

ERZEUGUNG DEFINIERTER QUERWIRBEL IN EINER GESCHLOSSENEN MESSSTRECKE

D. Hahn, P. Scholz, R. Semaan, R. Radespiel (Institut für Strömungsmechanik, Bienroder Weg 3 38106 Braunschweig, Deutschland);
R. Müller-Eigner (Hyperschall und Strömungstechnik GmbH, Max-Planck Str. 19, 37191 Katlenburg-Lindau, Deutschland)

Zusammenfassung

Die folgende Veröffentlichung beschreibt den Entwurf, die Auslegung und Qualifizierung eines Böengenerators für Windkanalversuche. Der Böengenerator wurde für die Erzeugung von definierten zweidimensionalen Querwirbeln in einer geschlossenen Messstrecke konzipiert. Es wird beschrieben welche Auslegungskriterien relevant für die Konstruktion und seine Verwendung sind und in welchem Umfeld der Böengenerator operiert. Es werden die erzeugten Wirbel charakterisiert und ihr Durchgang durch die Messstrecke beschrieben. Die vorgestellten Messdaten wurden mittels Particle Image Velocimetry (PIV), einer eigens entwickelten zeitauflösenden Fünflochsonde und Servo-Motor-Positions-Überwachung erhoben. Der Böengenerator ist in der Lage, reproduzierbare Einzelwirbel und Wirbelfolgen zu erzeugen. Es wurden Wirbel erzeugt, welche induzierte Strömungswinkel von $\varphi = 5^\circ$ der Kanalströmung überlagerten. Die Konvektionsgeschwindigkeit der Wirbel entsprach dabei der Kanalgeschwindigkeit.

1. EINLEITUNG

Flugzeuge bewegen sich vor allem während der Start- und Landephase in einer atmosphärischen, turbulenten Grenzschicht, deren Störungen eine hohe Bandbreite besitzen und weitestgehend dreidimensional sind. Will man die Hochauftriebssysteme von Flugzeugen besser auf diese kritischen Flugphasen hin konzipieren, ist es sinnvoll Wechselwirkungen zwischen den auftretenden atmosphärischen Strömungsphänomenen, sowie der Flugzeugumströmung zu verstehen.

Profile in turbulenter Umgebung kann man auf verschiedene Arten untersuchen. So ist es möglich, das zu untersuchende Profil selbst zu bewegen, um turbulente Umströmung zu kreieren (z.B. Hubschrauberrotoruntersuchungen [8]), oder auch Turbulenz vor dem zu Untersuchenden Profil gezielt zu erzeugen (Turbulenzgitter [12], bewegliche Flügel, Klappen [7], [2]).

Innerhalb des DFG geförderten Forschungsvorhabens „Simulation des Überziehens von Tragflügeln und Triebwerksgondeln“, FOR 1066, werden die Wechselwirkungen atmosphärischer Störungen mit Tragflügeln und Triebwerksgondeln untersucht. Um hochwertige Validierungsdaten zu erzeugen und zu vermessen, wurde am Institut für Strömungsmechanik der TU-Braunschweig zur Untersuchung in einem Niedergeschwindigkeits-Windkanal ein zweidimensionaler Böengenerator zur Erzeugung von zeitlich, räumlich und in ihrer Ausprägung definierte Querwirbel konzipiert und qualifiziert. Konstruktion und Bau des Bewegungsapparates erfolgte durch die Firma Hyperschall und Strömungstechnik GmbH Katlenburg-Lindau. Längerfristiges Ziel ist es den Einfluss der erzeugten Böen auf das Überziehverhalten eines Hochauftriebsprofils [4] zu untersuchen (BILD 1).

Der Böengenerator besteht aus einem beweglichen symmetrischen Profil, welches durch Änderung seines Anstellwinkels eine veränderliche Zirkulation erzeugt. Die Differenz der am Profil erzeugten Zirkulation schwimmt in Form einer sich auflösenden Scherschicht mit der Kanal-

strömung ab. Angestrebt war es dabei, der Kanalströmung induzierte Strömungswinkel von $\varphi = 5^\circ$ zu überlagern.

