

Aerodynamische Untersuchungen an Axialverdichtergittern an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

B. Ober
Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH
Überseering 12, Hamburg
T. Eisfeld – F. Joos
Laboratorium für Strömungsmaschinen
Helmut-Schmidt-Universität
Holstenhofweg 85, Hamburg
Deutschland

Zusammenfassung

Das Laboratorium für Strömungsmaschinen der Helmut-Schmidt-Universität unterhält einen Hochgeschwindigkeitsgitterwindkanal zur Untersuchung von Schaufelprofilen von Axialturbomaschinen. Die Vorteile, die die Analyse von Schaufelprofilen in einem Gitterwindkanal in Bezug auf Kosten und optische Zugänglichkeit mit sich bringt, werden durch Einflüsse der wandnahen Grenzschicht auf die gesamte Strömung erkauft. Die Besonderheit des Windkanals am Laboratorium für Strömungsmaschinen besteht zum einen in der Behandlung der wandnahen Grenzschicht, die es erlaubt, die Einflüsse dieser auf die Strömung im Mittelbereich zu unterbinden und zum anderen in der Möglichkeit, die Luftströmung mit Wassertropfen zu versetzen und somit eine Zweiphasenströmung zu erhalten.

Die Reduzierung der Grenzschicht erfolgt mit Hilfe einer Eindüsung zur Reenergetisierung des Geschwindigkeitsprofils. Die Wirksamkeit dieser Methode wurde sowohl numerisch als auch experimentell nachgewiesen.

Die Möglichkeit, die Messstrecke mit einer Zweiphasenströmung zu speisen, ermöglicht insbesondere Untersuchungen mit Bezug auf die Tropfen-Schaufel-Interaktion. Eine kurzfristig anstehende Erweiterung des Versuchsaufbaus wird eine stufenlose Verstellung des Anstellwinkels der Schaufelprofile ermöglichen. Die somit gewonnene Funktionalität erlaubt die Vermessung des gesamten Betriebsbereiches ohne die Durchführung von Umbaumaßnahmen.

Die Vermessung der Verlustpolaren erlaubt die Beurteilung der Strömung in einem weiten Betriebsbereich des entsprechenden Schaufelprofils, was in Fluganwendungen von besonderem Interesse ist und lässt somit auch eine vergleichende Aussage über das Verhalten der Schaufeln in einer trockenen sowie einer Zweiphasenströmung zu.

Dieser Beitrag legt die Wirksamkeit der Behandlung der wandnahen Grenzschicht und die Überlegenheit der gewählten Methode dar. Zudem wird der Einfluss der Zweiphasenströmung auf die Profilumströmung anhand von Messwerten aufgezeigt. Darüber hinaus wird die zukünftige Nutzung der durch die Umbauten gewonnenen Funktionalität und die damit verbundene Annäherung an die anwendungsnahe Forschung beleuchtet.

1. NOMENKLATUR

1.1. Abkürzungen

AVDR	Axial Velocity Density Ratio
CDA	Controlled Diffusion Airfoil
CFD	Computational Fluid Dynamics
GuD	Gas- und Dampf
LDA	Laser Doppler Anemometer
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Admin.
PDA	Phase Doppler Anemometry
PIV	Particle Image Velocimetry
SST	Shear Stress Transport
c	chord
x	Hauptströmungsrichtung

y orthogonal zur Hauptströmungsrichtung

1.2. Indizes

Max	Maximalwert
W	Wasser
inj	injection (eingedüst)
int	intake (angesaugt)
1,2	Gitterein- bzw. Austritt

1.3. Variablen

ϕ	Winkel
$H_{1,2}$	Grenzschichtdickenverhältnis
Ma	Machzahl
u	Geschwindigkeit in Grenzschicht (wandparallel)

U	Geschwindigkeit im Mittenbereich (wandparallel)
w	Relativgeschwindigkeit
β	Ein- bzw. Austrittswinkel
δ	Grenzschichtdicke
ρ	Dichte
χ	Wasserbeladung

2. EINLEITUNG

Axialturbomaschinen finden in verschiedenen Anwendungen Anwendung. Man findet sie als Antriebe in der Luftfahrt, als Verdichter in industriellen Anwendungen oder als primäre Komponente in modernen GuD-Kraftwerken. In allen Anwendungen ist die Optimierung dieser Maschinen von großem Interesse. Ein Ansatz zur Optimierung bietet die Untersuchung der Strömungsverhältnisse an den Beschaufelungen in Windkanälen.

Die ersten Windkanaltests an Verdichterbeschaufelungen wurden in den 1950er Jahren von der NACA zur systematischen Untersuchung ihrer Profilfamilien durchgeführt. Man wollte damals den Aufwand vermeiden, die Profile in ganzen Stufen oder gar Maschinen zu testen und setzte die Schaufelprofile in rechteckige Windkanäle ein (1). Der Vorteil dieses Verfahrens liegt neben den ökonomischen Aspekten bei der optischen Zugänglichkeit. Ein Nachteil dagegen liegt in der Beeinflussung der Strömung durch die wandnahe Grenzschicht. Ohne geeignetes System zur Behandlung derselben kommt es zur Ausbildung von Sekundärströmungen, die dreidimensionale Störungen des gesamten Strömungsfeldes nach sich ziehen.

Zur Verringerung des störenden Einflusses hat sich die Methode der Grenzschichtabsaugung der NACA etabliert. Zur Absaugung der Grenzschicht verfügen die Seitenwände des Windkanals über Saugöffnungen, welche stromaufwärts der Kaskade platziert sind.

