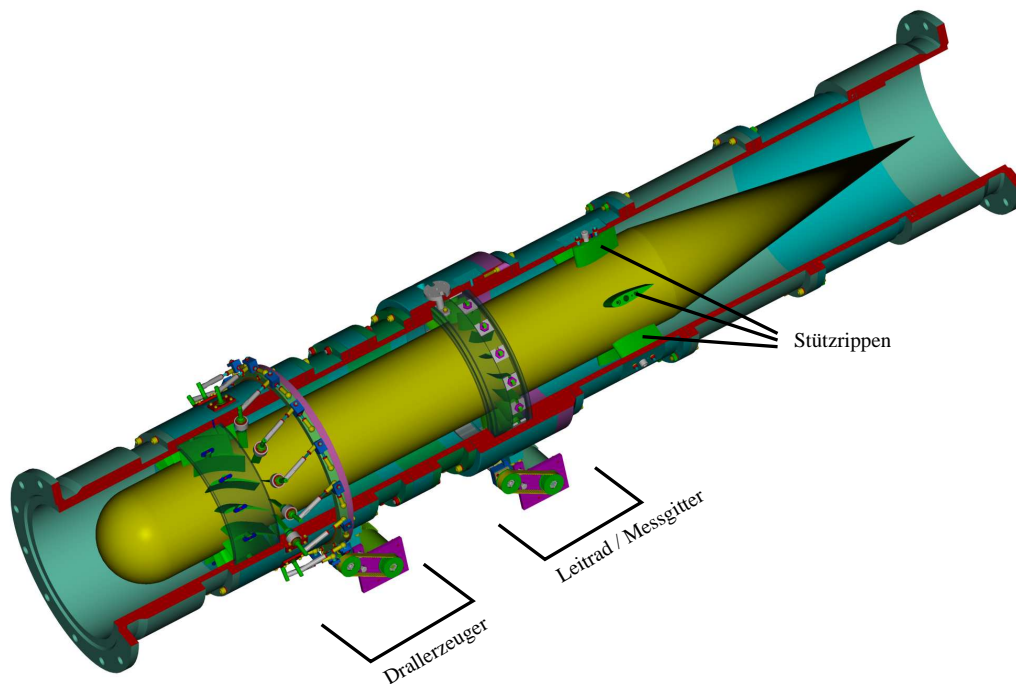


Abbildung 6.2: Ringgitterwindkanal (WEIDENFELLER (2002))

Massenstrom bei geöffnetem Kreislauf in die Umgebung abgeblasen wird. Bei geschlossenem Kreislauf wird die Strömung im Diffusor am Ende des Prüfstandes in den sich daran anschließenden Strang weitergeleitet.

6.2 Die verfügbaren Datensätze

Im Rahmen von früheren Untersuchungen am Ringgitter (WEIDENFELLER (2002)) sind experimentelle Daten gewonnen worden, um die stationären und instationären Phänomene im Ringgitter zu charakterisieren. In diesem Kapitel wird auf 2 Datensätze eingegangen, die sich speziell in der Positionierung der piezoresistiven Drucksensoren auf der Nabe unterscheiden.

Im ersten Aufbau werden diese in axialer Richtung eingebracht (Abbildung 6.3) und im zweiten Aufbau wird die Zuordnung der Sensoren in der Umfangsrichtung vorgenommen (Abbildung 6.4).

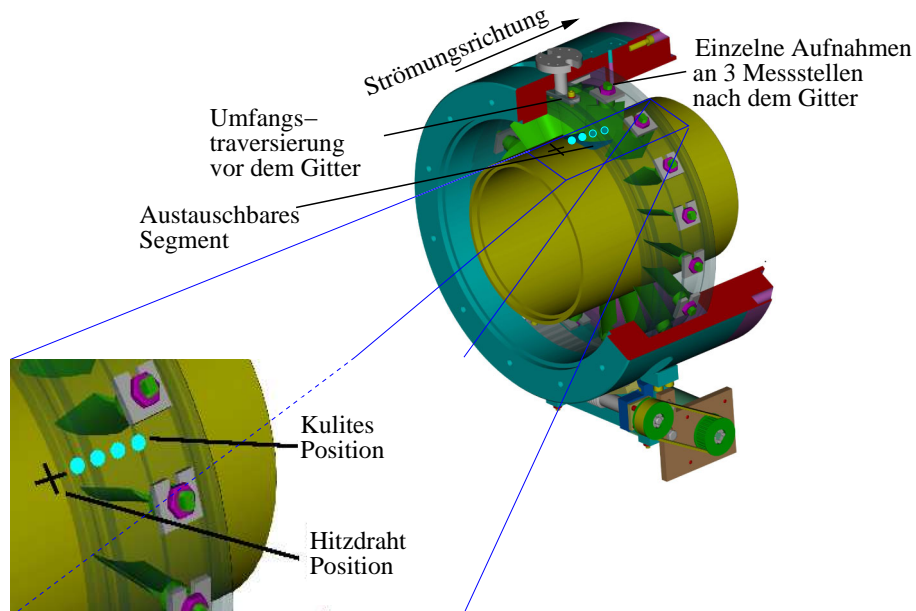


Abbildung 6.3: Aufbau 1: Axiale Positionierung der Drucksensoren im Leitrad-Messgitter (WEIDENFELLER (2002))

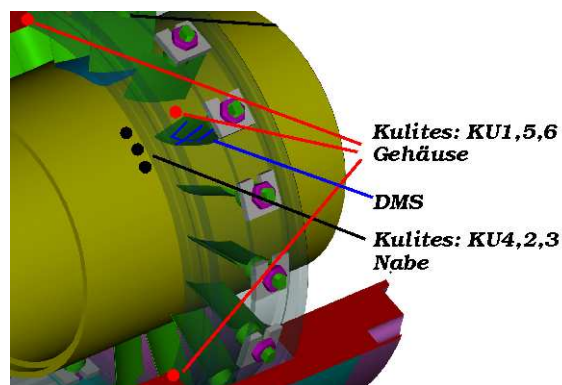


Abbildung 6.4: Aufbau 2: Positionierung der Drucksensoren in Umfangsrichtung im Leitrad-Messgitter WEIDENFELLER (2002)

Messstellen aus den Drucksensoren der ausgesuchten Datensätze

Das zu untersuchende Leitgitter ist in einem im Gehäuse drehbar gelagerten Messing-Innenring untergebracht. Durch Drehen des Ringes und radiale Traversierung einer Strömungssonde kann das Zuströmfeld über ca. 2 Teilungen erfasst werden. Die Schaufeln sind in dem Messing-Innenring befestigt. Da sich die Spaltwirbel im vorhandenen Leitgitter an der Nabe befinden, sind die dort positionierten Sensoren vor dem Gitter von größerer Bedeutung und werden deswegen besonders betrachtet.

Im Nabenkörper befindet sich in Höhe des Messgitters ein austauschbares Segment (Abbildung 6.3), das sich über eine Teilung und die Sehnenlänge des Profils erstreckt. Die Positionen der Drucksensoren in diesem Segment werden in der Arbeit von WEIDENFELLER (2002) gezeigt. Für instationäre Messungen wurden verschiedene Segmente mit entsprechenden Druckaufnehmern benutzt. Mithilfe von wandbündigen Bohrungen und angeschlossenen Ringleitungen werden zusätzlich statische Gehäusedrucksignale vor und hinter dem Messgitter ermittelt. Weitere Daten des Versuchsträgers und der im Folgenden kurz beschriebenen eingesetzten Beschaukelung können von der Arbeit von WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2004) entnommen werden.

6.3 PIV-Einsatzmöglichkeiten am Ringgitterwindkanal

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Konzepte für die PIV-Messung am RGW erklärt.

Optischer Zugang:

Für den Einsatz der PIV-Komponenten am Messgitter ist ein optischer Zugang erforderlich. Es werden Öffnungen am Gehäuse sowie am Messing-Innenring erforderlich, um ein Plexiglas-Fenster zu platzieren (Abbildung 6.5). Ein Segment, bestehend aus zwei Plexiglas-Schaukeln, ist an einem Plexiglas-Untersatz festgeschraubt. Das Zweischaufelsegment kann von außen angebracht werden. Dadurch wird eine Lösung für die Einbringung einer geeigneten Kalibrierplatte gefunden. Nach Bedarf werden die Metallteile durch diese Fenster-Öffnung geschwärzt, um eventuelle Reflexionen zu vermeiden.

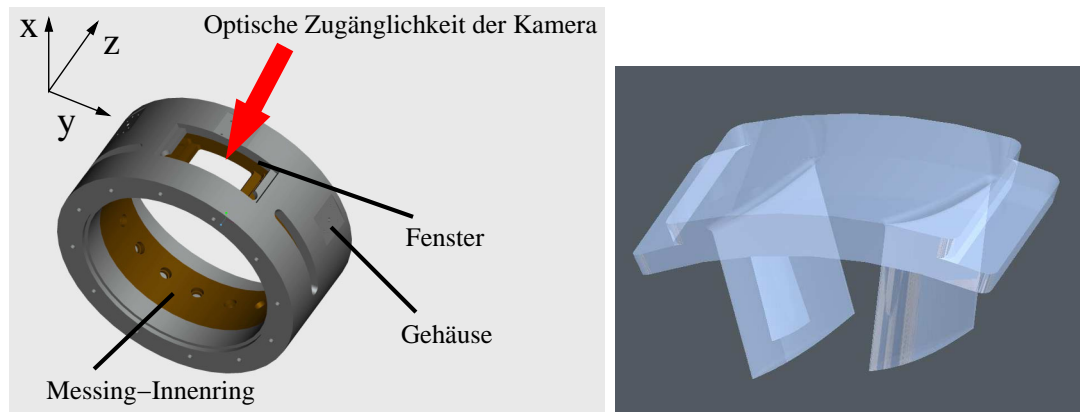


Abbildung 6.5: links: Die optische Zugänglichkeit im Messgitter; rechts: Das Zweischaufelsegment

Laserlichtschnitt

Für die Einbringung des Lasers ist eine von zwei Varianten auszuwählen. Dabei steht der Laser in beiden Fällen außerhalb des Windkanals. Die Auswahlkriterien sind zum einen die möglichen Schwankungen und zum anderen die Lichtschnittdicke.

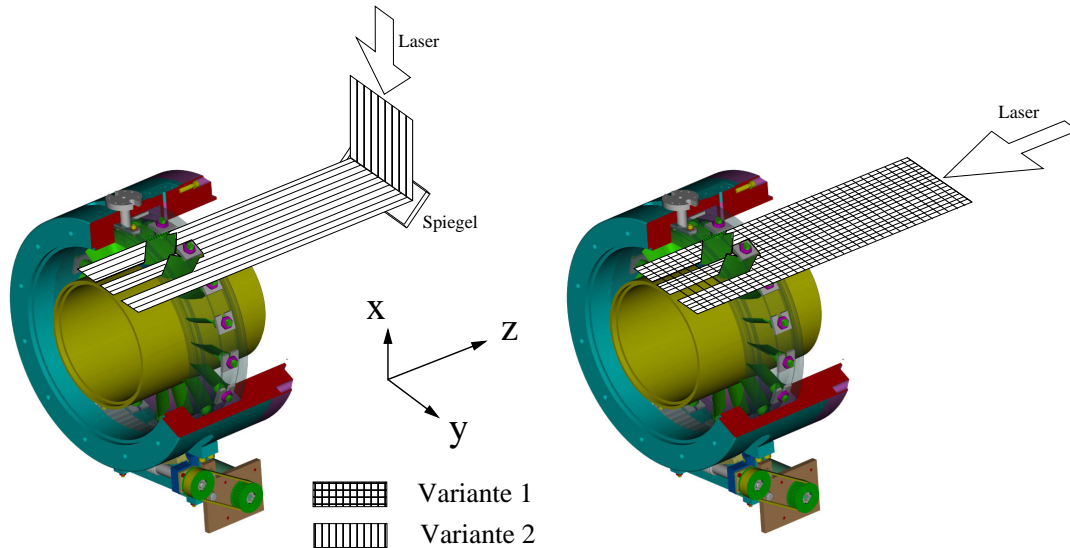


Abbildung 6.6: Varianten zur Einbringung des Laserlichtschnitts

Bei der ersten Variante wird der Lichtschnitt direkt aus dem Laser durch einen Zugang in dem Rohrleitungssystem hinter der Messstrecke eingeleitet. Durch den Diffusor am

Ende des Prüfstandes gelangt dann der Laserschnitt zur Messebene. Ein Zugang wird dafür (für den Laserlichtschnitt) an dem Strang des Rohrleitungssystems angebracht. Eine der sechs Naben-Stützrippen, die sich hinter dem Messgitter befinden, muss entfernt werden, damit der Laserlichtschnitt ungehindert an die Messebene gelangen kann. Dabei sorgt eine Parallel-Lichtschnittoptik dafür, dass die Energie des Lasers nach der 3 m langen Strecke von der Laser-Position bis zur Messstrecke nicht verringert wird und die Lichtschnittdicke nicht zunimmt.

Anhand eines im Windkanal platzierten Spiegels wird der Laserlichtschnitt bei der zweiten Variante umgelenkt, um an die Messebene zu gelangen. Eine weitere Öffnung sollte dafür hinter der Messstrecke angebracht werden. Diese beiden Varianten sind in der Abbildung 6.6 dargestellt.

Zur Visualisierung der Wanderung der Rotierenden Instabilitäten, wie sie in der Arbeit von BAUMGARTNER ET AL. (1995) dargestellt sind, soll die Messebene belichtet werden, die senkrecht zur Schaufelebene steht (xy -Ebene in der Abbildung 6.6). Dafür sollten sowohl der Laserlichtschnitt als auch der optische Zugang für die Kamera durch das einzige vorhandene Fenster (Abbildung 6.5) erreicht werden. Die Größe des an dem Messgitter angebrachten Fensters lässt einen breiten Blickwinkel der Kamera zu. Dies wird ausgenutzt, damit mehrere Ebenen in der axialen Richtung vor oder im Gitter untersucht werden können. Das vorhandene PIV-System ist mit einem Scheimpflug-Adapter ausgestattet, der einen Blickwinkel bis 45° erlaubt und an der Kamera mit einem Objektiv verbunden wird. Dabei wird das Scheimpflugkriterium gegenüber der Messebene eingehalten. Ob der Blickwinkel für die Kamera mit der vorhandenen Fenstergröße ausreicht, wird sich in den ersten Messvorgängen klären. Es kann sowohl ein Laserlichtschnitt in zy -Richtung angebracht werden als auch einer in xz -Richtung (siehe Abbildung 6.6), da der Laserkopf sich drehen lässt und dadurch eine um 90° gedrehte Ebene belichtet wird. Diese letzte Variante ist aus diesem Grund von großem Vorteil, da diese zweidimensionale PIV-Untersuchungen der Rotierenden Instabilitäten ermöglicht. Ein zusätzlicher Vorteil der Variante 2 liegt bei der Minimierung der Fehler, die durch die Positionierung des Lichtschnitts verursacht werden können.