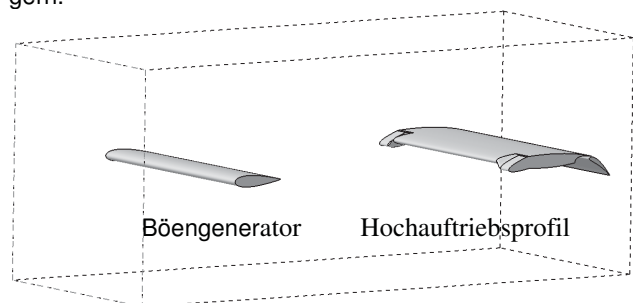


BILD 1. Prinzipskizze der vorgesehene Anordnung von Böengeneratorprofil und Hochauftriebsprofil im Windkanal

Diese Veröffentlichung beschreibt den Böengenerator und Untersuchungen des aerodynamischen Verhaltens in einer leeren Messstrecke.

2. AUSLEGUNG DES BÖENGENERATORS

Zu Beginn der konstruktiven Auslegung bedarf es einer Definition der Anforderungen an das Aggregat. Erst dann ist eine Entscheidung über das physikalische Prinzip, mit welchem diese Anforderungen in geeigneter Weise erfüllt werden können, möglich.

Sinnvoll erschien im geschilderten Fall das Erzeugen von zweidimensionalen Querwirbeln in einer geschlossenen Messstrecke. Die Idee war dabei eine handhabbare, generische Modellbildung von Einzelereignissen atmosphärischer Turbulenz umzusetzen. Um in der Lage zu sein, Überlagerungseffekte von Grundströmung und Störungen an Tragflügelprofilen deterministisch beschreiben zu können, war es Ziel ausschließlich Geschwindigkeiten in Strömungsrichtung und vertikal dazu zu erzeugen. Zweidimensionale Querwirbel haben in einer geschlossenen Messstrecke zudem den Vorteil, dass Seitenwandeinflüs-

se symmetrisch auf die Kanalmitte wirken und somit im Mittelschnitt eine quasi zweidimensionale Strömung zu erwarten ist. Eine zweidimensionale Strömung wiederum kann als erster Iterationsschritt zur Erfassung der Strömungsverhältnisse im Windkanal relativ einfach numerisch simuliert werden.

Auch am zukünftig zu untersuchenden Hochauftriebsprofil wurden, wie in BILD 1 zu sehen, Maßnahmen getroffen, um den Seitenwandeinfluss zu reduzieren und damit die Zweidimensionalität der Flügelumströmung zu verbessern. Die eingesetzten Droop-Noses verhindern dabei ein durch die Wandgrenzschicht verursachtes Ablösen des Hochauftriebsprofils in der Messstrecke ohne Böengenerator [4], [13]. Diese Maßnahme erlaubt die Untersuchung eines, bezogen auf den Messstreckenquerschnitt, relativ großen Modells in einem Windkanal mit geschlossener Messstrecke.

2.1. Auswahl des physikalischen Prinzips

Möglichkeiten zur Erzeugung definierter Störungen in einer Strömung lassen sich wie folgt in zwei grundsätzliche Kategorien einteilen.

Zum einen passive Methoden zur Strömungsbeeinflussung, wie z.B. das statische Einbringen von Zylindern, Gittern und Ähnlichem. Mit Hilfe dieser Vorrichtungen ist es zumindest im statistischen Mittel gut möglich, definierte Wirbel bestimmter Größe und Ausprägung zu generieren. Zum anderen hat man die Möglichkeit, mittels aktiver Maßnahmen, wie z.B. Einblasen von Querströmungen, oder dem Einbringen bewegter Teile, Wirbel bzw. definierte Störungen, einer stationären Grundströmung zu überlagern.

Um mit passiven Maßnahmen gut definierte, transiente Strukturen zu erzeugen, muss man Instabilitäten nutzen, z. B. eine von Kármansche Wirbelstraße. Ein derartiger Aufbau wäre aber invariabel hinsichtlich einer gezielten Variation der Wirbelstärke. Zudem können über Instabilitäten nur Wirbelfolgen mit einer definierten Frequenz erzeugt werden.

Eine Erhöhung des mittleren Turbulenzgrades, wie z. B. in Grenzschichtkanälen für die Gebäudeaerodynamik, über Turbulenzerzeuger, Keile, Zylinder oder ähnliche Störkörper ist in der Vergangenheit erfolgreich umgesetzt worden [3]. Für die vorliegende Fragestellung ist dies jedoch kaum geeignet, da die auf ein Profil wirkenden turbulenten Skalen einer atmosphärischen Grenzschicht erheblich größer sind als die typischerweise von den oben angegebenen Körpern erzeugte Turbulenz. Zudem sind nicht gezielte einzelne, definierte Zustände erzeugbar, sondern die Turbulenz muss statistisch verteilt behandelt werden. Das Einblasen von Querströmung, als gezielte Einbringung von Auf- und Abwinden in eine bestehende Strömung, ist in zeitlich begrenzten Abständen möglich, erfordert aber große Volumenströme, die regelungstechnisch höchste Ansprüche stellen.