3. TESTAUFBAU

Das Laboratorium für Strömungsmaschinen an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg unterhält einen Kaskadenwindkanal zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen (2). Der grundsätzliche Aufbau ist Abbildung 1 zu entnehmen. Die Luftzufuhr erfolgt über eine Beruhigungskammer welche von einem einstufigen Radialverdichter gespeist wird. Eine zweite Verdichtereinheit, die sowohl parallel als auch seriell geschaltet werden kann, steht zur Verfügung. Das maximale Druckverhältnis des Verdichters beträgt 2,1. Damit sind transsonische Strömungszustände im Zulauf möglich. Bauliche Restriktionen machen eine Einlaufstrecke mit einer Länge von zwei Metern erforderlich. Der Testaufbau ist mit einer variablen Anzahl von Profilen bestückt, die dem jeweiligen Querschnitt der zu untersuchenden Beschaufelung entspricht (3).

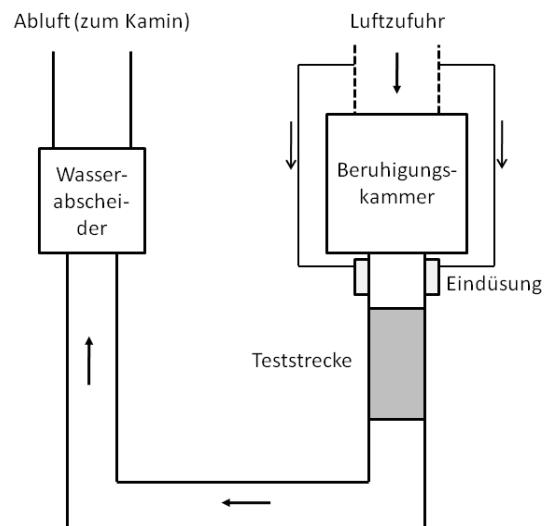


Abbildung 1: Schema des Versuchsstandes

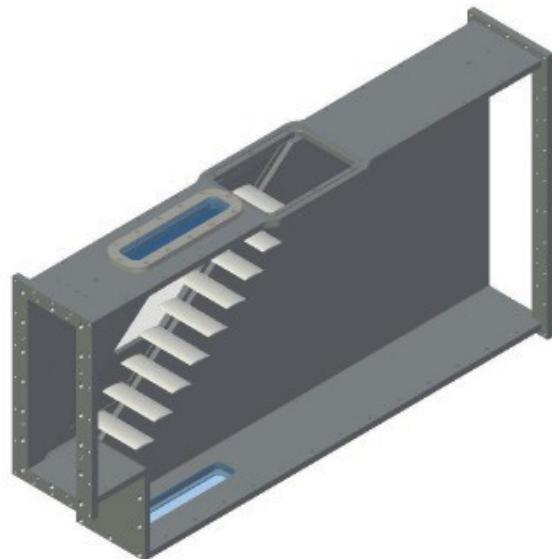


Abbildung 2: Kaskade des Gitterwindkanals

Stromabwärts der Kaskade befindet sich eine Strömungsquerschnittserweiterung in Form einer Stufe. Die optische Zugänglichkeit ist durch Plexiglasscheiben gewährleistet.

Die Luftströmung kann zur Untersuchung von Zweiphasenströmungen mittels einer Hochdruckpumpe mit Wassertropfen beladen werden. Stromabwärts der Kaskade befindet sich ein Wasserabscheider. Die Abluft gelangt durch einen Kamin an die Umgebung.

Zur Untersuchung der Strömung steht eine LDA-Einheit zur Verfügung. Mit dieser nicht invasiven Messtechnik kann in Verbindung mit einer Traversiereinheit, ein vorher definiertes Gitter von Messpunkten abgefahrt werden, um so das gesamte Strömungsfeld zu beurteilen. Es werden für jeden Messpunkt 2000 Werte gemessen und

gemittelt. Die Unsicherheit beträgt 2-4% (4).

4. MESSTECHNIK

Zur Erfassung der Strömungsgegebenheiten steht eine umfassende messtechnische Ausstattung zur Verfügung. Folgende Einrichtungen sind vorhanden:

- 2D-LDA/PDA
- PIV
- Extinktionsmessung

Das 2D Laser-Doppler-Anemometrie-System dient der Geschwindigkeitsmessung von Partikeln in einem Trägerfluid. Als detektiertes Medium dienen sphärische Tropfen in Form von Öl (DEHS) oder Wasser. Der Strahl des Lasers wird in zwei Teilstrahlen zerlegt. Einer dieser Teilstrahlen wird mit Hilfe einer Braggzelle phasenverschoben. Im Messvolumen werden diese Teilstrahlen mit Hilfe von Spiegeln zur Kreuzung gebracht. Im Messvolumen entsteht somit ein Interferenzmuster aus den gekreuzten Teilstrahlen, welches von den Partikeln durchlaufen wird. Die Partikel durchlaufen die hellen und dunklen Bereiche des Interferenzmusters und streuen bzw. reflektieren dabei das Licht. Ein Photomultiplikator empfängt das in der Intensität volatile Signal. Die Frequenz dieser Volatilität korreliert mit der Geschwindigkeit des entsprechenden Partikels. Das Particle Dynamics Analysis System (PDA) ist eine Erweiterung zum LDA-System. Hierbei kommen mehrere optische Empfänger zum Einsatz. Die auftretende Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Signalen ist direkt ein Maß für den Partikeldurchmesser.

Das Particle Image Velocimetry-System (PIV) ist in der Lage, Geschwindigkeitsfelder anhand einer Korrelation zweier im kurzen Zeitabstand hintereinander aufgenommenen Bilder zu errechnen. Die Belichtung der Bilder erfolgt mittels eines gepulsten Lasers. So können Geschwindigkeitsfelder aufgenommen werden, während die LDA-Technik nur punktweise Messdaten liefert.