6.4 Analyse der verfügbaren Druck- und Hitzdraht-Signale

WEIDENFELLER (2002) konnte anhand von Hitzdraht- und Druck-Messungen im Nabenbereich am Gittereintritt des Verdichter-Leitrads die Rotierenden Instabilitäten nachweisen. Die von ihm durchgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass hier der Entstehungsort dieses Strömungsphänomens liegt. An den Druckaufnehmer-Messdaten wurde in dieser Arbeit die Autospektraldichtefunktion angewandt, die als Fouriertransformierte der Autokorrelationsfunktion definiert ist.

Gegeben sei ein zeitabhängiges Signal $x(t)$ über einem Zeitraum T . Die Fouriertransformierte $X(f)$ wird mithilfe der begrenzten Fourier Transformation abgeschätzt:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (6.1)$$

Die Auswertung des Signals mithilfe der Autokorrelationsfunktion

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt \quad (6.2)$$

bzw. ihrer Fouriertransformierten, der Autospektraldichtefunktion

$$S_{xx}(f) = \int_0^T R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6.3)$$

hat Anwendung gefunden.

Anhand der Strouhal-Zahl (Gleichung 6.4) wird die Frequenz f mithilfe der Sehnenlänge l und der axialen Zuströmgeschwindigkeit in Kanalmitte c_{ax} berechnet.

$$Sr = \frac{f l}{c_{ax}} \quad (6.4)$$

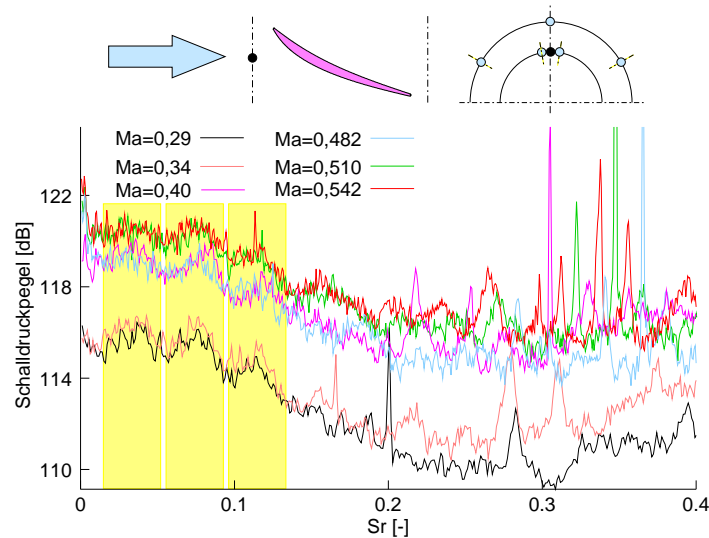


Abbildung 6.7: Analyse der Drucksignale mit der Autosppektraldichtefunktion (WEIDENFELLER (2002)). Die drei Markierungen im Bereich der Strouhal-Zahl von 0 bis 0,15 zeigen die breitbandigen Überhöhungen für unterschiedliche Machzahlen.

Bei einer Fehlanströmung von einem Inzidenzwinkel $i = 12^\circ$ wurde das Leitgitter hochbelastet. Die Abbildung 6.7 zeigt die strouhalnormierten Autospektren eines Nabendruckaufnehmers bei unterschiedlichen Zuströmmachzahlen von $0,290 \leq Ma_1 \leq 0,542$. Die Spektren der Nabenaufnehmer weisen alle „breitbandige Amplitudenüberhöhungen“ auf.

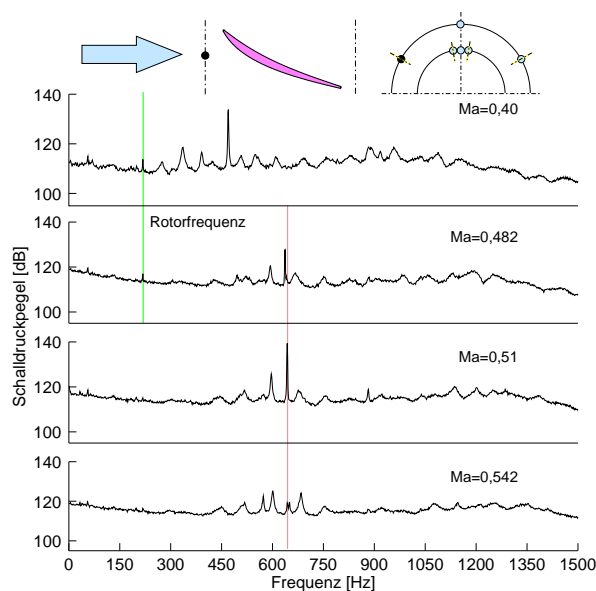


Abbildung 6.8: Autosppektraldichtefunktion des Drucksignals am Gehäuse für hohe Inzidenz $i = 12^\circ$ bei drei Mach-Zahlen (WEIDENFELLER (2002)).

In den Spektren der am Gehäuse liegenden Druckaufnehmer lassen sich in Abbildung 6.8 bei demselben Betriebspunkt diese Amplitudenüberhöhungen nicht mehr erkennen. Aussagekräftiger werden dort (am Gehäuse) die Signalmuster, die schmalbandige Amplitudenspitzen mit maximalen Werten hervorrufen. Die Frequenzen, bei denen diese schmalbandigen Amplituden einen maximalen Wert annehmen, sind für die diversen Betriebspunkte in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Charakteristische Frequenzen der schmalbandigen Amplitudenspitzen bei Mach-Zahlvariation, $i = 12^\circ$

Ma_1 [-]	0,4	0,482	0,51	0,542
f [Hz]	468	637,5	643,4	646,9

Bei diesen Frequenzen, wobei das Signal eine maximale Amplitude annimmt, erfolgt eine Synchronisation der Eigenschwingungsform des Kanals mit den periodischen Grenzschichtablösungen. Der Hinweis auf solche schmalbandigen Amplitudenüberhöhungen soll aufzeigen, dass durch den Synchronisationsmechanismus ebenfalls Strukturschwingungen hervorgerufen werden können. Diese schmalbandigen Amplitudenüberhöhungen konnten ebenfalls in dem hier dargestellten Auswerteverfahren festgestellt werden. Näheres dazu wird im Kapitel 6.5 erläutert.

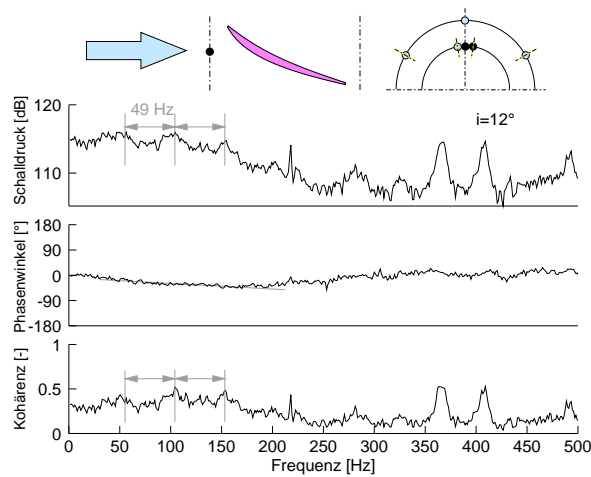


Abbildung 6.9: Kreuzspektrum, Phasenwinkel und Kohärenz der Signale von zwei Nebendruckaufnehmern für hohe Inzidenz $i = 12^\circ$ bei der Zuströmmachzahl $Ma_1 = 0,34$, aus der Arbeit von WEIDENFELLER (2002)

Es konnte anhand einer Kreuzkorrelation von zwei in Umfangsrichtung positionierten

Nabenaufnehmern die Wanderung des Wirbels vor dem Gitter nachgewiesen werden (Abbildung 6.9). Diese Analyse konnte die Ablösefrequenzen der aerodynamischen Quellmechanismen in dem Axialverdichtergitter für verschiedene Mach-Zahlen liefern. Die Spektren dieser Nabenaufnehmer haben auch in dieser Kreuzkorrelation die oben erkannten breitbandigen Amplitudenüberhöhungen gezeigt.

Bei einer Fehlanströmung von $i = 12^\circ$ für eine Mach-Zahl bleibt der Abstand der Maxima gleich. Beispielsweise für die Mach-Zahl $Ma_1 = 0,34$ wurde in Abbildung 6.9 ein Abstand von 49 Hz abgelesen. Bei weiterer Erhöhung der Zuströmgeschwindigkeit wird nicht nur das Amplitudenniveau, sondern auch der Abstand zwischen den Überhöhungen größer. Der Frequenzabstand der äquidistanten Amplitudenmaxima wird für jede Zuströmmachzahl in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Die ermittelten Fortpflanzungsfrequenzen (gerundet) der Rotierenden Instabilitäten für $i = 12^\circ$ und Variation der Zuströmmachzahl

Zuströmmachzahl Ma_1 [-]	0,34	0,4	0,482	0,51	0,542
Frequenzabstand Δf [Hz]	49	62	64	75	80

Die verfügbaren experimentellen Untersuchungen am RGW bestehen aus punktuellen Messungen und basieren auf der anschließenden zeitlichen Analyse der Signale. Es existiert deswegen keine bildliche Darstellung der rotierenden Strukturen und damit waren bisher Aussagen zur Entwicklung der Wirbelstrukturen nur sehr indirekt möglich. Für ein tieferes Verständnis der Vorgänge ist eine zeitlich aufgelöste Darstellung der Geschwindigkeitsfelder vorteilhaft, damit das dynamische Verhalten der Wirbelstrukturen aufgeschlüsselt werden kann. Erst wenn man diese beiden Indikatoren anhand von PIV-Messungen erfasst, werden die strömungsmechanischen Vorgänge sowohl in der Entstehungsphase als auch während des instabilen Verdichterbetriebes besser verstanden. Sodann wird es möglich, intelligente Maßnahmen zu realisieren, um einen instabilen Verdichterbetrieb zu vermeiden.

6.5 Anwendung des Auswerteverfahrens an den selbsterregten Strömungsphänomenen im Verdichter-Leitrad

Mit der Ergänzung der hier entwickelten Auswertemethode werden die Messdaten bearbeitet, die aus den Messungen am Statorgitter des Axialverdichters resultieren. Die selbsterregten periodischen Strömungsphänomene, insbesondere die Ablösefrequenzen der Rotierenden Instabilitäten (RI), werden damit bei unterschiedlichen Mach-Zahlen und an verschiedenen Sensorpositionen erfasst.

6.5.1 Erkennung der Instabilitäten auf Basis des Algorithmus

Die erste Fragestellung lautet an dieser Stelle, ob ein periodischer Charakter in den Hitzdraht- oder Drucksignalen zu identifizieren ist. Bei der Karmanschen Wirbelstraße ist der periodische Verlauf im Hitzdrahtsignal deutlich zu sehen. Gegenüber den Signalen von der Wirbelstraße ist das beim Verzögerungsgitter nicht so klar erkennbar. Zweitens ist festzustellen, wie groß die Frequenzen dieses periodischen Vorganges sind und wie stark sich deren Verhalten ändert. Einerseits: Wenn diese Änderungen in den Frequenzen scharf begrenzt sind, wird der Algorithmus genau so wie im Beispiel der Karmanschen Wirbelstraße angewandt. Andererseits: Bei stark verrauschten Verhalten werden allerdings zusätzliche Erweiterungen des Auswertalgorithmus notwendig, um die Frequenzen des untersuchten Phänomens mit dem Algorithmus zu erkennen. Es werden die Frequenzen ausgewählt, die in einem vordefinierten Filterintervall liegen. Die maximalen Amplituden werden dann berechnet und der „optimale“ Signalausschnitt an der Position der höchsten Überhöhung wird abgelesen.

Der aktuelle Stand der Auswertung, angewandt auf die Verdichter-Datensätze, erkennt nur die hochfrequenten dominierenden Harmonischen (deren Amplituden maximal sind), da noch kein Filter eingesetzt wurde. Abbildung 6.10 zeigt beispielweise für mehrere Ereignisse, wie sich der Verlauf der maximalen Amplituden in Abhängigkeit der analysierten Zeitfenster (in *ms*) ändert. Für eine deutlichere Darstellung der Ergebnisse wird in diesen Abbildungen die Fläche unter der Kurve schattiert gezeigt. Es ist wichtig, aus dem Verlauf der maximalen Amplituden zu entnehmen, dass die Periodendauer der dominierenden Harmonischen aus dem Abstand zwischen zwei Maxima abzulesen ist (sie-

he vergleichbare Analyse des Sinussignals in Abbildung 4.4). Wenn diese Darstellungen mit den Kreuzkorrelationsspektren in der Arbeit von WEIDENFELLER (2002) verglichen werden, sind keine breitbandigen Amplitudenüberhöhungen, sondern nur schmalbandige festzustellen.