Für die gegebene Aufgabenstellung, definierte, einstellbare und reproduzierbare Störstrukturen im Sinne eines induzierten Strömungswinkels zu erzeugen, wurde daher der Aufbau, wie in BILD 2 dargestellt, mit einem im Anstellwinkel verstellbaren Profil gewählt.

Hierbei wird die Zirkulationsänderung des Flügels in einer nachlaufenden Wirbelschicht abgesetzt [9]. Die Zeit Δt in der die Anstellwinkeländerung erfolgt, ist dabei das Stellglied für die räumliche Ausdehnung des erzeugten Wirbels und die Differenz der Anstellwinkeländerung $\Delta\alpha$ beeinflusst die Wirbelstärke [9]. Wird ein symmetrisches

Profil genutzt, ist davon auszugehen, dass positive Anstellwinkeländerungen im Betrag gleiche Wirbel wie negative Anstellwinkeländerungen erzeugen.

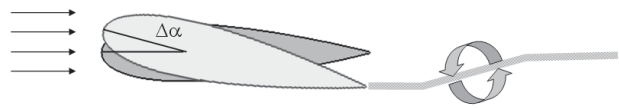


BILD 2. Prinzipskizze der Wirbelerzeugung durch den Böengeneratorschlag

Die Profilkontur sollte möglichst so gewählt werden, dass der unerwünschte, turbulente Nachlauf im angestrebten Anstellwinkelbereich der Profilbewegung klein ist.

2.2. Definition der Anforderungen

Der Böengenerator wurde wie in Abschnitt 1 dargestellt zusammen mit einem Hochauftriebsprofil für Windkanalversuche entworfen. Aus diesem „Tandem“ leiten sich entsprechend die Anforderungen für den Böengenerator und dessen Funktionalität ab.

Angestrebt war es, induzierte Strömungswinkel von $\varphi = 5^\circ$ zu erzeugen. Dieser Wert ergab sich nach Auswertungen von atmosphärischen Daten durch das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover als realistisch für ein sich im Landeanflug befindliches Passagierflugzeug in der freien Atmosphäre [5].

Die Vorauslegung des Böengeneratorprofils, sowie dessen notwendige Bewegungscharakteristik, wurde mittels eines einfachen Potentialströmungsmodells durchgeführt. Dabei ergibt die Betrachtung der Strömungsverhältnisse eine in etwa halb so große induzierte Strömungswinkeländerung am Hochauftriebsprofil, bezogen auf die ausgeführte Anstellwinkeländerung des Böengenerators. Dies gilt für den Fall, dass das Böengeneratorprofil eine halb so große Sehnenlänge wie die räumliche Ausdehnung der abgehenden freien Start- und Stopp-Wirbel hat.

Dieser Zusammenhang wurde gewählt, um ein Böengeneratorprofil mit geringem Massenträgheitsmoment und hoher Steifigkeit zu gewährleisten. Da das zu untersuchende Hochauftriebsprofil bei einer Reynoldszahl von ca. 2×10^6 und einer Kanalgeschwindigkeit von 50 m/s untersucht werden soll, ergibt sich eine Sehnenlänge von 0,6 m. Daraus folgend ergibt sich für eine Auslenkzeit von der Größenordnung 10 ms für $\Delta\alpha = \pm 10^\circ$ eine Sehnenlänge von 0,3 m für das Böengeneratorprofil.

Zu beachten ist ferner, dass in realer Strömung Zirkulation und damit Start- und Stopp-Wirbel nicht bei beliebigen Anstellwinkeln des Böengenerators erzeugt werden können. Der fahrbare Anstellwinkel wurde daher auf $\alpha = \pm 10^\circ$ beschränkt, um eine voll anliegende Profilmströmung zu gewährleisten. Messungen zeigen, dass das gewählte NACA 0021 Profil bei $\alpha = 10^\circ$ Anstellwinkel noch frei von Ablösungen ist [12].