Die Extinktionsmessung ist ein experimenteller Aufbau zur Bestimmung der Wasserbeladung der Strömung. Als Messprinzip kommt hier das Lambert-Beersche Gesetz der Lichtintensitätsschwächung zum Einsatz. Es können bisher Wasserbeladungen im Bereich von 0-2% (massenbezogen) verlässlich gemessen werden. Der Fehler liegt hierbei unter 10%.

5. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Der numerisch untersuchte Bereich besteht aus einer Einlaufstrecke mit einer Länge von zwei Metern, der Kaskade und einer Auslaufstrecke mit einer Länge von einem Meter. Das dazugehörige Netz besteht aus 1,4 Millionen hexahedralem Zellen. Für die numerische Analyse der Strömungsverhältnisse wird das kommerzielle Softwarepaket ANSYS CFX verwendet. Die

Berechnungen beruhen auf den Annahmen eines voll kompressiblen idealen Gases.

Die Randbedingungen werden entsprechend den im Experiment eingestellten Werten gewählt. Für die Eintrittsöffnungen an Kanaleintritt und Eindüsung werden Totaldruckvorgaben verwendet. Darüber hinaus wird die Totaltemperatur an den Eintrittsöffnungen vorgegeben.

Für die Berechnungen wird das Shear-Stress-Transport (SST) Turbulenzmodell mit automatischer Wandfunktion verwendet (5).

6. ALTERNATIVE ZUR GRENZSCHICHTABSAUGUNG

Die von der NACA etablierten Methode der Grenzschichtabsaugung hat den Nachteil, dass zur Sicherstellung der Funktion, im Bereich der an der Helmut-Schmidt-Universität geplanten Betriebspunkten, ein erheblicher Teil der zuvor verdichteten Luft wieder abgesaugt werden muss. Daher erschien dieser Ansatz aus ökonomischer Sicht als wenig praktikabel.

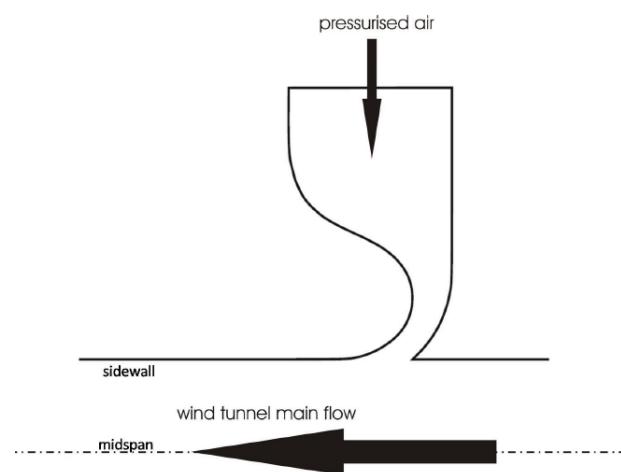


Abbildung 3 Querschnittszeichnung der Eintrittsdüse

Die NASA hat zur Behandlung von Rotorblattspitzenströmungen in Verdichtergehäusen eine Methode entwickelt, die die Reenergetisierung der Grenzschicht vorsieht (6). Hierbei wird parallel zur Hauptströmungsrichtung eine Eindüsung vorgesehen, die das wandnahe Geschwindigkeitsprofil auffüllen kann. Es hat sich gezeigt, dass die eingedüste Luftsicht parallel zur Wand verläuft und die Hauptsrömung nicht beeinflusst (5). Dies wird dem Coanda Effekt zugeschrieben.

Am Gitterwindkanal des Laboratoriums für Strömungsmaschinen wurde diese Methode durch eine rechteckige Öffnung realisiert, die senkrecht zur Hauptströmungsrichtung orientiert ist. Die Eindüsung erfolgt durch eine eigens unter der Ausnutzung des Coanda-Effektes entwickelte Düse, die eine superkritische Durchströmung erlaubt. Die Düse hat eine Breite von 5mm. Die Luft tritt unter

einem Winkel von 30° zur Hauptströmungsrichtung in den Kanal ein. Auf diese Weise wird eine Überkompensation des wandnahen Impulsverlustes erreicht. Die Eindüsung befindet sich 100mm stromaufwärts der Kaskade, damit ein Ausgleich etwaiger Geschwindigkeitsdifferenzen stattfinden kann.

7. NUMERISCHE ANALYSE

Die Wirksamkeit der Grenzschichteindüsung wurde im Vorfeld durch numerische Untersuchungen analysiert.

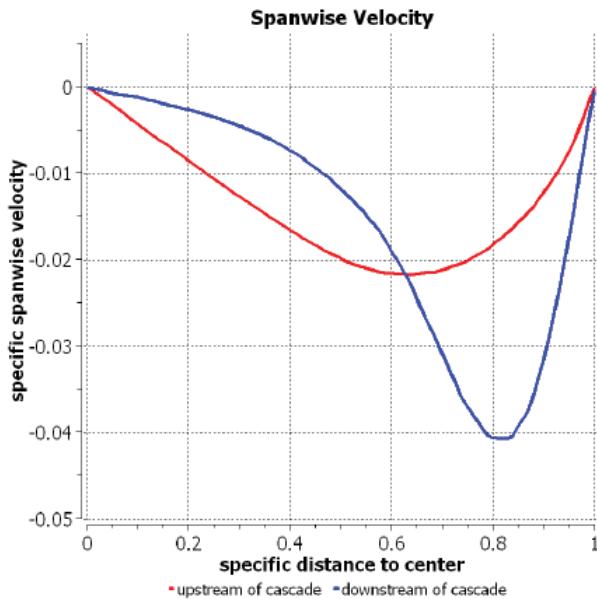


Abbildung 4: Berechnete spezifische Geschwindigkeit quer zur Hauptströmungsrichtung ohne Grenzschichtbehandlung