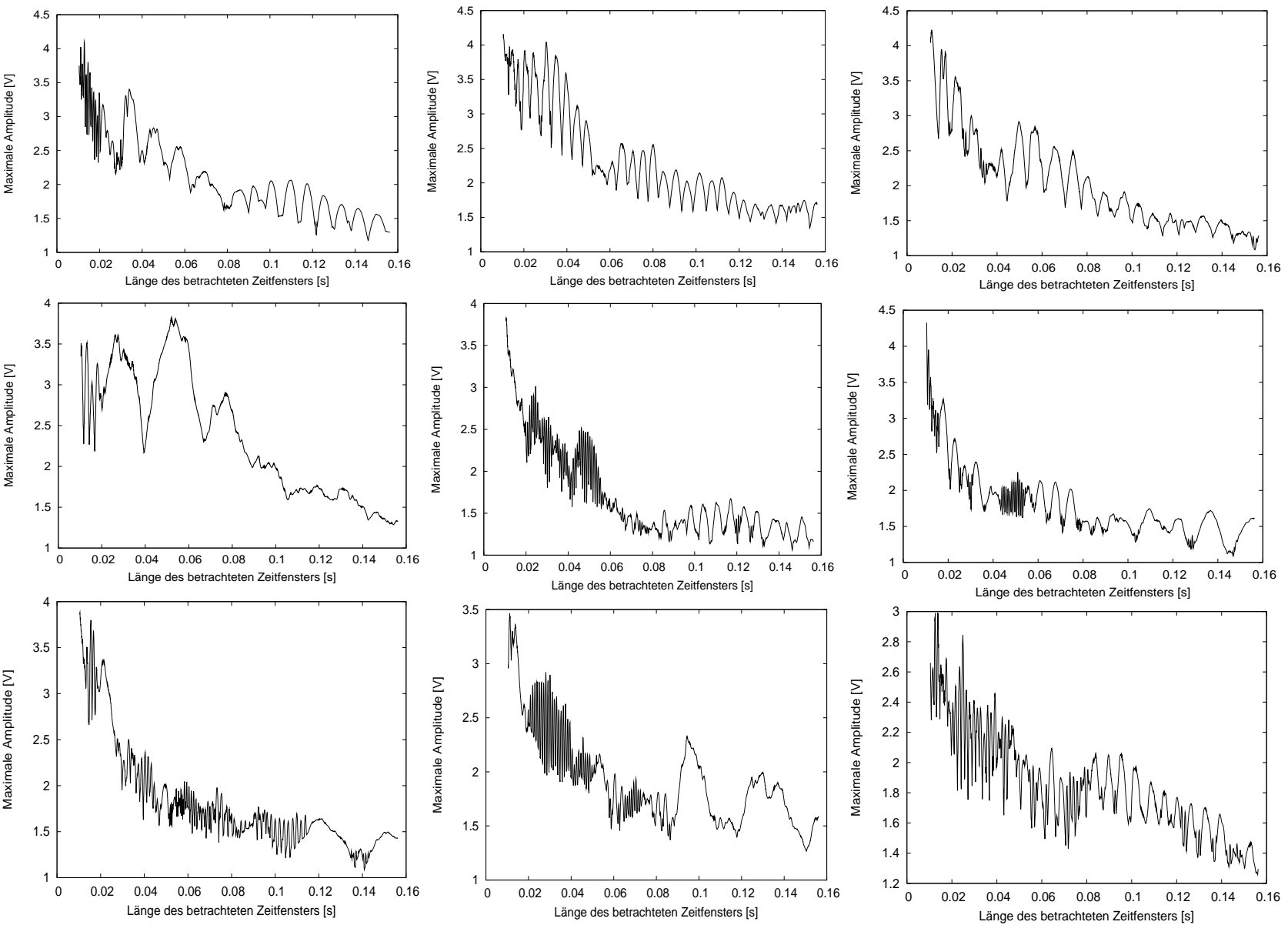


Abbildung 6.10: Der Verlauf der maximalen Amplituden in Abhängigkeit der analysierten Zeitfenster des Drucksignals: Sensor KU2

6.5.2 Erweiterung des Auswerteverfahrens

Die Zeitsignale aus dem Ringgitterwindkanal werden mit dem im folgenden erläuterten erweiterten Verfahren analysiert.

Generierte PIV-Ereignisse kombiniert mit den vorhandenen Rohdaten

Es wurden keine PIV-Messungen an dem Leitgitter durchgeführt. Anstelle des Q-Switch-Signals wurde ein Impuls-Signal mit einer Frequenz von 4 Hz generiert.

Auswahlkriterium der maximalen Amplituden

Nach WEIDENFELLER (2002) ist die Rotorfrequenz des Radialverdichters bei $216,3\text{ Hz}$ zusammen mit den breitbandigen Amplitudenüberhöhungen bis zu einer Mach-Zahl von $Ma_1 = 0,482$ in der Autospektraldichtefunktion eines Gehäuseaufnehmers deutlich zu sehen. Dieses Signal breitet sich durch den gesamten Windkanal in die Messstrecke aus. Bei weiterer Mach-Zahl-Erhöhung wird das Amplitudenniveau um den Bereich der Rotorfrequenz so groß, dass diese Rotorfrequenz im Spektrum nicht mehr zu bemerken ist. Die RI sollen die höchste Amplitude haben, damit die anderen überlagerten Frequenzen (wie z. B. die Rotorfrequenz des radialen Versorgungsverdichters im Windkanal) keine großen Auswirkungen auf die Auswertung haben können und damit die RI anhand des Algorithmus erkennbar werden.

Wenn die RI-Amplituden allerdings nicht diese höchsten Amplituden in den Signalen verursacht haben (sondern die akustischen Signale oder die schmalbandigen Frequenzen), sollte der Algorithmus dann die RI-Amplituden auch erkennen können.

Filterung

Da sich die Frequenzen in den Hitzdraht- und Druck-Messdaten am Verdichter-Leitrad überlagern, werden hier Filter eingesetzt.

Das neue Auswahlkriterium lautet: Wenn die festgelegte maximale Amplitude zu einer Harmonischen gehört, deren Frequenz außerhalb von vordefinierten Filtergrenzen liegt, wird dann die nächstmögliche maximale Amplitude ausgewählt: die, mit einer niedrigeren zugelassenen Frequenz. Komponenten aus anderen Frequenzbereichen werden gesperrt. Der ausgewählte Filter ist zwischen 15 Hz und 120 Hz für alle Mach-Zahlen festgelegt worden.

Variation der Länge des analysierten Signalabschnitts

Die Länge des analysierten Signalabschnitts (Signalbreite) wird in der Voranalyse von sehr kleinen bis sehr großen Bereichen variiert. Es hat sich gezeigt, dass kleinere Signalbreiten besser als größere sind. Deswegen wird die Signalbreite zwischen dem Zweifachen und dem Fünffachen der erwarteten RI-Periodendauer für jede Mach-Zahl variiert. Diese erwartete RI-Periodendauer wird aus der Umkehr der RI-Frequenzen berechnet, die sich aus den Auto- und Kreuz-Spektren in der Arbeit von WEIDENFELLER (2002) ergeben (siehe Tabelle 6.2). Die Werte für jede Zuströmmachzahl sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Mach-Zahl [-]	Filtergrenze [Hz]	Grenze der Signalbreite [s]	RI-Frequenzen[Hz] WEIDENFELLER (2002)
0,34	15 – 120	0,0408 – 0,1021	49
0,40	15 – 120	0,0322 – 0,0807	62
0,51	15 – 120	0,0266 – 0,0666	75
0,54	15 – 120	0,025 – 0,0625	80

Tabelle 6.3: Die eingesetzten Filtergrenzen sowie die Grenze der analysierten Signalbreite (Variation der Signalbreite) für verschiedene Mach-Zahlen

Sortierung der Ergebnisse nach Phasenlage

Die Endergebnisse des Auswerteverfahrens geben einen Phasenwinkel für jedes PIV-Ereignis aus. Die PIV-Ereignisse werden je nach Phasenlage in Klassen sortiert. Für diese Sortierung läuft eine Aufteilung der Periodendauer in 15°-Schritten ab.

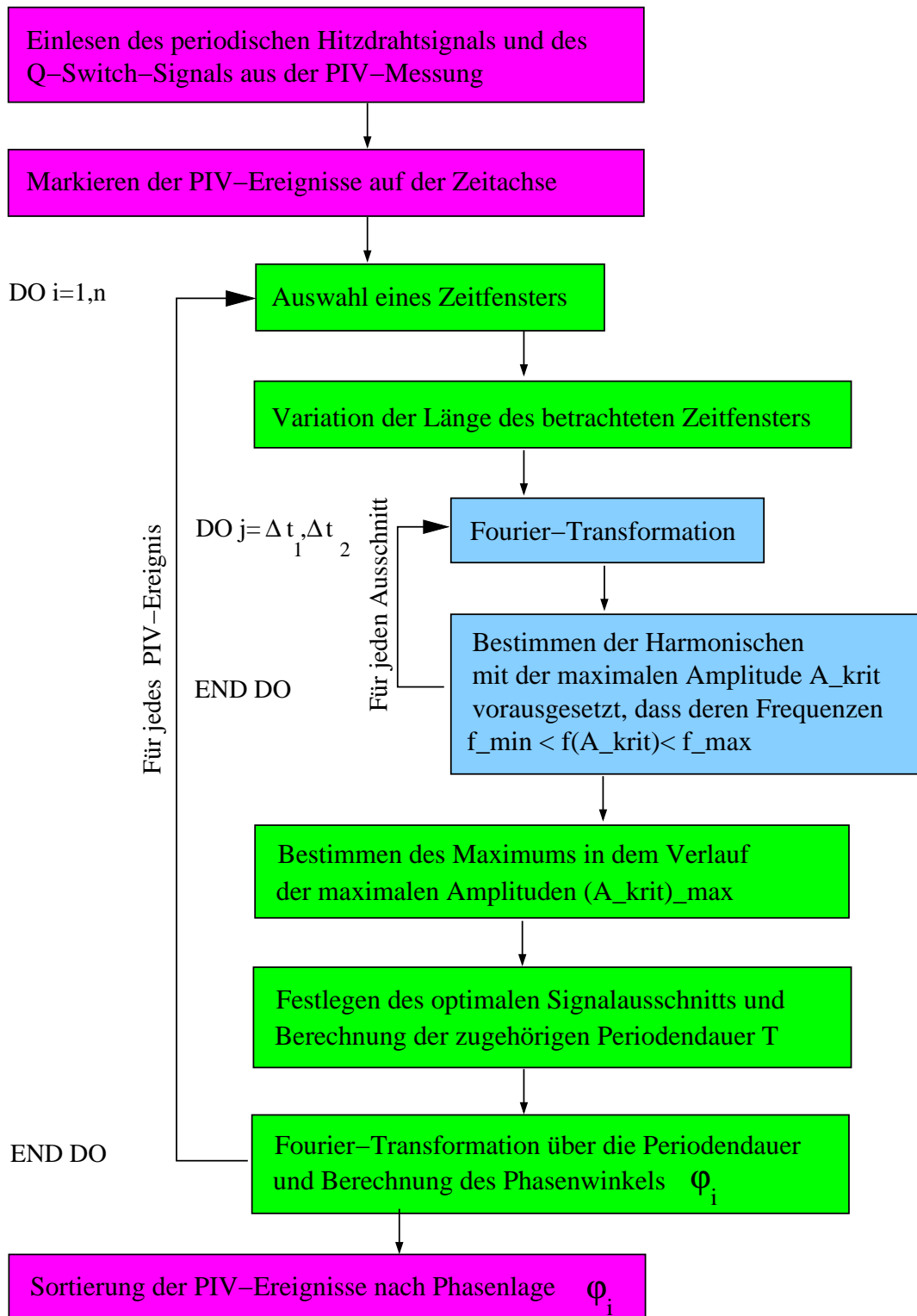


Abbildung 6.11: Flussdiagramm des Auswerteprogramms

Darstellung des maximalen-Amplituden-Verlaufs mit Einsatz des Filters

Abbildung 6.13 zeigt beispielhaft für ein PIV-Ereignis, wie sich der Verlauf der maximalen Amplituden in Abhängigkeit von der Länge des analysierten Signalabschnitts ändert (helle Kurve ohne Filterung). Die festgestellte Frequenz bei dem Drucksensor-KU1 liegt bei 650 Hz . Diese Frequenz ist mit der Frequenz, bei denen die schmalbandigen Amplitudenüberhöhungen für dieselbe Mach-Zahl (643.4 Hz) beobachtet worden sind, zu verbinden (siehe Tabelle 6.1). Der Einsatz der Filterung (dunkle Kurve) zeigt den Verlauf der maximalen Amplituden, deren Frequenzen zwischen 15 Hz und 120 Hz liegen. Hier sind die Ergebnisse von vier axial versetzten Drucksensoren dargestellt, die bei einer Zuströmmachzahl von $Ma = 0,51$ für eine Fehlanströmung von $i = 12^\circ$ im Nabebereich positioniert sind (siehe Abbildung 6.3).

Die RI sind vor dem Gitter zu erwarten. Die Ergebnisse des Drucksensors-KU1 und Drucksensors-KU2, die relativ nah zur Vorderkante liegen, zeigen für die Mach-Zahl $Ma = 0,51$ deutlich drei breitbandige Überhöhungen in den schwarzen Kurven. Der Abstand zwischen den Maxima ist die erwartete RI-Periodendauer bei dieser Mach-Zahl. Hierbei wurde die Signalbreite von Zweifacher bis Fünffacher RI-Periodendauer variiert. Diese Überhöhungen sind weniger ersichtlich in der Abbildung des Drucksensors-KU4 und verschwinden sogar in der Abbildung des Drucksensors-KU6, obwohl das Amplitudenniveau für die ungefilterten Signale dieser beiden Sensoren gestiegen ist.

WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2002) präsentieren einen Vergleich zwischen den relativen Amplituden der axial versetzten Sensoren für unterschiedliche Mach-Zahlen (Abbildung 6.12).

Das relative Amplitudenniveau der Sensoren ist auf das Amplitudenniveau des Drucksensors-KU1 bezogen. WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2002) erklären, dass die Blattfolgefrequenz in diesen verglichenen Niveaus die Drucksignale so beeinflusst, dass die Kurve ein Maximum bei dem Gitteraustritt für die Mach-Zahl $Ma = 0,51$ zeigte. Dagegen zeigt der Drucksensor KU4 in der dritten Darstellung der Abbildung 6.13 das höchste Amplitudenniveau an.

GANNON (2009) hat die gefilterten Rohdaten von Zeitsignalen von drei axial versetzten Drucksensoren (vor dem Gitter, im Gitter und nach dem Gitter) verglichen. Durch eine Isolierung der tieffrequenten Signale mithilfe von Filter-Techniken konnte der Betrag der Instabilitäten berechnet werden. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass sich die

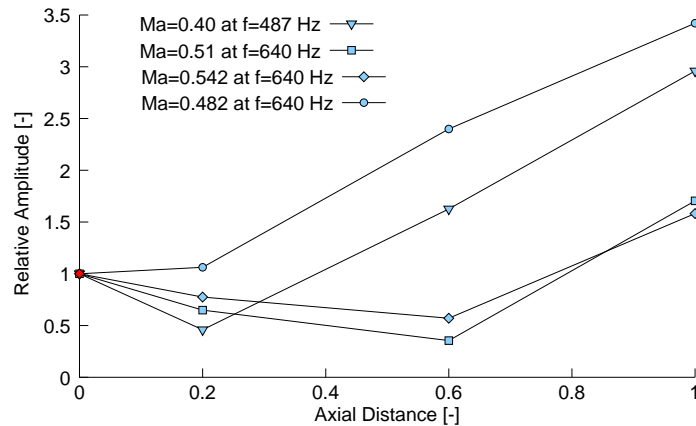


Abbildung 6.12: Die Verteilung der relativen Amplituden von axial versetzten Sensoren in Resonanz (WEIDENFELLER UND LAWERENZ (2002))

ser Betrag aus den im Gitter positionierten Sensoren erhöht und sich als erkennbarer Anteil im Signal der Druckschwankungen analysieren lässt. Entscheidend ist dabei die Reduzierung des Einflusses der Blattfolgefrequenz-Amplitude im Gitter. Der Bereich der maximalen Amplituden wird in der Mitte der Sehnenlänge detektiert. Dieser Bereich enthält den senkrechten Stoß, der auf der Saugseite aufprallt, und die Interaktion zwischen dem Spaltwirbel und dem abgelösten senkrechten Stoß. Die Ergebnisse von GANNON (2009) bezüglich des maximalen Amplitudenniveaus sind mit den hier dargestellten Ergebnissen des Drucksensors KU4 vergleichbar, der bei 60% der Sehnenlänge im Gitter positioniert ist. Dieser Sensor zeigt allerdings breitbandige Amplitudenüberhöhungen an einem anderen PIV-Ereignis (oder Zeitpunkt) für die Mach-Zahlen $Ma = 0,54$.