Des Weiteren bestand die Anforderung zeitlich beliebig von einander getrennte Wirbel erzeugen zu können. Aus diesem Grunde war es nicht möglich, einen zyklischen, bzw. stetig bewegten Antrieb zu nutzen, sondern es musste vielmehr jede Bewegung aus dem und in den Stillstand beschleunigt werden. Darüber hinaus sollte gute Reproduzierbarkeit der Verfahrscheinlichkeit und der Verfahrswege erreicht werden. Die tatsächliche Verfahrscheinlichkeit spielte dabei eine untergeordnete Rolle, d.h. eine Regelung erschien nicht zwangsläufig erforderlich. Es sollten jedoch die einzelnen Anstellwinkel-Verfahrswege in hohem Maße reproduzierbar und stabil

über eine hohe Anzahl von Zyklen (> 500) sein. Außerdem musste das tatsächliche Verfahrprofil in jedem Fall bekannt sein (z.B. durch Messung der Winkeländerung am Böengeneratorprofil).

2.3. Strukturelle Auslegung

Die durch die Böenerzeugung geforderte hohe Dynamik verlangt einen Böengenerator mit niedrigem Massenträgheitsmoment auf der einen Seite, andererseits erfordern die sich durch die angreifenden Beschleunigungen ergebenden Kräfte und Momente eine steife Konstruktion. Dieser Widerspruch kann mit konsequenter Leichtbauweise des Böengeneratorprofils gelöst werden. So wurde das Profil des Böengenerators in CFK Sandwich-Schalenbauweise mit einem CFK / GFK Holm ausgeführt. Die Sandwich-Schalenbauweise ermöglicht einen hohen Widerstand gegen Torsion bei geringem Materialeinsatz, wohingegen die Hochmodulfasern der Holmgurte besondere Biegesteife liefern.

In die seitlich das Profil schließenden Holzrippen wurden die weiteren Anbindungen an das Antriebssystem in Form von Stahlblechen aus ST 52 mit eingeschweißten Wellenzapfen, wie in BILD 3 dargestellt, verschraubbar integriert. Die Festlegung der Sehnenlänge des Profils des Böengenerators hatte in der Dimensionierung mittels eines einfachen Kastenmodells zur Folge, dass eine relative Dicke von 21% notwendig wurde. Hierbei spielte nicht die Festigkeitsanforderung bezüglich des Auftriebs die entscheidende Rolle, als viel mehr die Anforderungen bezüglich der Steifigkeit zur Gewährleistung hinreichend hoher Eigenschwingungsfrequenzen für Biegung und Torsion.

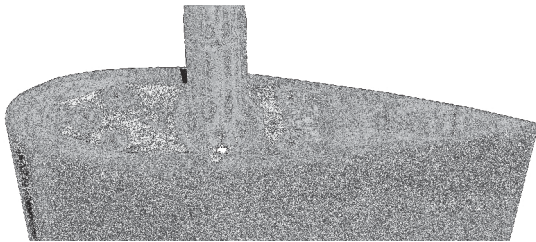


BILD 3. Aufbau des Böengeneratorprofils

2.4. Definition des Antriebskonzepts

Die in Abschnitt 2.2 beschriebene Dynamik in der Änderung des Anstellwinkels des Böengenerators erforderte ein Antriebskonzept mit beachtlichen Beschleunigungsfähigkeiten.

Pneumatische Lösungen boten sich hierfür zunächst an. Die Forderungen nach guter Reproduzierbarkeit und hoher Verfahrengenauigkeit von weniger als $0,1^\circ$ erwiesen sich jedoch sehr früh als Ausschlusskriterium.

Für hydraulische Lösungen erwiesen sich die Schaltzeiten der Ventile, bzw. deren möglichen Durchflussmengen und Rückkopplungseffekte als große Unsicherheiten.

Eine elektrische Lösung kann nur mittels Servomotor erfolgen, um die geforderten Genauigkeiten in den Verfahrwegen zu garantieren. Dieses Antriebskonzept hat die Schwierigkeit, die Massenträgheit des Motors selbst, zusätzlich zu der des Böengenerators zu überwinden. Nach intensiven Vergleichen verschiedenster Linear- und Rotationsmotoren konnte festgestellt werden, dass je kleiner der E-Motor ist, desto größer ist sein relativer Beschleunigungsüberschuss. Hieraus folgt, dass eine Lösung mit mehreren kleinen Motoren ein größeres Be-

schleunigungspotential besitzt, als eine Konstruktion mit wenigen, sehr starken Motoren. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf eine Lösung mit vier Linear-Servo-Motoren des Typs Copley XTA 3806.