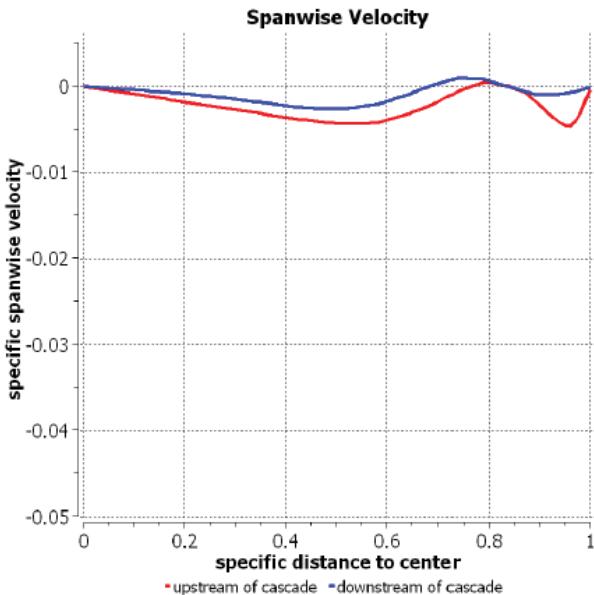


Abbildung 5: Berechnete spezifische Geschwindigkeit quer zur Hauptströmungsrichtung mit Grenzschichtbehandlung

Es hat sich gezeigt, dass in erster Linie die wandnahen Bereiche von der Eindüsung profitieren

und der zentrale Bereich der Strömung bis zum Eintritt in die Kaskade unbeeinflusst bleibt. Abbildung 4 zeigt die spezifische Strömungsgeschwindigkeit quer zur Hauptströmungsrichtung.

Im Falle der unbehandelten Grenzschicht ist der Einfluss des Impulsverlustes auf das gesamte Strömungsfeld zu erkennen. Es kommt sowohl stromauf als auch stromabwärts zu einer Verzögerung bis in den zentralen Bereich der Kaskade. Im Falle der reenergetisierten Grenzschicht ist dieser Effekt nicht zu erkennen. Wie Abbildung 4 zeigt, wird der Einfluss der wandnahen Grenzschicht auf ein Minimum reduziert. Dies äußert sich in einer deutlich vergleichmäßigten Geschwindigkeitsverteilung.

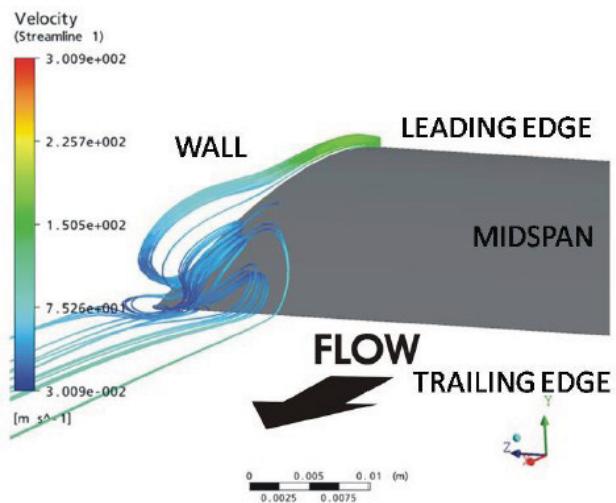


Abbildung 6: Stromlinien mit unbehandelter Grenzschicht

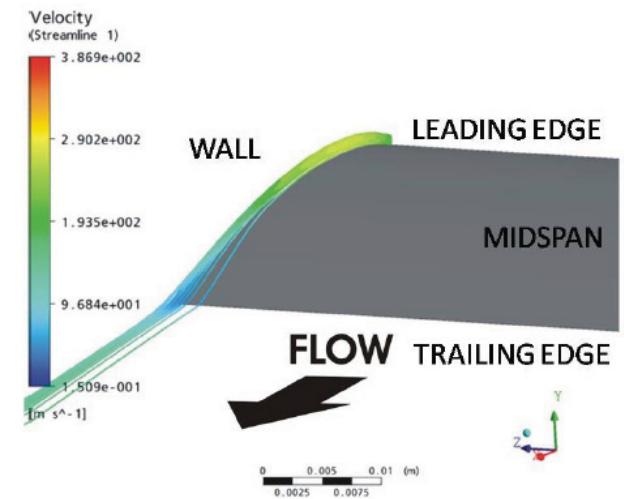


Abbildung 7: Stromlinien mit behandelter Grenzschicht

Stromabwärts der Kaskade lässt sich ohne Grenzschichteindüsung die Ausbildung eines Eckenwirbels beobachten. Im Falle der Grenzschichtbehandlung lässt sich dieser Effekt nicht beobachten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Grenzschichteindüsung die Verzögerung

der wandnahen Strömungsschichten verhindert und somit der Wirbelbildung vorbeugt. Jeweils eine Darstellung der Stromlinien ist den Abbildungen 6 und 7 zu entnehmen.

Im Zusammenhang mit der Beeinflussung der idealen, zweidimensionalen Strömung steht das Stromschichtdickenverhältnis (engl. Axial Velocity Density Ratio (AVDR)). Bei der Durchströmung der Kaskade ändert sich wegen des Kanalverlaufs und der Zunahme der Seitenwandgrenzschichten der Durchmesser einer bestimmten Stromröhre. Es kommt zu einer Kontraktion der Stromröhre vom Ein- zum Austritt. Ausdruck der Dreidimensionalität der Windkanalströmung ist das Axial Velocity Density Ratio AVDR:

$$(1) \quad AVDR = \frac{\rho_2 \sin \beta_2 w_2}{\rho_1 \sin \beta_1 w_1}$$

Das Verhältnis beschreibt die dreidimensionale Einschnürung der Strömung im Bereich der Kaskade. Ein Wert $AVDR = 1$ steht für die unbeeinflusste Strömung und somit den Idealfall. Die Eindüsungsvorrichtung erlaubt eine Reduzierung des AVDR in Abhängigkeit des Totaldrucks von 1,1 auf nahezu 1,0. Auf Grund der Länge der Einlaufstrecke beträgt der injizierte Luftmassenstrom $\dot{m}_{inj} \approx 0,15 \dot{m}_{int}$. Ein weiteres Maß zur Beurteilung der Wirksamkeit dieses Ansatzes ist der Vergleich der Grenzschichtdicken.