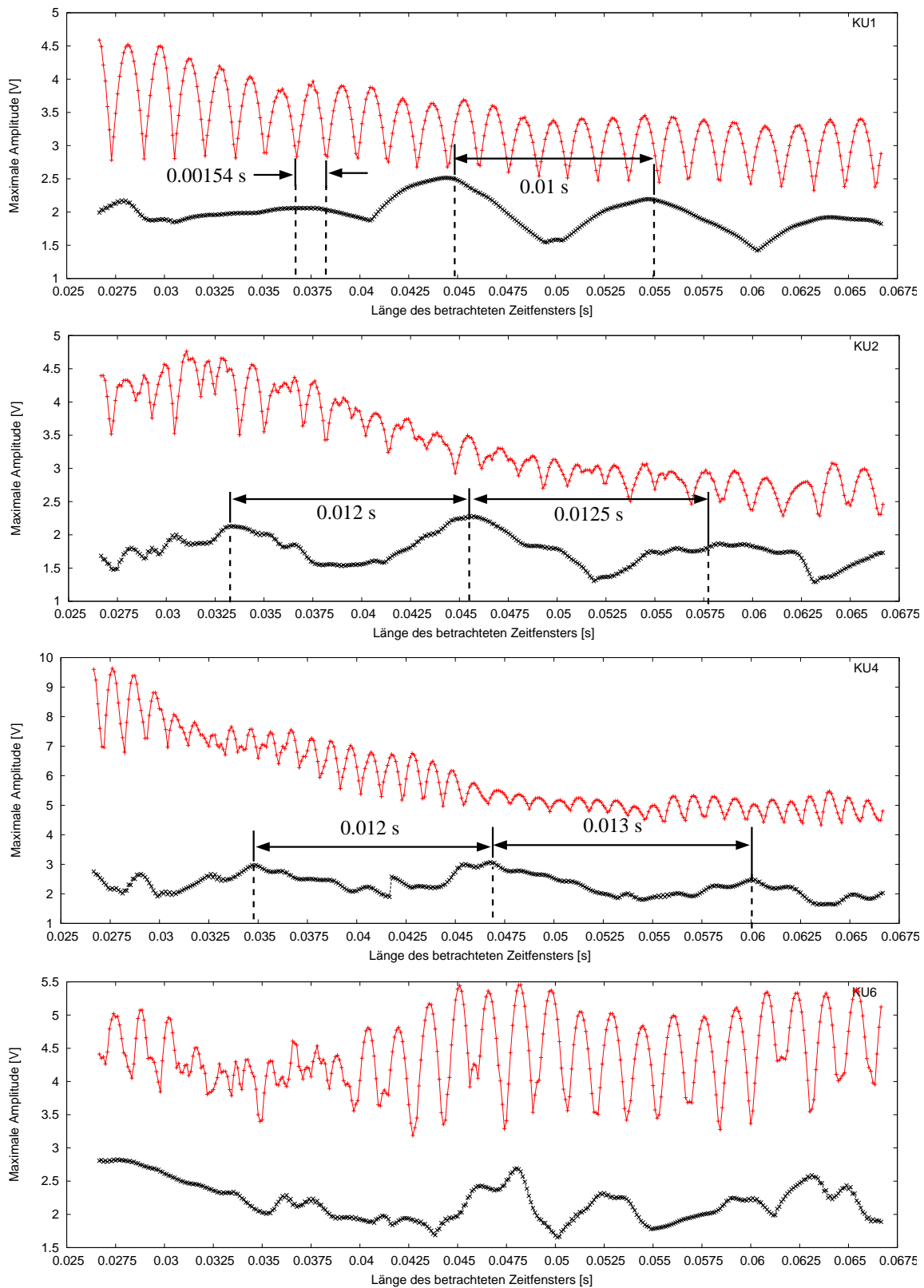


Abbildung 6.13: Der Verlauf der maximalen Amplituden für ein Ereignis mit (schwarze Kurve) und ohne (rote Kurve) Einsatz der Filterung, $Ma = 0,51$, Sensoren sind axial versetzt

7 Analyse der instationären Leitradströmung

7.1 Darstellung der klassifizierten Ergebnisse

Zur Identifizierung der Periodendauer wird als Erstes ein Histogramm für die Frequenzen erstellt, die durch die Analyse des optimalen Signalabschnitts in rundum allen PIV-Ereignissen erfasst worden sind. Das Frequenz-Histogramm stellt die Häufigkeitsverteilung von allen Frequenzen von 15 Hz bis 120 Hz über 105 Klassen dar. Diese Darstellung dient zur Identifizierung der am häufigsten auftretenden Frequenz oder Frequenz-Klassen, um diese mit den Ergebnissen von WEIDENFELLER (2002) bezüglich der RI-Frequenzen zu vergleichen. Diese Frequenz-Klasse wird die KL_{RI} genannt und wird für die weiteren Ergebnisse hervorzuheben sein. Die Frequenz-Histogramme werden in den Abbildungen 7.1 bis 7.4 für vier verschiedene Betriebspunkte dargestellt.

Danach folgt die Darstellung eines Histogramms für die Phasenlagen der PIV-Ereignisse, die zur ausgewählten Frequenz-Klasse KL_{RI} gehören. Alle anderen PIV-Ereignisse werden weggelassen, da sie für die Auswertung der PIV-Bilder nicht die RI erfassen. Das Phasenwinkel-Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Phasenlagen über 24 Klassen entlang einer gesamten Periode.

7.1.1 Aufbau 1: axial versetzte Sensoren

Darstellung der Frequenz-Histogramme

Die Histogramme in der Abbildung 7.1 zeigen die Anzahl der analysierten Zeitpunkte (PIV-Ereignisse), in denen die FFT die maximale Amplitude zu der entlang der Abszisse aufgetragenen Frequenz geführt hat. Dabei wurden nur Frequenzen zwischen den angegebenen unteren und oberen Grenzen berücksichtigt.

Getrennt, hinsichtlich der Anordnung der Sensoren, folgt zunächst anhand von Häufigkeitsverteilungen die Darstellung jener Frequenzen, die zu den maximalen Amplituden in den jeweils untersuchten Fenstern entlang der Zeitachse geführt haben. Dabei wird sichtbar, dass in nahezu allen Histogrammen deutliche Überhöhungen bei einzelnen Frequenzen auftreten, die in Verbindung mit einer Grundfrequenz stehen. Wie die Abbildung 7.1 zeigt, liegen bei der Mach-Zahl 0,34 die ausgezeichneten Frequenzen bei etwa 24, 49 und 76 Hz. Diese Frequenzen entsprechen den RI-Frequenzen, erhalten aus den Kreuz- und Auto-Spektren in der Arbeit von WEIDENFELLER (2002) (siehe Tabelle 6.2). Mit einer Zunahme der Mach-Zahl steigen auch diese Frequenzen an (Abbildungen 7.2 bis 7.4). Die Tatsache, dass die RI-Frequenzen von den Betriebsbedingungen der Maschine abhängig sind, wird von KAMEIER ET AL. (2000) bestätigt. Wie die Ergebnisse der akustischen Untersuchungen der Messstrecke zeigen, handelt es sich bei der Frequenz $f = 24 \text{ Hz}$ um eine Eigenform des Prüfstands.

In den hier dargestellten Frequenz-Histogrammen haben zusätzlich andere Frequenzen als die RI-Frequenz signifikante Häufigkeiten. Für die Mach-Zahl $Ma = 0,34$ sind bei $f = 74 \text{ Hz}$ und in etwa $f = 100 \text{ Hz}$ Effekte festgestellt worden (für die Mach-Zahl $Ma = 0,4$ bei $f = 94 \text{ Hz}$, für $Ma = 0,51$ bei $f = 114 \text{ Hz}$). Für die Mach-Zahl $Ma = 0,54$ ist keine zusätzliche Frequenz zu identifizieren, da die vermutete Frequenz (bei $f = 121 \text{ Hz}$) aus der oberen Filtergrenze herausragt.

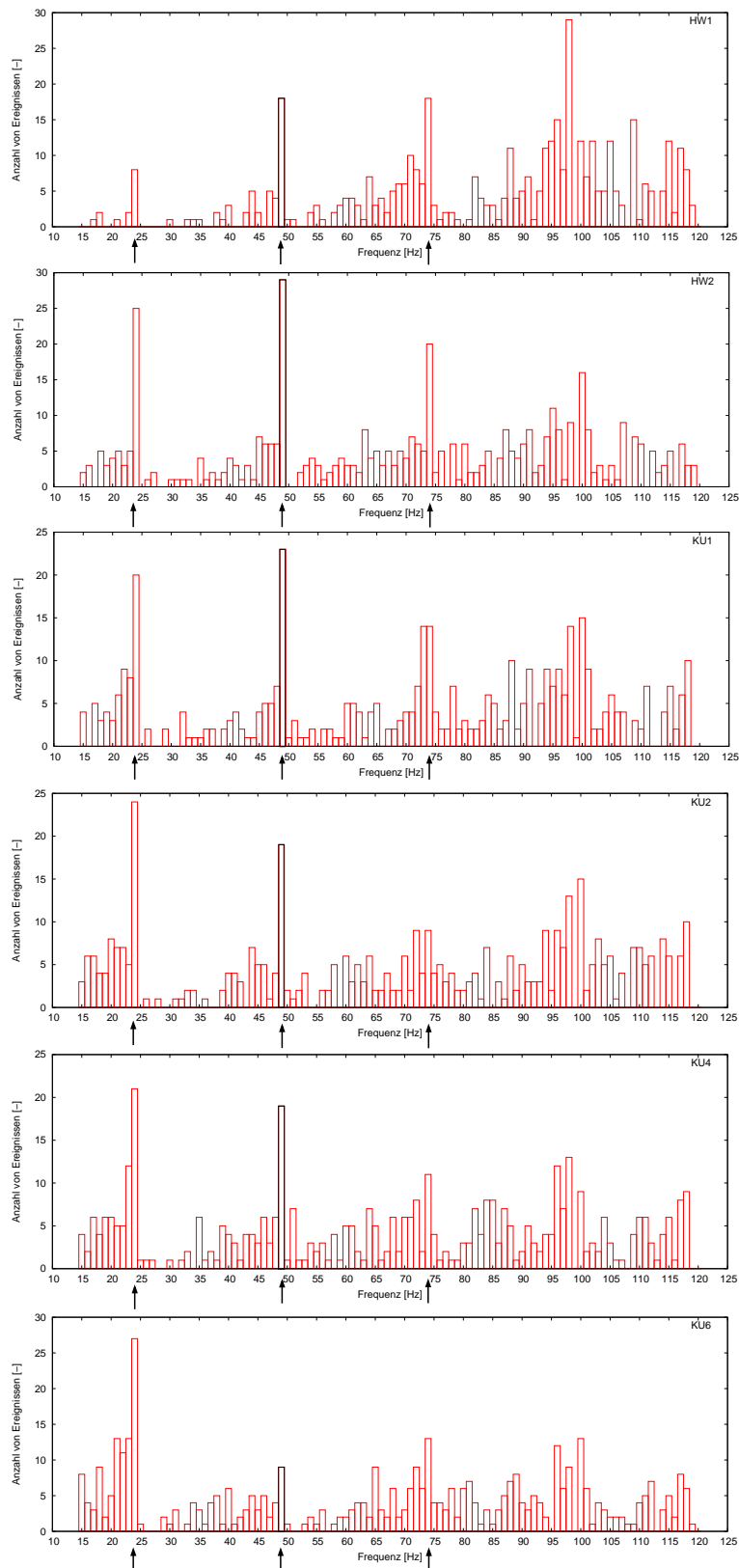


Abbildung 7.1: Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen für alle Ereignisse aus der Analyse von verschiedenen axial versetzten Drucksensoren und von dem am Gittereintritt positionierten X-Draht, Mach-Zahl $Ma = 0,34$

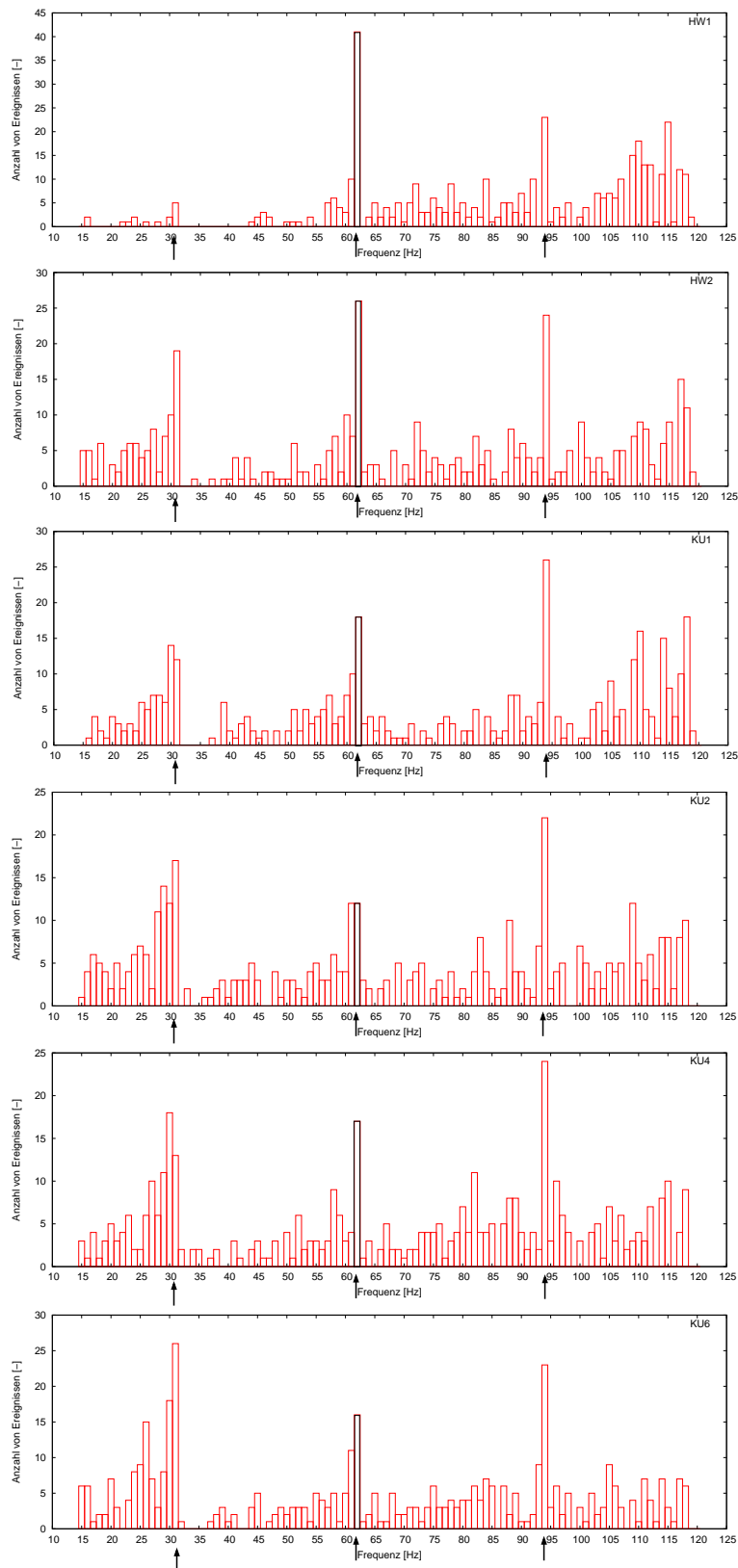


Abbildung 7.2: Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen für alle Ereignisse aus der Analyse von verschiedenen axial versetzten Drucksensoren und von dem am Gittereintritt positionierten X-Draht, Mach-Zahl $Ma = 0,4$