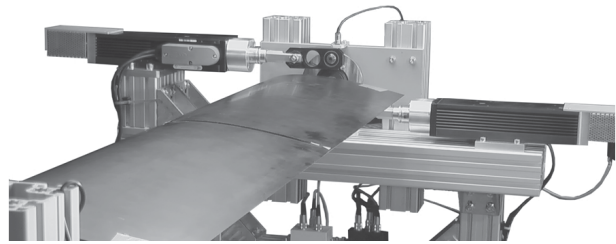


BILD 4. Motoranordnung bzgl. Böengenerator

Die vier Motoren wurden jeweils paarweise gegenläufig auf der rechten und linken Profilseite wie in BILD 4 dargestellt, angeordnet. Diese Anordnung ermöglichte den Verzicht auf aufwendige trägheits- und spielbehaftete Umlenkungen und begünstigte zudem die Schwingungsdämpfung des Systems durch entgegengesetzte Laufrichtungen der Motoren.

Der Einsatz von mehreren Motoren erforderte die Sicherstellung des Gleichlaufs und darüber hinaus sinnvolle Auffangsysteme zur Verhinderung unerwünschter Verfahrzustände. Der Gleichlauf der Motoren ist dabei durch eine Master Slave Steuerung von Hause aus gegeben. Der Master ist dabei ein PC (Steuerkarte) welcher die jeweiligen Verstärker der Motoren als Slaves über CAN Bus anspricht. Die Verstärker liefern ihrerseits ebenfalls via CAN Bus Motorpositions- und Stromdaten mit einer Abtastrate von 3 kHz an den Master zurück.

Als Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässige Belastungen des Leichtbau-Böengenerators, wie z. B. entgegengesetztes Drehmoment der gegenüberliegenden Motorpaare, wurde je Seite zwischen Motorstempel und Profilwelle eine Überlastschutzkupplung des Typs R+W SK1 200 mit 130 Nm Momentenbegrenzung verbaut. Bei Auslösen der Rutschkupplungen trennen Magnetschalter umgehend alle Verstärker vom Strom. Eine Temperaturüberwachung der Verstärker verhindert eine Überlastung der Verstärker und damit der Motoren. Zudem wurde ein mechanischer Anschlag integriert, der den Betrieb des Böengenerators über die zulässigen Anstellwinkel hinaus verhindert. Als letzte Sicherungsvorrichtung gab es sowohl 2 Hardware Not-Aus-Schalter, sowie einen zusätzlichen software-technisch umgesetzten Not-Aus. Die Steuerungs-Software der Motoren wurde mit Hilfe eines entsprechend angepassten LabView Programms umgesetzt. Zusätzlich dienen ein Potentiometer an der Drehachse des Böengenerators, sowie ein Beschleunigungssensor an einem der Motorstempel als Überwachungen der von den Verstärkern gelieferten Daten.

Der gesamte Aufbau des Böengenerators ist vom Kanal entkoppelt und, abgesehen vom Profil, befindet sich der komplette Aufbau außerhalb des Kanals. Der tragende Unterbau wurde sehr steif ausgeführt (vgl. BILD 5). Zu bewegende Massen wurden weitestgehend vermieden, oder in die Drehachse gelegt. Zudem wurden die bewegten Teile im Zusammenbau bzgl. der Drehachse gewuchtet.

3. VERSUCHSAUFBAU

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Aufbau des Böengenerators in der geschlossenen Messstrecke und der in BILD 5 dargestellte Versuchsaufbau beschrieben. Der

Versuch diente der Qualifizierung des Böengenerators und der Optimierung des Betriebs.

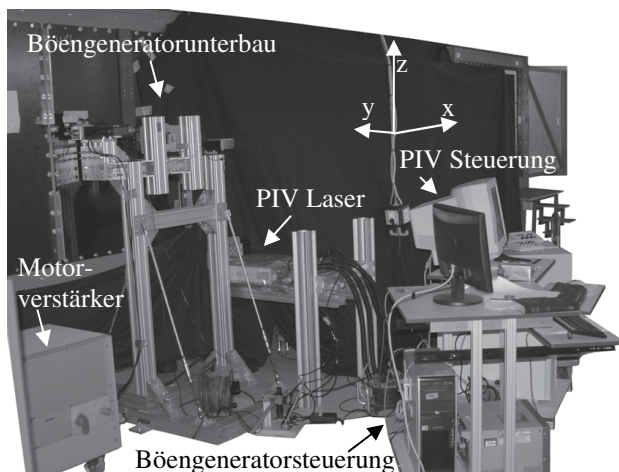


BILD 5. Anordnung des Versuchsaufbaus am MUB

Der genutzte Modell Unterschall Windkanal Braunschweig (MUB) ist ein Windkanal Göttinger Bauart mit geschlossener, atmosphärischer Messstrecke der Abmessung $1,3 \times 1,3 \times 6 \text{ m}^3$. Den Antrieb des Windkanals mit einem Turbulenzgrad von 2 ‰ übernimmt ein 300 kW Gleichstrom Motor, was eine Strömungsgeschwindigkeit von maximal 53 m/s zulässt. Ein Wärmetauscher in der Beruhigungskammer ermöglicht den kontinuierlichen Betrieb des Kanals bei ca. 10 K über Umgebungstemperatur. Um die Aufdückung der Wandgrenzschichten zu kompensieren, verfügen die Decke und der Boden des Kanals über einen Öffnungswinkel von $0,2^\circ$. Diese Maßnahme garantiert konstanten statischen Druck in der gesamten leeren Messstrecke [1].