$$(2) \quad \delta_1 = \int \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

$$(3) \quad \delta_2 = \int \left(1 - \frac{u}{U}\right) \frac{u}{U} dy$$

Numerische Analysen haben ergeben, dass mit Hilfe der Eindüsung die Grenzschichtdicke auf annähernd 10% der Dicke im Fall der unbehandelten Grenzschicht reduziert wird (5).

Tabelle 1: Grenzschichtdicke 15mm stromaufwärts und 70 mm stromabwärts der Kaskade

	δ_1	δ_2	$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$
Eindüsung			
Stromaufwärts	0,3 mm	0,2 mm	1,6
Stromabwärts	0,7 mm	0,6 mm	1,2
Unbeeinflusst			
Stromaufwärts	3,1 mm	2,4 mm	1,3
Stromabwärts	6,7 mm	4,0 mm	1,6

8. EXPERIMENTELLE ANALYSE DER EINDÜSUNGSVORRICHTUNG

Die Erhebung der experimentellen Daten dient der Validierung der numerischen Analysen. Die Untersuchungen umfassen die Vermessung der Eintrittsgeschwindigkeitsprofile und den Einfluss der Eindüsung auf das AVDR. Alle Messungen wurden mit einem LDA System durchgeführt. Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile zeigen, dass die numerische Analyse die tatsächlichen Gegebenheiten sehr gut abbildet und die reale bauliche Ausführung der Eindüsungsvorrichtung eine gleichmäßige Reenergetisierung der Grenzschicht erlaubt.

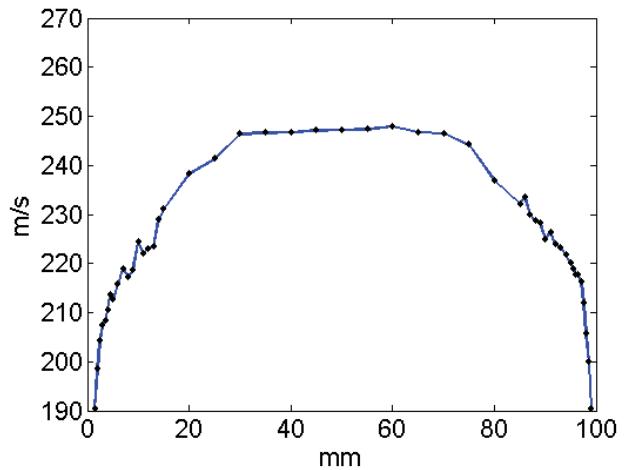


Abbildung 8: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil am Kaskadeneintritt ohne Grenzschichtbehandlung

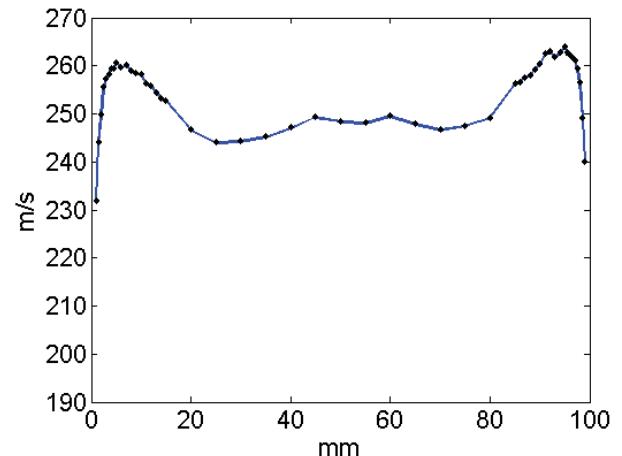


Abbildung 9: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil mit Grenzschichtbehandlung (7)

Abbildung 5 zeigt deutlich den weitreichenden Einfluss der Wandgrenzschicht auf das Geschwindigkeitsprofil. Erst ab einem Abstand von ca. 30mm von der Wand zeigt sich eine unbeeinflusste Geschwindigkeitsverteilung. Abbildung 8 verdeutlicht die Wirksamkeit der Eindüsungsvorrichtung. Der ausgeprägte

Geschwindigkeitsabfall in den wandnahen Bereichen wird überkompensiert. Gleichzeitig wird die symmetrische Wirkung der Vorrichtung deutlich (5; 7).

9. PRÜFSTANDSERWEITERUNG

Die derzeitige Prüfstandskonfiguration erlaubt die Vermessung einzelner Anstellwinkel. Ziel der Untersuchungen ist jedoch die Beurteilung der Profile im gesamten Betriebsbereich. Daher soll für die Ergänzung der bisher durchgeführten Untersuchungen eine Prüfstandserweiterung durchgeführt werden.

9.1. Bauliche Maßnahmen

Die Erweiterung zielt auf die Möglichkeit, in Zukunft die gesamte Verlustpolare eines Versuchsträgers zu vermessen. Hierzu muss die Strömung bei einer ausreichenden Zahl von Anstellwinkeln vermessen werden. Veränderungen des Anstellwinkels bedürfen derzeit einer Anfertigung einer spezifischen Aufnahme für jeden Anstellwinkel, was mit Kosten und Zeitaufwand verbunden ist. Die geplante Erweiterung beinhaltet eine Winkelverstellung mit gleichzeitiger Kompensation der entstehenden Längenänderungen der oberen und unteren Kanalwände. Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Vorteile der Anlage bleiben erhalten.