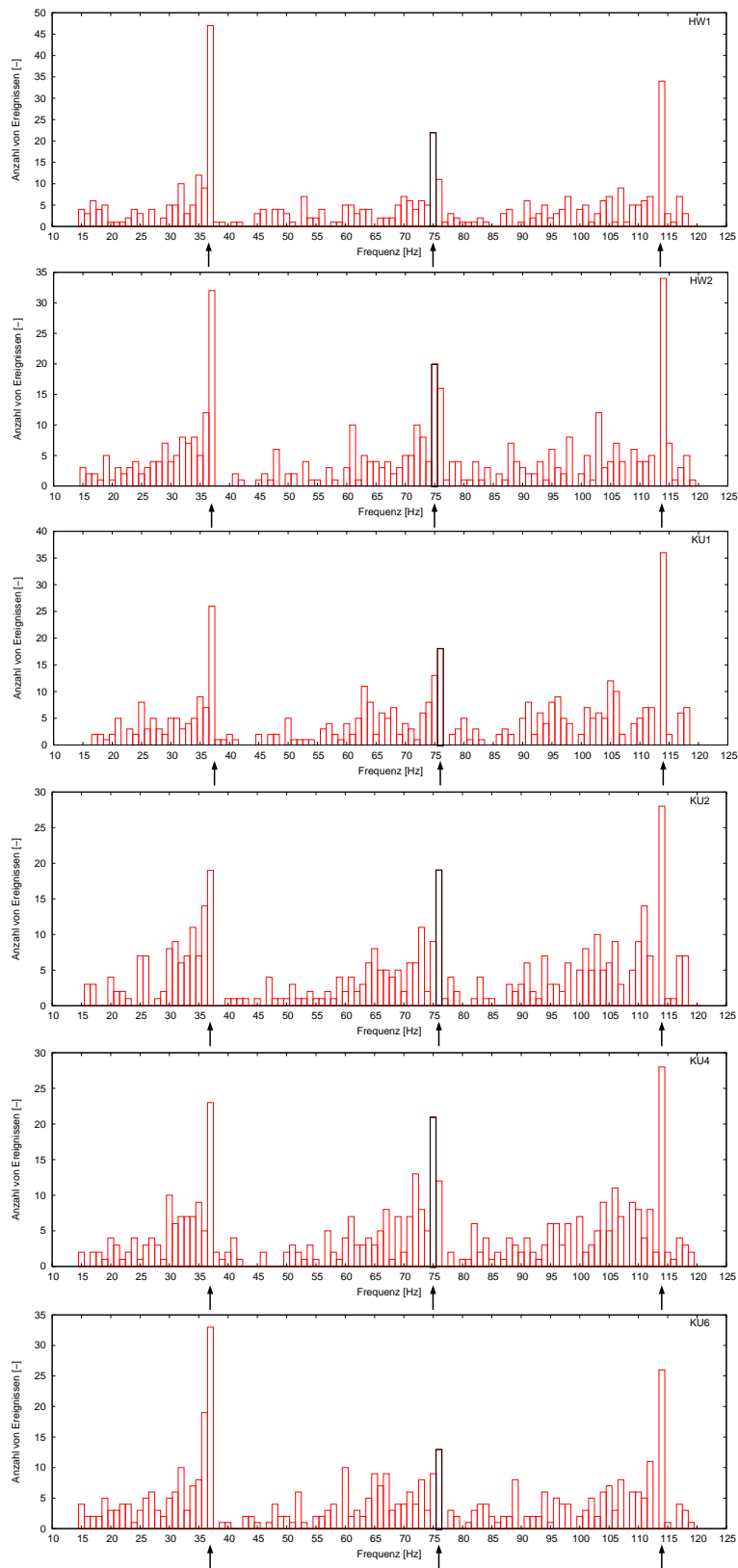


Abbildung 7.3: Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen für alle Ereignisse aus der Analyse von verschiedenen axial versetzten Drucksensoren und von dem am Gittereintritt positionierten X-Draht, Mach-Zahl $Ma = 0,51$.

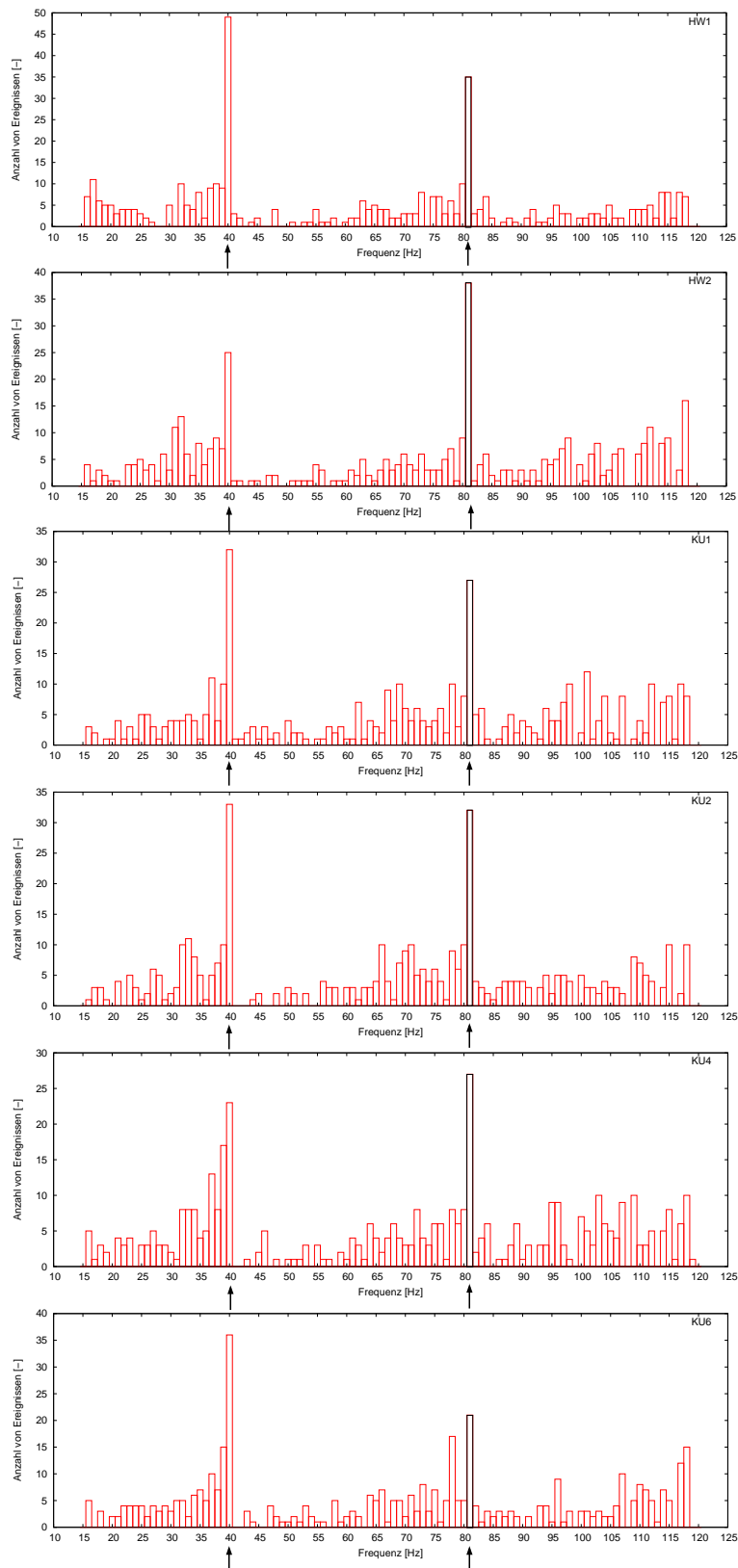


Abbildung 7.4: Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen für alle Ereignisse aus der Analyse von verschiedenen axial versetzten Drucksensoren und von dem am Gittereintritt positionierten X-Draht, Mach-Zahl $Ma = 0,54$

Darstellung der Phasenwinkel-Histogramme

Die Abbildung 7.5 zeigt die Phasenwinkel-Histogramme beispielsweise für eine Zuströmmachzahl, und zwar an unterschiedlichen Messpositionen. Dabei werden nur die PIV-Ereignisse berücksichtigt, deren jeweilige zugehörige Frequenzen der berechneten RI-Frequenz $\pm 5 \text{ Hz}$ entsprechen. Diese PIV-Ereignisse werden Erfolgsereignisse genannt.

Für eine aussagekräftige PIV-Auswertung sind mindestens 25 Bilder pro Wirbelposition in einer Bilderreihe für die Mittelung notwendig. Eine Periode wird in 24 Schritten diskretisiert. Dies liefert einen Phasenunterschied von 15° zwischen einzelnen Stellungen des RI-Wirbels.

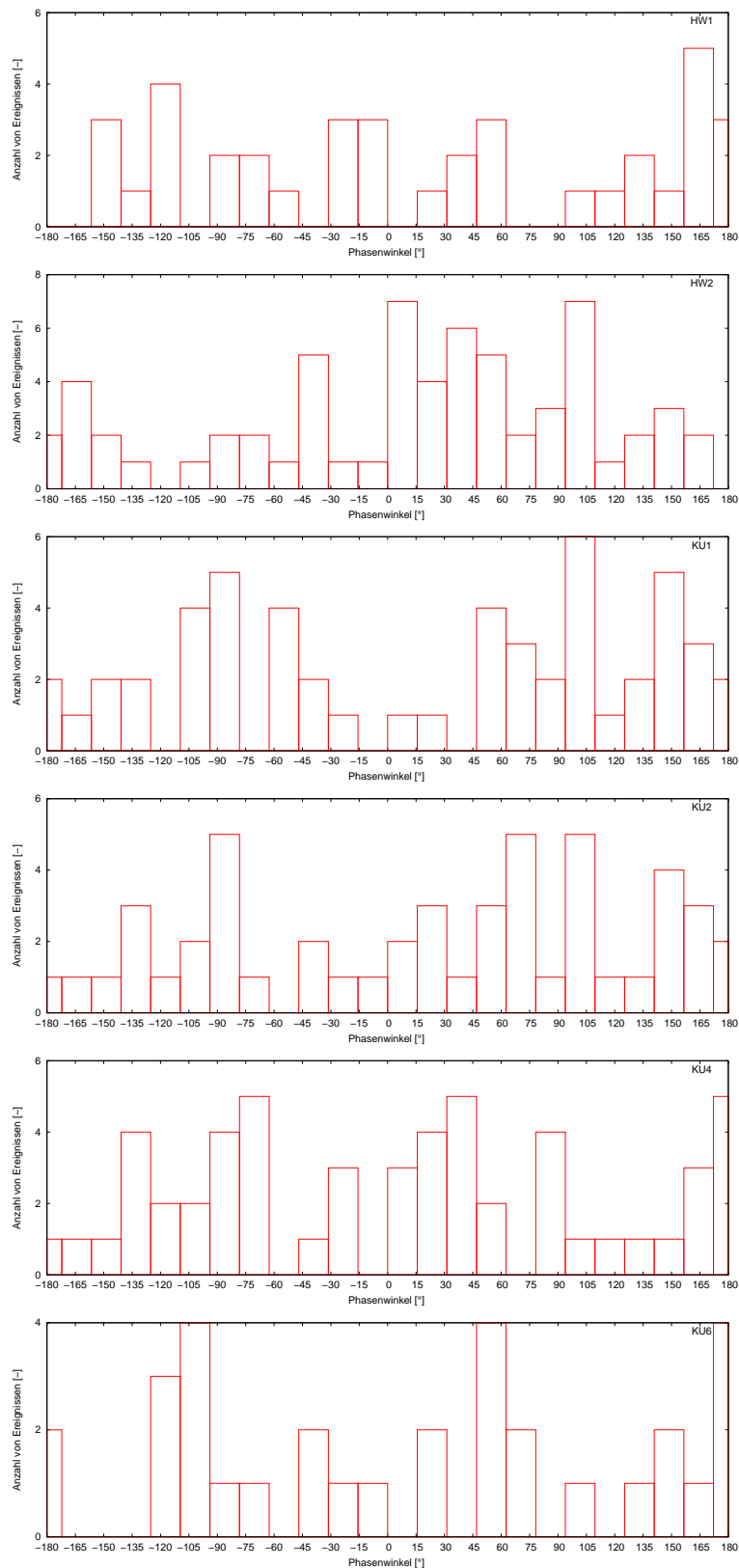


Abbildung 7.5: Der Häufigkeitsverteilung der Phaselagen aller PIV-Ereignisse aus der Analyse von verschiedenen axial versetzten Drucksensoren und einer X-Drahtsonde am Gittereintritt positioniert: betrachtete Frequenz $44 \text{ Hz} < f < 54 \text{ Hz}$, Mach-Zahl $Ma = 0,34$

7.1.2 Aufbau 2: In Umfangsrichtung angeordnete Sensoren

Darstellung der Frequenz- und der Phasenwinkel-Histogramme

Für die Mach-Zahlen $Ma = 0,51$ und $Ma = 0,54$ werden die Frequenz- und die Phasenwinkel-Histogramme an den radial versetzten Drucksensoren KU2 und KU3 im Gittereintritt dargestellt. Die Histogramme in der Abbildung 7.6 zeigen auf der Abszisse die Frequenzen des Filters an. Die y-Achse zeigt, wie viele PIV-Ereignisse sich in einzelnen Frequenz-Klassen ergeben. In der Abbildung 7.6 zeigen die Drucksensoren KU2 und KU3 am häufigsten die Frequenzen $f = 40 \text{ Hz}$ und $f = 81 \text{ Hz}$ für die Zuströmmachzahl $Ma = 0,54$. Diese Ergebnisse zeigen analog zu den axial versetzten Sensoren die signifikanten Peaks bei der erwarteten RI-Frequenz für eine Fehlanströmung von $i = 12^\circ$.