Der Böengenerator war ca. 1600 mm stromab der Düse in die Messstrecke eingebaut. Im Windkanal selbst war der Böengenerator mit einem kleinen Spalt zwischen Wand und Profil eingebaut, um eine reibungsfreie Auslenkung zu gewährleisten.

Die Entwicklung der durch den Böengenerator erzeugten Störung in x- und z-Richtung über die Messstreckenlänge wurde mit Standard-PIV an 3 Stellen im Mittelschnitt des Kanals vermessen.

- *Schnitt 1* spannte dabei eine Messebene auf, die sich 100 bis 500 [mm] hinter und um -120 bis 210 [mm] oberhalb der Hinterkante des Böengenerators befand.
- *Schnitt 2* befand sich 1120 bis 1560 [mm] hinter und -150 bis 150 [mm] oberhalb der Böengeneratorhinterkante.
- *Schnitt 3* befand sich 1800 bis 2300 [mm] hinter und -175 bis 175 mm oberhalb der Böengeneratorhinterkante.

Aufgrund des großen auszuleuchtenden Bereichs kamen zwei Litron Nano T Doppelpulslaser (Nd:YAG) mit je 200 mJ Lichtenergie pro Puls, bei 532 nm Wellenlänge und einer Pulslänge von 5-7 ns zum Einsatz. Die Lichtschnitte wurden über Kreuz von unten in den Kanal eingestrahlt. Somit überlappen sich die beiden Lichtschnitte leicht im Mittelbereich. Zur Aufnahme der Bilder wurde eine Kamera vom Typ „LaVision Imager Pro X 11M“ mit gekühltem

CCD Chip, 5 Hz Bildrate und 10,7 Mega Pixel Auflösung in Kombination mit einem Zeiss Macro-Planar T* 2/50 Objektiv genutzt. Aufnahme und Auswertung wurde mit Hilfe der Software „DaVis 7“ der Firma LaVision vorgenommen. In der PIV Auswertung wurden leichte Reflexionen im Bildhintergrund durch Subtraktion des über 300 Doppelbilder der jeweiligen Messreihe gemittelten Bildes beseitigt. Anschließend wurde mit Auswertefenstern der Größe $64 \times 64 \text{ Px}^2$ mit einer Iteration und $32 \times 32 \text{ Px}^2$ mit zwei Iterationen bei 50% Überlappung korreliert. Die Ortsauflösung betrug ca. 2 mm.

Die einzelnen PIV Messungen erfolgten phasenstarr, wozu ein externer Lichtschrankentrigger an einem der Linearmotorenstempel genutzt wurde. Der Zeitabstand zwischen dem Böengeneratorschlag und der Aufnahme der Bilder wurde schrittweise um $\Delta t = 2 \text{ ms}$ variiert, um so das Vorbeiziehen des Wirbels darzustellen.

Als Seeding wurde DEHS mit einem Seedinggenerator mit einer durchschnittlichen Tropfengröße von $1 \mu\text{m}$ [6] in die Beruhigungskammer des Kanals eingebracht.

Die für vergleichende Messungen entwickelte zeitauflösende Fünfflochsonde nach BILD 6 wurde in den PIV Schnitten 1 und 3 in z-Richtung traversiert. Das Besondere an der Sonde ist, dass fünf Kulite XCQ 62 Sensoren kurz hinter der Sondenspitze mit 4,2 mm Kopfdurchmesser verbaut sind und die Sonde unter Berücksichtigung der vorhandenen Rohrgeometrien in der Lage ist, sehr hohe Frequenzen bis zu 3 kHz korrekt aufzulösen [10], [11].