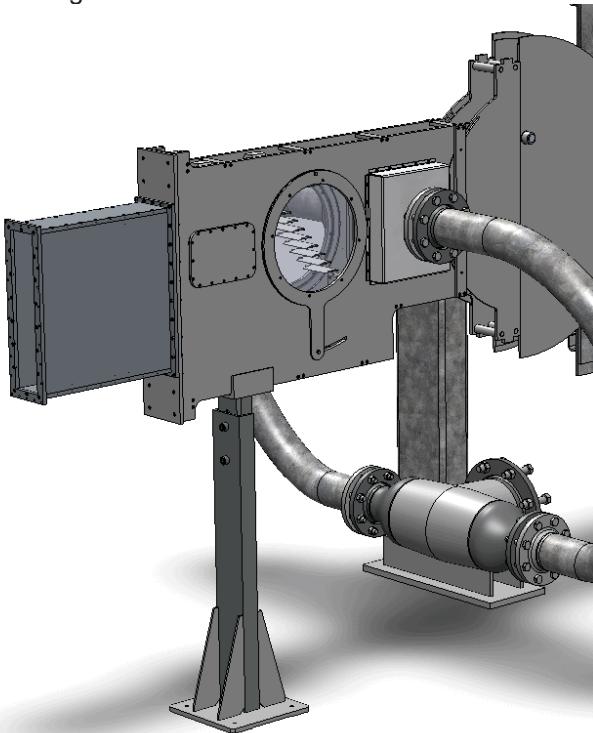


Abbildung 10: Erweiterter Gitterwindkanal in Maximalposition 1

Abbildung 10 zeigt die Teststrecke der Versuchsanlage nach der geplanten Umbaumaßnahme in der Position für maximal

negative Anstellwinkel. Die Verstelleinrichtung ist auf eine maximale Verdrehung der Schaufelaufnahme von $\varphi_{\max} = 20^\circ$ ausgelegt. Die Verstellung erfolgt stufenlos über ein Getriebe (Verstellmechanismus nicht dargestellt). Die Auslegung ist unter der Zielsetzung erfolgt, auch die Randbereiche des Betriebsbereiches untersuchen zu können.

Unter Beibehaltung der Eindüsingvorrichtung und vor dem Hintergrund der vollständig vorhandenen Messtechnik wird ein Versuchsstand entstehen, der in der Lage ist, praxisnahe Betriebsbedingungen zu simulieren und somit anwendungsnahe Versuchsergebnisse zu produzieren. Der weite Verstellbereich ist den weit gestreuten Strömungsverhältnissen geschuldet, wie sie in Flugtriebwerken vorkommen. Ziel der zukünftigen Untersuchungen ist die Erweiterung der bisher erlangten Kenntnisse auf dem Gebiet der Zweiphasenströmung in Verdichtergittern.

9.2. Zielsetzung der Umbaumaßnahme

Ein zentraler Baustein bei der Beurteilung eines Umströmung eines Schaufelprofils ist die Verlustpolare.

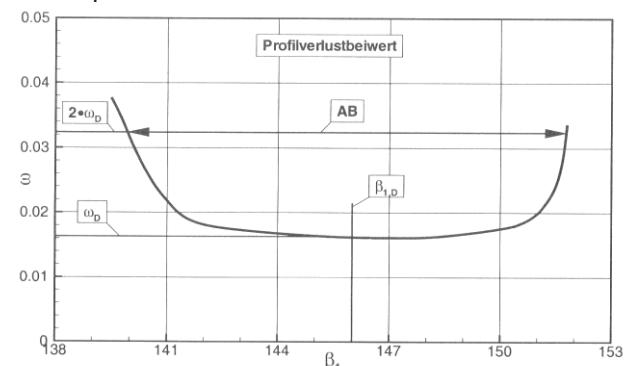


Abbildung 11: Beispiel einer Verlustpolaren (7)

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel einer Verlustpolaren eines CDA-Profil. Aufgetragen ist der Verlustbeiwert ω über dem Anströmwinkel. Der Verlustbeiwert wird definiert zu:

$$(4) \quad \omega = \frac{p_{t1} - p_{t2}}{p_{t1} - p_1}$$

Charakteristisch für diese Darstellung ist die sogenannte Badewannenform. Bei hohen und niedrigen Anströmwinkeln steigt der Verlustbeiwert stark an. Der Arbeitsbereich (AB) ist begrenzt durch den zweifachen Auslegungsverlustbeiwert ω_D .

Bei den Untersuchungen mit Zweiphasenströmungen ist die Interaktion von disperser Phase mit dem Trägerfluid von gesondertem Interesse. Durch die gute optische Zugänglichkeit des Versuchsstandes sind detaillierte Untersuchungen der Schaufelumströmungen möglich. Diese Möglichkeiten sollen genutzt werden, um etwaige Verschiebungen des Arbeitsbereiches auf Grund von geänderten thermodynamischen Eigenschaften

des Fluids zu identifizieren. Als Beispiel soll hier erneut die Verlustpolare dienen. Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich auf einzelne Anstellwinkel des Profils und damit auf einzelne Stützstellen der Verlustpolaren. Durch Messung einzelner Stützstellen lässt sich jedoch keine Aussage über die Randbereiche der Kurve treffen. Hierbei sind drei Aspekte von Interesse. Zum einen soll die Lage der Kurve überprüft werden. Es soll ermittelt werden, ob die Wasserbeladung die maximal möglichen Abweichungen von der Nulllage des Profils beeinflusst. Dies wäre gleichbedeutend mit einer Veränderung des Arbeitsbereiches. Desweitern soll geklärt werden, ob das absolute Niveau des Verlustbeiwertes verändert wird. Als letzter Untersuchungsaspekt sei noch die Form der Verlustpolaren genannt. Es soll ermittelt werden, wie sich die Verlustgradienten in den Grenzen des Betriebsbereiches verhalten.