Die Abbildungen 7.7 zeigen die Phasenwinkel-Histogramme für beide Zuströmmachzahlen an den Drucksensoren KU2 und KU3. Dabei werden nur die Erfolgsereignisse dargestellt.

Die in Aufbau 1 beobachteten künstlichen Häufungen, bedingt durch Fenstergröße, werden auch in Aufbau 2 sichtbar.

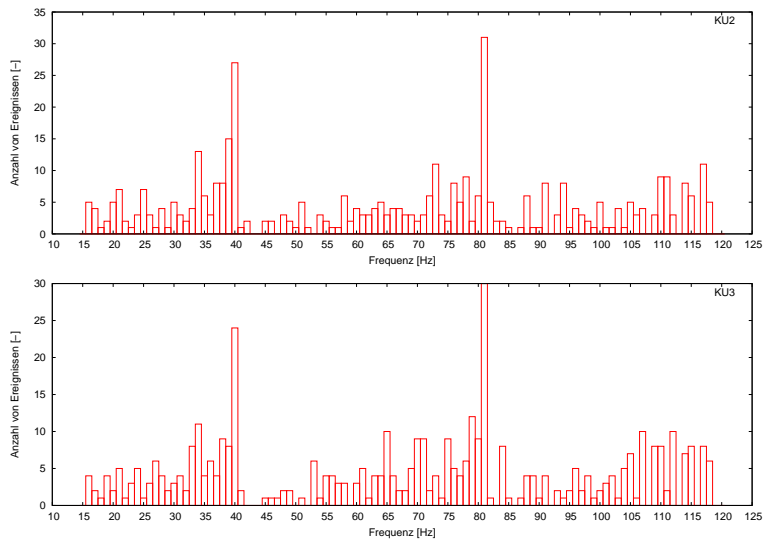


Abbildung 7.6: Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen einzelner Ereignisse aus der Analyse von zwei radial versetzten Drucksensoren, Mach-Zahl $Ma = 0,54$

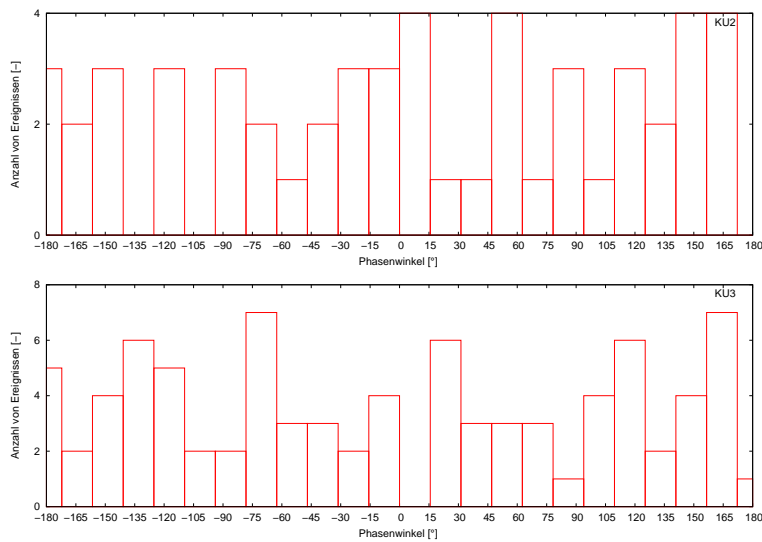


Abbildung 7.7: Die Häufigkeitsverteilung der Phaselagen aller PIV-Ereignisse aus der Analyse von zwei radial versetzten Drucksensoren am Gittereintritt positioniert: betrachtete Frequenz $75 \text{ Hz} < f < 85 \text{ Hz}$, Mach-Zahl $Ma = 0,54$

7.2 Diskussion der Ergebnisse

In den bis jetzt dargestellten Ergebnissen der Analyse wird sichtbar, dass in nahezu allen Histogrammen deutliche Überhöhungen bei einzelnen Frequenzen auftreten, die in Verbindung mit einer Grundfrequenz stehen. In Abbildung 7.1 wird gezeigt, dass bei der Mach-Zahl 0,34 die ausgezeichneten Frequenzen bei etwa 24, 49 und 76 Hz liegen. Mit einer Zunahme der Mach-Zahl steigen auch diese Frequenzen an. Dieses Ergebnis wird mit Rotierenden Instabilitäten verbunden, da diese auch in ähnlicher Form in den von WEIDENFELLER (2002) ermittelten Kreuz- und Autospektren zu finden sind. Weitergehende Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass diese Häufung auch durch die Wahl der Zeitfenster-Größe erheblich beeinflusst wird, wenn, anders als bei der Karmanschen Wirbelstraße, nicht nur eine dominante Frequenz den Signalverlauf bestimmt. Durch geeignete Fensterfunktionen besteht die Möglichkeit, diesen Effekt erheblich zu reduzieren. Im Folgenden wird der Einfluss der Zeitfenster-Größe auf das Auswerteverfahren erklärt und danach wird versucht eine Lösung zu finden, um diesen Einfluss zu vermeiden.

Problematik

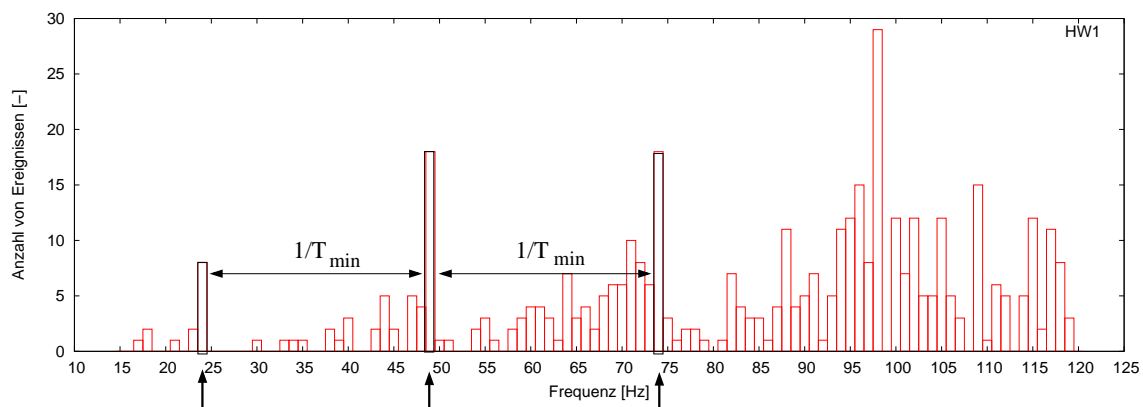


Abbildung 7.8: Die äquidistanten Abstände zwischen Peaks. Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Frequenzen für Hitzdraht 1, Mach-Zahl $Ma = 0,34$.

Das Kriterium zur Wahl des Auswertefensters ist die maximale Amplitude, wie in Kapitel 4.3 beschrieben ist. Für Messsignale, die eine dominante Frequenz besitzen, beispielsweise die Karmansche Wirbelstraße, funktioniert dieses Verfahren ohne Probleme.

Das zugehörige Histogramm zeigt Abbildung 5.6. Da im Fall der Karmanschen Wirbelstraße das Frequenzband sehr schmal ist, werden in der weiteren Auswertung alle PIV-Messungen benutzt. In den Histogrammen der Messungen am Ringgitterwindkanal sind deutlich regelmäßig auftretende Peaks zu erkennen (siehe Abbildungen 7.1 bis 7.4). Allerdings ist die Lage der Peaks von den Grenzen der Fensterbreitenvariation abhängig.

Die genauere Analyse der Frequenzen zeigt, unabhängig vom betrachteten Messsignal, einen äquidistanten Abstand zwischen den auftretenden Peaks. Dieser Abstand entspricht immer der Frequenz des kleinsten Zeitfensters f_{min} , sprich $f_{min} = 24 \text{ Hz}$ in der dargestellten Abbildung 7.8 (unabhängig von Messposition und Machzahl). Diese Feststellung verdeutlicht, dass die Festlegung des minimalen Zeitfensters die resultierenden Ergebnisse des Histogramms beeinflusst.

Diese künstlich bedingte Häufigkeit in den Histogrammen ist eine Konsequenz der diskreten Darstellung der Frequenzen, nämlich der Grundfrequenz und ihrer Harmonischen. Dies bedeutet, dass die im Messsignal existierenden Frequenzanteile, die zwischen diesen diskreten Frequenzen liegen, nicht erfasst werden können, da sie nicht ein Vielfaches der Grundfrequenz sind. Je größer die Fensterbreite gewählt wird, umso feiner wird der Abstand der diskreten Frequenzen innerhalb der Fourier-Analyse. Dies bedeutet, dass die im Messsignal existierenden Frequenzanteile, die zwischen diesen diskreten Frequenzen liegen, nicht erfasst werden. Stattdessen erhöhen sich die Amplituden der diskreten Frequenzen.

Das Problem liegt also bei der falschen Festlegung der maximalen Amplituden aufgrund schlechter spektraler Auflösung. Eine gute spektrale Auflösung ist eine möglichst hohe Auflösung der FFT im Frequenzbereich, die durch eine Vergrößerung des Zeitfensters erreicht werden kann.

Lösung

Eine häufig verwendete Möglichkeit zur Erhöhung der spektralen Auflösung bei gleichzeitig guter zeitlicher Auflösung ist das sogenannte Zero-Padding (FISCHER ET AL. (2009)). Dabei wird an die zu analysierenden Messwerte einfach eine beliebige Anzahl an Nullen angehängt, um das analysierte Fenster künstlich zu vergrößern. Die FFT-Analyse liefert dann eine hohe spektrale Auflösung trotz geringer Zeitfenster-Größe der Messwerte. Dabei werden so viele Nullen angehängt, dass die Grundschiwingung des Fensters auf 1 Hz

reduziert wird.

Neben der positiven Eigenschaft des Zero-Paddings, die spektrale Lage der Peaks besser auflösen zu können, ist es sehr wichtig sich deutlich zu machen, dass dies nicht mit einer höheren Auflösung einzelner benachbarter Frequenzen verbunden ist. Wichtig ist es festzuhalten, dass das Zero-Padding nur die Genauigkeit der spektralen Lage gefundener Amplitudenpeaks erhöht. Die spektrale Auflösung der einzelnen dominierenden Signalcomponenten kann jedoch nur über eine Vergrößerung des Zeitfensters des Messsignals erzielt werden.

Zusätzlich ist es wichtig zu erwähnen, dass die Amplitude des Peaks durch das Zero-Padding stark abnimmt. Dieser Effekt liegt daran, dass die Amplitude der realen Messdaten durch die FFT-Analyse auf die gesamte Zeitfenster-Größe inklusive angehängter Nullen verteilt wird, sodass zur quantitativ richtigen Bestimmung der Amplitude durch die FFT der Wert nachträglich korrigiert werden muss.

7.3 Bewertung des Analyseverfahrens

Durch den geringeren instrumentellen Aufwand und die einfache Signalverarbeitung bietet die Auswertemethode Vorteile gegenüber anderen etablierten Verfahren, wie zum Beispiel der teureren instationären PIV-Techniken (z. B. TR-PIV) oder den Analysen auf der Basis der Kreuz- oder der Autospektraldichtefunktion, durch ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten. In der Arbeit von UHLMANN (2003) ist festgestellt worden, dass der zweidimensionale Wavelet-Transformation-Algorithmus ähnliche Ergebnisse liefert wie das Analyseverfahren nach Tryfonidis-Algorithmus, das ebenfalls auf einer räumlichen Fourier-Transformation eines Sensorfeldes in einer Verdichterebene beruht. Die Analyse instationärer Phänomene anhand des Einsatzes der Fourier-Transformation in der Signalverarbeitung eröffnet die Möglichkeit einer industriellen Anwendung einer relativ günstigen Messtechnik im Bereich der Turbomaschinen. Das Verfahren eignet sich auch als Basis-Untersuchung von selbsterregten Phänomenen in vielen Bereichen mit gering zu haltenden Kosten. Zur Kontrolle wurde das Verfahren auf ein reines Sinus-Signal mit einer definierten Frequenz angewandt. Eine Störfunktion, die auf das Sinus-Signal addiert wurde, gibt Hinweise auf die Grenzen des Verfahrens.

Die in dieser Arbeit dargestellt Auswertemethode kann, verglichen mit anderen Metho-

den ähnlicher Zwecke, als eine einfache Methode und eine Elementaranalyse bewertet werden. Die erste vergleichbare Methode ist die von TRYFONIDIS ET AL. (1995), die für die Erkennung umlaufender Strömungen im Verdichtergitter wie z. B. *Spikes* oder Modalwellen ausgelegt wurde. Diese basiert auf einer räumlichen Fourier-Transformation eines Sensorfeldes in einer Verdichterebene. Dafür werden mindestens drei Sensoren, platziert in der Umfangsrichtung, benötigt, um die Harmonischen der umlaufenden Strömung analysieren zu können. Die Ergebnisse nach TRYFONIDIS ET AL. (1995) sind jedoch nur punktuelle Messwerte während die hier behandelte Auswertemethode ein gesamtes Strömungsfeld vermisst. Beide Methoden können sich deswegen ergänzen.