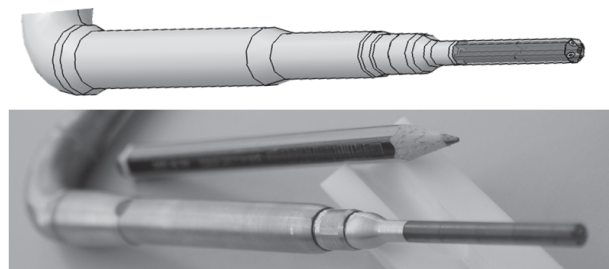


BILD 6. CAD Entwurf und realisierte zeitauflösende Fünfflochsonde

4. POTENTIALE UND GRENZEN DES BÖENGENERATORS

Das Erzeugen von zweidimensionalen Querschnitten in verschiedenen Größen, zeitlichen Abfolgen und verschiedenen Sequenzen ist mit dem nickenden symmetrischen Profil und dem dazugehörigen Antriebskonzept prinzipiell möglich. Im praktischen Test sollten nun die Grenzen der Steuerung des Systems erprobt und die geeigneten Betriebsparameter für die Erzeugung von Böen mit variabler Stärke und Dauer gefunden werden.

4.1. Verfahrscheinlichkeit

Bei den Erprobungsläufen des Bewegungsapparats zeigte sich, dass die Motoren in der vorliegenden Anordnung, je näher sie ihren Beschleunigungsgrenzen kommen, zu steuerungsimpulsiertem Oszillation neigen. Einmal in Oszillation, ist die Motor-Steuerung nicht mehr in der Lage, die Motoren die korrekten Positionen anfahren zu lassen. Ein sehr steifer, im Hallenboden verankerter Unterbau und

dessen exakte Ausrichtung erwiesen sich als wesentlich, um die Leistungsfrequenzen des Bewegungsapparates auszuschöpfen. Über die Motorstromüberwachung war es dabei möglich, die Ausrichtung zu kontrollieren. Schlechte Ausrichtung war gleichbedeutend mit hoher Leistungsaufnahme der Motoren im „Stillstand“, da diese im Fall eines Verzuges im Unterbau ihre vom Master vorgegebene Position gegenläufig ansteuern. Durch exaktes Ausrichten konnte letztlich eine Verfahrensgeschwindigkeit von $\Delta\alpha = 10^\circ$ in 13 ms umgesetzt werden.

Die Steuerung des Antriebssystems besitzt keine Regel Schleife des Beschleunigungsprofils der Motoren. Eine gewünschte Anstellwinkeländerung kann daher nur iterativ eingestellt werden, indem das aus einer eingegebenen Beschleunigungskurve resultierende Verfahrprofil gemessen wird und die Beschleunigungskurve entsprechend verändert wird, bis das gewünschte Fahrprofil vorliegt. So zeigte sich, dass unterschiedliche Optimierungen der Steuerparameter in Richtung Systemstabilität, bzw. hohe Beschleunigung, mit geändertem Verhalten der Verfahrprofile einher gingen. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Steuerung eine gewisse Anzahl von ca. 70 Zyklen benötigte, um sich auf ein konstantes zyklisches Verfahrprofil einzuschwingen. Der danach eingeschwingene Zustand wurde allerdings sehr gleichförmig über viele Zyklen ausgeführt, wie in BILD 7 zu sehen ist.