9.3. Grundlegende Untersuchungen

Neben der oben genannten Zielsetzung soll auch das grundsätzliche Verhalten einer Zweiphasenströmung bei der Profilumströmung untersucht werden.

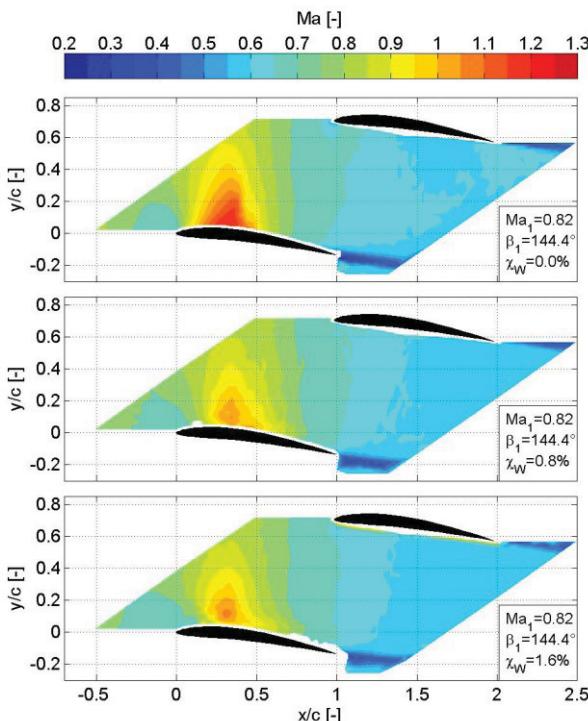


Abbildung 12: Zweiphasenströmung im Designpunkt – Geschwindigkeitsverteilung (7)

Abbildung 12 zeigt Ergebnisse einer Messkampagne. Der Anströmwinkel entspricht dem Auslegungspunkt. Es wurden die trockene Strömung und zwei Wasserbeladungen bei konstanter Anströmgeschwindigkeit untersucht. Die trockene Strömung ist charakterisiert durch die starke Geschwindigkeitsüberhöhung auf der Saugseite bis auf eine Machzahl von $Ma_{max} \approx 1,2$. Die

anschließende Verzögerung ist bei $x/c \approx 0,7$ abgeschlossen. Weiterhin ist ein Bereich verzögterer Strömung nahe der Schaufelvorderkante zu erkennen. Das Geschwindigkeitsfeld entspricht einer typischen Verdichterströmung. Bei einer Wasserbeladung von $\chi = 0,8\%$ zeigt sich eine deutlich geringer ausgeprägte Geschwindigkeitsüberhöhung. Die maximale Machzahl liegt hier bei $Ma_{max} \approx 1$. Die anschließende Verzögerung verlagert sich im Vergleich zur trockenen Strömung weiter stromabwärts und ist erst bei $x/c \approx 0,8$ abgeschlossen. Der Bereich verzögter Strömung nahe der Schaufelvorderkante erstreckt sich weiter auf die Saugseite. Das Beschleunigungsgebiet wird unterlaufen. Bei einer Wasserbeladung von $\chi = 1,6\%$ ergeben sich ähnliche Strömungsverhältnisse wie im zuvor diskutierten Fall. Auch hier wird die maximale Machzahl begrenzt. Das Gebiet der beschleunigten Strömung wird noch weiter stromabwärts unterlaufen, so dass auch die Verzögerung erst bei $x/c \approx 0,9$ abgeschlossen ist. Diese Phänomene lassen sich folgendermaßen erklären. Es findet ein Impulsaustausch zwischen der dispersen Phase und dem Trägerfluid statt, was zu einer trägeren Reaktion des Trägerfluids führt. Die Tropfen senken durch einen positiven Impulseintrag die positiven Geschwindigkeiten auf der Saugseite der Schaufel. Das gleiche geschieht im schaufelnahen Bereich bei der Verzögerung der Strömung.

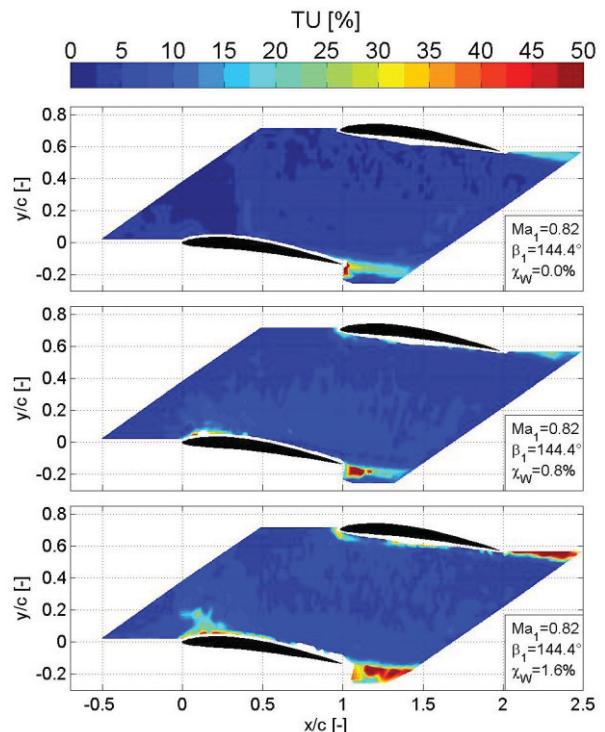


Abbildung 13: Zweiphasenströmung im Designpunkt – Turbulenzgrad (7)

Die Trägheit der Tropfen führt zu einer

stromabwärts verlagerten Verzögerung. Diese Effekte treten in erster Linie nahe der Schaufeloberfläche zu Tage. Zu erklären ist dieser Umstand mit den sich verdichtenden Tropfentrajektorien bei der Schaufelumströmung (8). Die Verdichtung beeinflusst die oberflächennahen Bereiche, während der zentrale Bereich zwischen Druck- und Saugseite unbeeinflusst bleibt.