Die zweite Methode ist die Methode von UHLMANN (2003), die auf der Wavelet-Transformation der Signale von zwei am Umfang platzierten Drucksensoren basiert. Diese beiden Verfahren bleiben allerdings in der Kategorie der punktuellen Messungen des Strömungsfeldes und damit im Vergleich zur PIV-Technik hinter der Erwartung, eine Feldmessung durchzuführen, zurück. Die dritte Methode ist das Verfahren, dargestellt in der Arbeit FISCHER ET AL. (2009). Das Verfahren ist empirisch und basiert auf der Hilbert-Huang-Transformation (HHT) von akustischen Signalen. Es werden aus experimentellen Untersuchungen abgeleitete Zusammenhänge in dem Analyseverfahren genutzt. Bei dem Auswerteverfahren wurde ein „festes“ Fenster mit gleicher *Sample*-Länge um jedes PIV-Ereignis analysiert. Dieser Algorithmus ist prinzipiell begrenzt und das Einstellen des gewünschten Frequenzbereiches mit dem ausgewählten Filter für höhere Frequenzen wird immer schwieriger. Der Grund für diese Schwierigkeit mit höheren Frequenzen liegt daran, dass bei gleicher *Samplingrate* die Anzahl von *Samples* pro Periode immer geringer wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden der Einsatz der PIV-Messtechnik und das dafür notwendige Auswerteverfahren zur Analyse selbsterregter Strömungsphänomene beschrieben. Zur Untersuchung der Mechanismen an einem ringförmigen Verdichter-Leitrad werden dazu Datensätze benutzt, die bei hohen aerodynamischen Belastungen des Leitrads in früheren Experimenten gewonnen wurden.

Die hier dargestellten Mess- und Auswertemethoden dienen zur Vermessung der Wirbelwanderung ohne externes Trigger-Signal mittels der PIV-Messtechnik. Die gleichzeitige Vermessung der selbsterregten Phänomene anhand der Hitzdrahtanemometrie ermöglicht, die PIV-Bilder hinsichtlich des Wirbelortes nachzusortieren. Um die Funktionalität der hier 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.

Der Algorithmus beginnt mit der Festlegung eines Fensters, zentriert um die PIV-Ereignisse, das groß gewählt wird. Der ausgewählte Bereich um die PIV-Messung enthält damit nicht von vorneherein ein ganzzahliges Vielfaches der Periode und die anschließende FFT-Analyse weist Artefakte auf. Das richtige Zeitfenster wird so ermittelt, dass eine sukzessive Verkleinerung des analysierten Signalabschnitts vorgenommen wird. Es wird gezeigt, wie die aus der FFT-Analyse hervorgegangene maximale Amplitude von der Fenstergröße abhängig ist. Ein zyklischer Verlauf ist dabei typisch. Das lokale Maximum gehört zu einem Zeitfenster, das mit hoher Wahrscheinlichkeit gerade ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer abdeckt. Als optimales Fenster wird dasjenige mit dem Maximalwert ausgewählt. Mit der Festlegung des Zeitfensters kann dann die PIV-Aufnahme einem Phasenwinkel zugeordnet werden und es ergibt sich ebenfalls die Periodendauer. Die einzelnen PIV-Aufnahmen wurden entsprechend ihrer Phasenlage verschiedenen Klassen zugeordnet. Die sich aus den PIV-Bildern einer Klasse ergebenden Geschwin-

digkeitskomponenten werden anschließend gemittelt. Auf diese Weise gelingt es, den im Vergleich zur Bildwiederholungsrate des PIV-Systems hochfrequenten Prozess der Wirbelablösung zu erfassen. Aus den resultierenden Bildern jeder Klasse wird eine Animation erstellt, in der die Wirbelwanderung der Karmanschen Wirbelstraße ersichtlich wird.

Der Algorithmus wird dann angepasst - und zwar für die Anwendung der Verdichter-Messdaten, um die darin „überlagerten“ selbsterregten Strömungsphänomene zu untersuchen. Eine Filterung der Daten erfolgt an dieser Stelle, weil die Maximum-Position im maximalen Amplituden-Verlauf zu den hochfrequenten Phänomenen gehört. Der benutzte Tiefpassfilter sorgt dafür, dass Frequenzen innerhalb eines bestimmten Intervalls durch den Filter durchgelassen werden können und Komponenten aus anderen Frequenzbereichen gesperrt werden. Es wird mit dem neu entwickelten Auswerteverfahren eine Möglichkeit geschaffen, die generierten PIV-Ereignisse einer Phasenlage gegenüber dem Hitzdraht- sowie dem Drucksignal zuzuordnen. Die Übertragung der Methode auf die Signale im Verdichter-Leitrad gelingt damit und die dort geplanten Messungen mit der PIV-Technik gestatten Aufschlüsse über selbsterregte Strömungsphänomene.

Darüber hinaus wird auch gezeigt, dass dieses Verfahren sowohl für niedrige als auch für höhere Frequenzen Anwendung findet, da die benutzten Filtergrenzen je nach analysierten Frequenzen variiert werden können. In dem Algorithmus können daher die abgetasteten Messwerte in einer Periode nicht beeinflusst werden, wenn die breiten Zeitfenster analysiert werden. Ein wichtiger Aspekt ist die maximal erreichbare Aufteilung der Periodendauer, die theoretisch mit einer sehr kleineren Phasenwinkel-Auflösung ($< 1^\circ$) erreicht werden kann. Das Auswerteverfahren bietet damit eine Möglichkeit für weiterführende PIV-Untersuchungen zur Erprobung von Maßnahmen, die dazu dienen, die Rotierenden Instabilitäten sowie deren Wechselwirkung mit der Gittergeometrie näher zu untersuchen und bildlich darzustellen.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag, zur Visualisierung von selbsterregten Instabilitätsphänomenen in Axialverdichtern wie z. B. den rotierenden Instabilitäten, deren physikalische Ursachen bislang noch nicht hinreichend genau bekannt sind. Im Hinblick auf eine weitere Arbeit stehen die PIV-Messungen am Verdichter-Leitgitter im Vordergrund. Zur *Spikes*-Erkennung mittels des Algorithmus muss die Aufzeichnung des Signals rechtzeitig vor dem Auftreten von RI und nicht danach anfangen. Die Untersuchungen der RI können zusätzlich mit dem vorhandenen Stereo-PIV-System durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- BABOVSKY, H., T. BETH, H. NEUNZERT UND M. SCHULZ-REESE (1987). *Mathematische Methoden in der Systemtheorie: Fourieranalysis*. B. G. Teubner Stuttgart.
- BAE, J., K. S. BREUER UND C. S. TAN (2004). Periodic unsteadiness in compressor Tip Clearance Vortex. In *In Proceedings of the ASME Turbo Expo, GT2004-53015*.
- BAE, J., K. S. BREUER UND C. S. TAN (2005). Active Control of Tip Clearance Flow in Axial Compressors. *Journal of Turbomachinery*, 127(2):352–362.
- BALZANI, N., F. SCARANO, M. L. RIETHMÜLLER UND F. A. E. BREUGELMANS (2000). Experimental Investigation of the Blade-To-Blade Flow in a Compressor Rotor by Digital Particle Image Velocimetry. In *In Proceedings of the ASME Turbo Expo, 2000-GT-55*.
- BAUMGARTNER, M., F. KAMEIER UND J. HOURMOUZADIS (1995). Non-Engine Order Blade Vibration in a High Pressure Compressor. In *12th International Symposium on Airbreathing Engines, Melbourne, Australia*, Seiten 1019–1030.
- BENDAT, JULIUS S. UND ALLAN G. PIERSOL (1980). *Engineering Application and Spectral Analysis*. Wiley-Interscience.
- BERGER, E. (1964). Die Bestimmung der hydrodynamischen Größen einer Karmanschen Wirbelstraße aus Hitzdrahtmessungen bei kleinen Reynoldsschen Zahlen. *Zeitschrift für Flugwissenschaften*, 12(2):41–59.
- BÖSWIRTH, LEOPOLD (2007). *Technische Strömungslehre*. Viewegs Fachbücher der Technik Verlag.
- BRÄUNLING, WILLY J.G. (2009). *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. Springer Verlag.

- BREDE, M. (2004). Measurement of turbulence production in the cylinder separated shear-layer using-triggered Laser-Doppler anemometry. *Experiments in Fluids*, 36:860–866.
- BRUUN, H. H. (1995). *Hot-Wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. Oxford Science Publications.
- BUTZ, TILMAN (2000). *Fouriertransformation für Fußgänger*. B. G. Teubner Stuttgart. Leipzig, zweite Auflage.
- CAMP, T. R. (1999). A Study of Acoustic Resonance in a Low-Speed Multistage Compressor. *Journal of Turbomachinery*, 121(1):36–43.
- CAMP, T. R. UND I. J. DAY (1998). A Study of Spike and Modal Stall Phenomena in a Low-Speed Axial Compressor. *Journal of Turbomachinery*, 120(7):393–401.
- CAMUSSI, R. (2002). Coherent structures identification from Wavelet analysis of PIV bidimensional velocity fields. *Experiments in Fluids*, 32:76–86.
- CHEVALIER, H. (1973). Flight Test Study of the Formation and Dissipation of Trailing Vortices. *Journal of Aircraft*, 10(1).
- CHOW, YI-CHICH, OGUZ UZOL, JOSEPH KATZ UND CHARLES MENEVEAU (2003). Experimental study of the structure of rotor wake in a complex turbomachinery flow. In *4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference*.
- COOPER, A. J., A. B. PARRY UND N. PEAKE (2004). Acoustic Resonance in Aero-engine Intake Ducts. *Journal of Turbomachinery*, (126):432–441.
- CUMPSTY, N. A. (2004). *Compressor Aerodynamics*. Krieger Publishing Company.
- DANTEC (1998). Constant Temperature Anemometer – Equipment Catalogue.
- DAY, I. J. (1993). Stall Inception in Axial Flow Compressors. *Journal of Turbomachinery*, 115(1):1–9.
- DAY, I. J., T. BREUER, J. ESCURET, M. CHERRETT UND A. WILSON (1999). Stall Inception and the Prospects for Active Control in Four High-Speed Compressors. *Journal of Turbomachinery*, 121(1):18–27.
- DEPPE, A., H. SAATHOFF UND U. STARK (2006). Spike-type stall inception in axial Compressors. *Proc. 6th Eur. Conf. Turbomach., Lille, France*, Seiten 178–88.

- EL AKOURY, R., M. BRAZA, R. PERRIN, G. HARRAN UND Y. HOARAU (2008). The three-dimensional transition in the flow around a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 607.
- EMMONS, H. W., C. E. PEARSON UND H. P. GRANT (1955). Compressor Surge and Stall Propagation. *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 77(5).
- 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.
- ESTEVALDORAL, JORDI, STEVEN E. GORRELL UND WILLIAM W. COPENHAVER (2007). PIV Study of Wake-Rotor Interactions in a transonic Compressor at Various Operating Conditions. *AIAA Journal of Propulsion and Power*, 23(1).
- FERREIRA, C. S., G. VAN KUIK, G. VAN BUSSEL UND F. SCARANO (2009). Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. *Experiments in Fluids*, 46:97–108.
- FISCHER, A., F. BAKE, J. HEINZE, O. DIERS, C. WILLERT UND I. RÖHLE (2009). Off-line phase-averaged particle image velocimetry and OH chemiluminescence measurements using acoustic time series. *Measurement Science and Technology*, 20.
- FOTTNER, L. (1993). Advanced Methods for Cascade Testing. *Advisory Group for Aerospace Research and Development AGARD*, AG-328.
- GANNON, A. J. (2009). Pre-Stall Instability Distribution Over a Transonic Compressor Rotor. *Journal of Fluid Engineering*, 131.
- GLIEBE, P. R. (1993). Aeroacoustics in Turbomachines and Propellers – Future Research Needs. In H. M. Atassi, Herausgeber, *Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics, and Aeroelasticity of Turbomachines and Propellers*. Springer Verlag.
- GREITZER, E. M. (1980). Review – Axial Compressor Stall Phenomena. *Journal of Fluid Engineering*, 102:134–151.
- GREITZER, E. M. UND F. K. MOORE (1986). A Theory of Post-Stall Transients in Axial Compression Systems: Part II - Application. *ASME Journal of Engineering for Gas turbines and Power*, 108(2):231–239.

- HAH, C., J. BERGER UND HP. SCHIFFER (2006). Short length-scale rotating stall inception in a transonic axial compressor, criteria and mechanism. *ASME Turbo Expo 2006, Barcelona, Spain, GT2006-90045*.
- HAH, CHUNILL, JÖRG BERGNER UND HEINZ-PETER SCHIFFER (2008). Tip Clearance Cortex Oscillation, Vortex Shedding And Rotating Instabilities in an axial Transonic Compressor Rotor. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, Berlin, Germany, GT2008-50105*.
- HAUKAP, H. (2006). *Zur Korrelation von Schaufelschwingungen und rotierenden Strömungsphänomenen in Axialverdichtern*. Dissertation, Technische Universität München.
- HAYAMI, HIROSHI, MASAHIRO HOJO, NORIFUMI HIRATA UND SHINICHIRO ARAMAKI (2004). Flow with Shock Waves in a Transonic Centrifugal Compressor with a Low-Solidity Cascade Diffusor Using PIV. In *In Proceedings of the ASME 2004, GT2004-53268*.
- HELLMICH, B. UND J. R. SEUME (2008). Causes of Acoustic Resonance in a High-speed Axial Compressor. *Journal of Turbomachinery*, 130.
- HOFFMANN, RÜDIGER (1998). *Signalanalyse und -erkennung: Eine Einführung für Informationstechniker*. Springer Verlag.
- HOYING, D. A., C. S. TAN, HUU DUC VO UND E. M. GREITZER (1999). Role of Blade Passage Flow structures in axial Compressor Rotating Stall Inception. *Journal of Turbomachinery*, 121:735–742.
- HUANG, J. F., Y. ZHOU UND T. ZHOU (2006). Three-dimensional wake structure measurement using a modified PIV-technique. *Experiments in Fluids*, 40:884–896.
- HUPPERTZ, G., F. ZURHEIDE, M. KLAAS UND W. SCHRÖDER (2007). Auswertung instationären Wirbel-Verhaltens anhand von PIV-Messungen mit der Methode der zentrierten Mittelung. In *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 4.-6. September 2007, Rostock, Chapter 16*.
- ILA (2009). *PIV Synchronizer Manual, ILA*.
- INOUE, M. (2001). High Frequency Rotating Instabilities in Axial Flow Compressors. *ISABE 2001-1008*. Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan.

- INOUE, M., M. KUROMARU, T. TANIDO, S. YOSHIDA UND M. FURUKAWA (2001). Comparative Studies on Short and Long Length Scale Stall Cell Propagating in an Axial Compressor Rotor. In *In Proceedings of the ASME Turbo Expo, Band 123*.
- INOUE, M., M. KUROMARU, S. YOSHIDA, T. MINAMI, K. YAMADA UND M. FURUKAWA (2004). Effect of tip clearance on Stall Evolution process in a low-speed Axial Compressor stage. In *In Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea and Air, Vienna, Austria, GT2004-53354*.
- IWAKIRI, K., M. FURUKAWA, S. IBARAKI UND I. TOMITA (2009). Unsteady and Three-dimensional Flow Phenomena in a transonic Centrifugal Compressor Impeller at Rotating Stall. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, Orlando, Florida, USA, GT2009-59516*.
- JIANG, HUABING, YAJUN LU, WEI YUAN UND QIUSHI LI (2009). Experimental Investigation of the Influence of Inlet Distortion on the Stall Inception in a Low Speed Axial Compressor. In *In Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, Orlando, Florida, USA, GT2009-59139*.
- KÄHLER, CHRISTIAN J. UND RAINER HAIN (2007). Tomographische und zeitaufgelöste PIV-Messungen an einem umströmten Zylinderstumpf. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 4.- 6. September, Rostock*.
- KAMEIER, F. (1994). Experimentelle Untersuchung zur Entstehung und Minderung des Blattspitzen-Wirbellärms axialer Strömungsmaschinen. VDI Fortschrittsbericht Nr. 243, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- KAMEIER, F. UND C. HAUKAP (2001). Experimentelle Untersuchungen strömungserregter Schaufelschwingungen bei Axialverdichtern. *Schlussbericht FKZ: 1700599*.
- KAMEIER, F., F. HOLSTE UND C. HAUKAP (2000). Experimentelle Untersuchung rotierender Instabilitäten in Axialverdichtern und ihr Einfluss auf die Verdichterstabilität. *Abschlussbericht BMBF, Vorhaben 0327 040L*, Vorhaben Gruppe: Verbesserung von Verdichterstabilität und Betriebssicherheit, Lärmreduktion, Vorhaben Nr. 1.244.
- KAPPLER, MICHAEL (2002). *Experimentelle Untersuchung der Strömung von Kreiszyklindern mit ausgeprägt dreidimensionalen Effekten*. Dissertation, TH Karlsruhe.
- KARMAN, TH. VON (1911). Über den Mechanismus des Widerstands, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. *Göttingen Nachr. Math. Phys. Kl.*, 12(509):509–517.

- KAUTZKY, THOMAS (1997). *Strukturuntersuchung der Karmanschen Wirbelstraße*. Dissertation, TU München, Physik Department.
- 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).
- KLINGE, FALK (2003). *Vermessung von Wirbel mit der Hintergrundsclieren-Methode*. Dissertation, Universität Hannover, Fachgebiet Maschinenbau.
- KLINNER, J., C. WILLERT, M. S. GLUMM UND E. BLUEMKE (2008). Zeitaufgelöste Visualisierung von Dichtegradienten im Strömungsfeld von Airbag Gasgenerator. In *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 9.-11. September, Karlsruhe*.
- KOMPENHANS, J., M. RAFFEL, A. VOGT UND M. FISCHER (1993). Aerodynamic investigations in low- and high-speed wind tunnels by means of particle image velocimetry. *15.th Intl Congr. on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, St. Louis, France.
- KURTULUS, D. F., F. SCARANO UND L. DAVID (2007). Unsteady aerodynamic forces estimation on a square cylinder by TR-PIV. *Experiments in Fluids*, 42:185–196.
- LANG, H., T. MØRCK UND J. WOISETSCHLÄGER (2002). Stereoscopic particle image velocimetry in a transonic turbine stage. *Experiments in Fluids*, 32(6):700–709,.
- LAWLESS, P. B. UND S. FLEETER (1995). Rotating Stall Acoustic Signature in a Low-Speed Centrifugal Compressor: Part I – Vaneless Diffuser. *Journal of Turbomachinery*, 117(1):87–96.
- 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*.
- LI, H., HU. H., T. SAGA, T. KOBAYASHI UND TANIGUCHI (2001). Application of Wavelet Vector Multi-Resolution Technique to PIV Measurements. *AIAA Paper 2001-0696*.
- LIN, F., J. ZHANG, J. CHEN UND C. NIE (2008). Flow structure of short length scale disturbance in an axial compressor. *AIAA- Journal of Propulsion and Power*, 24(6):1301–8.

- LIU, BAOJIE, HONGWEI WANG, H. LIU, H. YU, H. JIANG UND MAOZHANG CHEN (2004). Experimental Investigation of Unsteady Flow Field in the Tip Region of an axial Compressor Rotor Passage at Near Stall Condition With Stereoscopic Particle Image Velocimetry. *Journal of Turbomachinery*, 126.
- MAILACH, R. UND R. MÜLLER (1998). Experimentelle Untersuchung von Verdichterstabilitäten am Niedergeschwindigkeitsverdichter Dresden. In VDI-Gesellschaft für Energietechnik, Herausgeber, *Turbokompressoren im industriellen Einsatz*, Seiten 167–176.
- 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, GT-299*.
- MAILACH, R. UND K. VOGELER (2004). Aerodynamic Blade Row Interactions in an axial Compressor-Part I: Unsteady Boundary Layer Development. *Journal of Turbomachinery*, 126:35–44.
- MAILACH, RONALD UND KONRAD VOGELER (2003). Wake-Induced Boundary Layer Transition in a Low-Speed Axial Compressor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 69:271–294.
- MÄRZ, J., C. HAH UND W. NEISE (2002). An Experimental and Numerical Investigation into the Mechanisms of Rotating Instability. *Journal of Turbomachinery*, 124:367–375.
- MCDUGALL, N. M., N. A. CUMPSTY UND T. P. HYNES (1990). Stall Inception in Axial Compressors. *Journal of Turbomachinery*, 112:116–125.
- MERTINS, ALFRED (2010). *Signaltheorie: Grundlagen der Signalbeschreibung, Filterbänke, Wavelets, Zeit-Frequenz-Analyse, Parameter- und Signalschätzung*. Vieweg und Teubner.
- MÜLLER, T. (2006). Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer formvariablen Turbomaschinenschaufel. VDI Fortschrittsbericht Nr. 482, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- OWCZAREK, JERZY A. (2009). On the Phenomenon of Pressure Pulses Reflecting Between Blades of Adjacent Blade Rows of Turbo-Machines. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air GT2009-59055*.

- PADUANO, J., EM. GREITZER UND AH. EPSTEIN (2001). Compression system stability and active control. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33:491–517.
- PAMPREEN, R. C. (1993). *Compressor Surge and Stall*. Concepts ETI, Inc., Norwich, Vermont, USA.
- PARKER, R. (1968). An Investigation Of Acoustic Resonance Effects in an Axial Flow Compressor Stage. *Journal of Sound and Vibration*, 8(2):281–297.
- PEREIRA GOMES, J. UND H. LIENHART (2007). Experimentelle Untersuchung selbstinduzierter Schwingungen flexibler Strukturen in laminarer Strömung. In *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 4.-6. September, Rostock*.
- PEREIRA GOMES, J., H. LIENHART UND A. DELGADO (2009). Selbstinduzierte Schwingungen zwei- und drei- Dimensionaler Strukturen in Turbulenten Strömungen. In *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 8.-10. September, Erlangen*.
- PRASANTH, T. K. UND S. MITTAL (2008). Vortex-induced vibrations of a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 594:463–491.
- PUST, OLIVER (2003). Time resolved PIV solutions: PIV at 4000 Frames per second. In *Conference on Modelling Fluid Flow(CMFF), The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary*.
- RAFFEL, M., C. WILLERT, S. WERELEY UND J. KOMPENHANS (2007). *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*. Springer Verlag.
- ROSHKO, ANATOL (1954). On the development of turbulent wakes from vortex streets. Technischer Bericht 1191, NACA.
- SAATHOFF, H. (2001). Rotor Spaltströmungen in Axialverdichtern. ZLR–Forschungsbericht 2001–05.
- SANDERS, A. J., J. PAPLIA UND S. FLEETER (2002). Multi-Blade Row Interactions in a Transonic Axial Compressor: Part I – Stator Particle Image Velocimetry (PIV) Investigation. *Journal of Turbomachinery*, 124(1):10–18.
- SCHLITTGEN, RAINER UND BERND STREITBERG (2001). *Zeitreihenanalyse*. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 9. Auflage.
- SIEVERDING, C. H., T. ARTS, R. DENOS UND J.-F. BROUCKAERT (2000). Measurement techniques for unsteady flows in turbomachines. *Experiments in Fluids*, 28:285–321.

- SIGLOCH, HERBERT (2007). *Technische Fluidmechanik*. Springer Verlag.
- SIMPSON, A. K. UND J. P. LONGLEY (2007). An experimental study of the inception of rotating stall in a single stage low-speed axial compressor. *ASME Turbo Expo 07, Montreal, Canada, GT2007-27181*.
- SPAKOVSKY, Z. S. (2004). Backward Traveling Rotating Stall Waves in Centrifugale Compressors. *Journal of Turbomachinery*, 126.
- SPAKOVSKY, Z. S., H. J. WEIGL, J. D. PADUANO, C. M. VAN SCHALKWYK, K. L. SUDER UND M. M. BRIGHT (1999). Rotating Stall Control in a High Speed Stage with Inlet Distortion. Part I: Circumferential Distortion. *Journal of Turbomachinery*, 121(3):517–524.
- SPAKOVSKY, ZS. UND CH. RODUNER (2009). Spike and modal stall inception in an advanced turbocharger centrifugal compressor. *ASME Turbo Expo 09, Montreal, Canada*, 131(031012).
- STRAMPP, W. UND E. V. VOROZHTSOV (2004). *Mathematische Methoden der Signalverarbeitung*. Oldenbourg Verlag München Wien.
- SUNG, J. UND J. Y. YOO (2001). Three-dimensional phase averaging of time-resolved PIV measurement data. *Meas. Sci. Technol.*, 12:655–662.
- TAHARA, N., E. OUTA, M. KUROSAKI, T. NAKAKITA, Y. OHTA UND Y. TSURUMI (2007). Early stall warning technique for axial flow compressors. *Journal of Turbomachinery*, 129:448–456.
- TAN, C. S., I. DAY, S. MORRIS UND A. WADIA (2010). Spike-Type Compressor Stall inception, Detection and Control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:275–300.
- THOMASSIN, J., H. D. VO UND N. W. MUREITHI (2009). Blade Tip Clearance Flow and Compressor Nonsynchronous Vibrations: the Jet Core Feedback Theory as the Coupling Mechanism. *Journal of Turbomachinery*, 131.
- TINAR, E. UND O. CETINER (2006). Acceleration data correlated with PIV images for self-induced vibrations of an airfoil. *Experiments in Fluids*, 41:201–212.
- TISSERANT, D. UND F. A. E. BREUGELMANS (1997). Rotor Blade-to-Blade Measurements Using Particle Image Velocimetry. *Journal of Turbomachinery*, 119:176–181.

- TRYFONIDIS, M., O. ETCHEVERS, J. D. PADUANO UND A. H. EPSTEIN (1995). Pre-Stall Behavior of Several High-Speed Compressors. *ASME J. Turbomach.*, 117(1):62–80.
- UHLMANN, HANS-GÜNTER (2003). *Früherkennung aerodynamischer Verdichterstabilitäten mittels Wavelet-Transformation*. Dissertation, Technische Universität München.
- ULBRICHT, IRIS (2002). *Stabilität des stehenden Ringgitters*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme.
- UZOL, O., Y. CHOW, J. KATZ UND C. MEMEVEAU (2002). Experimental Investigation of Unsteady Flow Field within a two Stage Axial Turbomachine using Particle Image Velocimetry. In *In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002, GT2002-30664*.
- VO, H. D., J. CAMERON UND S. MORRIS (2008a). Control of short length-scale rotating stall inception on a high-speed axial compressor with plasma actuation. *ASME Turbo Expo 08, Berlin, Germany, GT2008-20967*.
- VO, HD. (2010a). Role of tip clearance flow in Rotating Instabilities and Nonsynchronous Vibrations. *Journal of Propulsion and Power*, 26(3):556–561.
- VO, HUU DUC (2010b). Rotating Stall Suppression in axial compressors with Casing Plasma Actuation. *Journal of Propulsion and Power*, 26:808–818.
- VO, HUU DUC, CHOON S. TAN UND EDWARD M. GREITZER (2008b). Criteria for Spike Initiated Rotating Stall. *Journal of Turbomachinery*, 130(011023).
- VOGES, M., M. BEVERSDORFF, C. WILLERT UND H. KRAIN (2006). Application of Particle Image Velocimetry to a Transonic Centrifugal Compressor. In *13th Int. Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal*, Nummer 1073.
- 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, Berlin, Germany, GT2008-50210*.
- WEIDENFELLER, J. (2002). Experimentelle Untersuchung der stationären und instationären Strömung eines Axialverdichtergitters. VDI Fortschrittsbericht Nr. 429, Reihe 7, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

- WEIDENFELLER, J. UND M. LAWERENZ (2002). Time Resolved Measurements in an Annular Compressor Cascade with High Aerodynamic Loading. In *In Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, GT2002-30439*.
- WEIDENFELLER, J. UND M. LAWERENZ (2004). Studies on Endwall Treatment for the Generation of High Incidence Flow and its Influence on Flow Structures in an Annular Compressor Cascade. In *In Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53413*.
- WEIDENFELLER, J., M. PRIESEL UND M. LAWERENZ (2003). PIV Untersuchungen an einem ebenen Verzögerungsgitter zur Wirbelkernidentifikation. In *11. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, PTB Braunschweig*.
- WERELEY, S. T. UND C. D. MEINHART (2001). Second-Order Accurate Particle Image Velocimetry. *Experiments in Fluids*, 31(3):258–268.
- WERNET, M. P. (2000). Development of Digital Particle Image Velocimetry for Use in Turbomachinery. *Experiments in Fluids*, 28(2):97–115.
- WERNET, M. P. (2007). Temporally resolved PIV for space-time correlations in both cold and hot jet flows. *Measurement Science and Technology*, 18:1387–1403.
- WERNET, M. P., M. M. BRIGHT UND G. J. SKOCH (2001). An Investigation of Surge in a High-Speed Centrifugal Compressor Using Digital PIV. *Journal of Turbomachinery*, 123(4):418–428.
- WERNET, M. P., D.E. VAN ZANTE UND T. J. STRAZISAR (2002). 3-D PIV Measurements of the Tip Clearance Flow in an Axial Compressor. In *In Proceedings of ASME 2002, GT2002-30643*.
- WILLIAMSON, C. H. K. (1996). Vortex Dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28:477–539.
- WILLIAMSON, C. H. K. UND R. GOVARDHAN (2004). Vortex-Induced Vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36:413–455.
- YAMADA, K., K. FUNAZAKI UND M. FURUKAWA (2007). The Behavior of Tip Clearance Flow at Near-Stall Condition in a Transonic Axial Compressor Rotor. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air GT2007-27725*.
- YAMADA, K., K. FUNAZAKI UND H. SASAKI (2008). Numerical Investigation of Relation between Unsteady Behavior of Tip Clearance Vortex and Rotating Disturbance

in Transonic Axial Compressor Rotor. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air GT2008-50779*.

ZABEL, VOLKMAR (2002). *Applications of Wavelet Analysis in System Identification*. Dissertation, Bauhaus Universität Weimar.