Abbildung 14 zeigt den Turbulenzgrad in denselben Betriebspunkten. Gemessen werden die Schwankungsgrößen der Geschwindigkeit. Die trockene Strömung weist, mit zwei Ausnahmen, ein weitgehend homogenes Feld im Bezug auf den Turbulenzgrad auf. Stromabwärts des Bereichs höchster Geschwindigkeit und der Nachlauf des Schaufelprofils sind von erhöhter Turbulenz geprägt. Mit steigender Wasserbeladung erhöht sich der Turbulenzgrad in der Nähe der Schaufelvorderkante. Dies entspricht dem Verhalten in der Geschwindigkeitsverteilung. Die Bereiche, die von der Wasserbeladung am meisten beeinflusst werden, weisen den höchsten Turbulenzgrad auf. Die erhöhten Turbulenzwerte lassen sich auf ähnliche Weise erklären.

Eine erhöhte Turbulenz bedeutet eine erhöhte Schwankungsgröße in der Geschwindigkeitsverteilung. Ein gewisser Anteil der Tropfen trifft auf der Schaufelvorderkante auf. Bei entsprechend hohen Geschwindigkeiten zerplatzen diese. Typische Spektren von Sekundärtropfen weisen unter anderem sehr kleine, sehr schnelle Tropfen auf. Die niedrige Temperatur der stark beschleunigten Strömung (im Vergleich zum Beruhigungskammeraustritt) verhindert ein sofortiges Verdampfen der Tropfen, welche somit als Störungsgröße die Strömung beeinflussen. Darüber hinaus kommt es im Bereich der Schaufelvorderkante zu einer relativ starken Umlenkung der Strömung. Der aus der Umlenkung resultierenden Strömung quer zur Hauptströmungsrichtung folgen die kleinen, somit wenig tragen, Tropfenbruchstücke. Dies hat einen erhöhten Impulstransfer quer zur Hauptströmungsrichtung und somit eine erhöhte Turbulenz zur Folge. Ein weiteres, stark beeinflusstes Gebiet ist der Nachlauf der Schaufel. Es zeigt sich ein stark erhöhter Turbulenzwert bei steigender Wasserbeladung. Die auf der Schaufel auftreffenden Tropfen verbleiben zum Teil auf der Schaufel und fließen in Richtung Schaufelhinterkante. Eine gleichzeitige Konglomeration der Tropfen führt zu größeren Wasseransammlungen auf der Schaufel. Bei Erreichen einer bestimmten Größe lösen sich Teile dieser Ansammlungen ab und werden in den Nachlauf transportiert.

10. ZUSAMMENFASSUNG

Das Laboratorium für Strömungsmaschinen an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg ist im Besitz

einer Versuchsanlage, die in der Lage ist Hochgeschwindigkeitsströmungen, speziell im Zusammenhang mit Axialverdichtern, zu untersuchen. Es besteht die Möglichkeit, Hochgeschwindigkeitsströmungen bis in den Überschallbereich hinein zu erzeugen. Des Weiteren kann eine Zweiphasenströmung realisiert werden. Mit der bis ins Detail validierten Wandgrenzschichtbehandlung wird eine 2D-Analyse der Strömung sichergestellt. Der in Kürze realisierte Umbau der Versuchsanlage erweitert diese Möglichkeiten um eine stufenlose Verstellung des Anströmwinkels, was die Vermessung des gesamten Arbeitsbereichs ermöglicht. Erste Messergebnisse haben gezeigt, dass die zur Verfügung stehende Messtechnik in der Lage ist, das gesamte Spektrum der interessanten Daten aufzunehmen und plausible Werte liefert.

11. AUSBLICK

Die Messkampagnen werden in Zukunft ausgeweitet werden. Ziel ist die Beurteilung des Arbeitsbereiches von Axialverdichterschaufeln im Zusammenhang mit einer Zweiphasenströmung. Ein nächster Schritt ist die Ausweitung der Untersuchungen auf transsonische Strömungen, wie sie in hochbelasteten Verdichtergittern auftreten.

12. LITERATUR

1. **Emery, J.C., et al.** *Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-Series compressor blades at low speeds, Report 1368.* s.l. : Technical Report, NACA, 1958.
2. **Ulrichs, E. und Joos, F.** *Experimental investigations of the influence of water droplets in compressor cascades.* s.l. : ASME Turbo Expo, 2006. GT2006-90411.
3. —. *PDA and PIV measurements in a two-phase flow transsonic cascade wind tunnel.* s.l. : The 17th Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, 2004.
4. **Albrecht, H.-E., et al.** *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques.* s.l. : Springer, 2003.
5. **Eisfeld, T. und Joos, F.** New boundary layer treatment methods for compressor cascades. *Proceedings of the European Turbomachinery conference ETC8.* 2008.
6. **Strazisar, A.J., et al.** *Compressor stall control through end wall recirculation.* s.l. : Proceedings of ASME Turbo Expo, 2004. GT2004-54295.
7. **Eisfels, T. und Joos, F.** Experimental investigation of the aerodynamic performance of a linear axial compressor cascade with water droplet loading. *ASME Turbo Expo 2010 accepted paper.* 2010.
8. **Köller, U.** *Entwicklung einer fortschrittlichen Profilsystematik für stationäre Gasturbinenverdichter.* Köln : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 1999. Forschungsbericht 1999-20.
9. **Oertel, H.** *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre.* s.l. : Vieweg + Teubner, 2008. ISBN 978-3834804303.