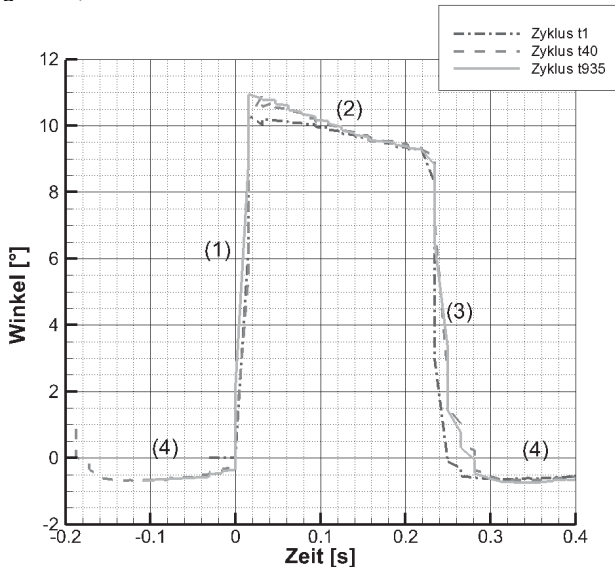


BILD 7. Einschwingverhalten des Verfahrprofils des Bewegungsapparates

In den in BILD 7 dargestellten Fällen bestand ein vorgegebener Zyklus aus einer positiven Anstellung des Böengenerators innerhalb von 15 ms (1), einer anschließenden Pause (2) von 0,2 s, dem Abschlag (3) in 15 ms und einer 0,2 s langen Pause (4) vor dem nächsten Zyklus. Die Einstellung brachte sehr kurze Zeiten für die Nickbewegung selbst, gepaart mit einer relativ langen Zeit für die Erreichung der Zielposition bei hoher Reproduzierbarkeit. Dargestellt sind der Zyklus t1, der den ersten gefahrenen Zyklus der Reihe markiert, sowie t40 und t935, die die Zyklen zu den Zeiten $t = 40$ s und $t = 935$ s darstellen. Der Einfluss des Einschwingens auf die Strömung in der Messstrecke ist in BILD 8 dargestellt. Zu sehen ist der Vergleich von unterschiedlichen Verfahrprofilen des Bewegungsapparates während des Einschwingens und den daraus entstehenden Strömungsgeschwindigkeiten ($v = \sqrt{u^2 + w^2}$) im Nachlauf des sich bewegenden Böengenerators in Schnitt 1. Die Messungen wurden phasenstarr

durchgeführt. In Graustufen ist die Geschwindigkeitsverteilung der ersten 100 Nickbewegungen dargestellt, die gestrichelt-gepunkteten Linien repräsentieren alle 600 Zyklen, die durchgezogenen Linien die Zyklen 100 bis 600.

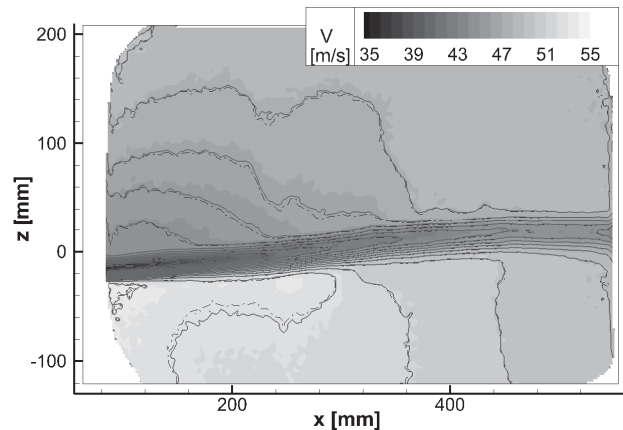


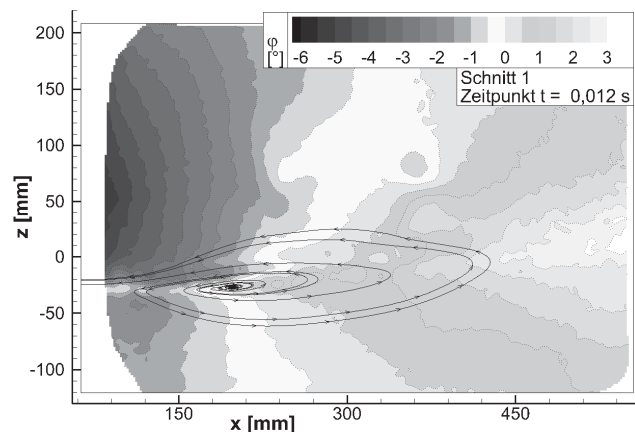
BILD 8. Vergleich der Strömungsantwort auf unterschiedliche Verfahrprofile

Die ersten 100 Zyklen unterscheiden sich von den folgenden sowohl im Verfahrprofil des Bewegungsapparates, als auch in der Strömungsantwort. Im Folgenden wurde daher jeweils die Stabilisierung der Nickbewegung abgewartet, bevor mit weiteren Messungen begonnen wurde.

4.2. Wirbelcharakteristik

Für die Untersuchungen der durch den Böengenerator erzeugten Störungen wurde der in Abschnitt 4.1 beschriebene Verfahr-Zyklus verwendet.

BILD 9 zeigt den erzeugten Querwirbel und dessen Transport in den drei zuvor genannten Auswerteschnitten. Ursprung des hierfür genutzten Koordinatensystems ist die Hinterkante des Böengenerators bei $\alpha = 0^\circ$. Dargestellt sind zur besseren Illustration des Wirbels eine Anzahl von Stromlinien, die aus einem Strömungsfeld berechnet wurden, dessen Geschwindigkeit in x-Richtung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von $\bar{u} = 50$ m/s reduziert wurde. Die Graustufen zeigen die durch den Wirbel induzierten Strömungswinkel ϕ aus den Geschwindigkeitskomponenten der x-z Ebene. Es wird deutlich, dass der Wirbel sich mit zunehmender Lauflänge aufrollt. Die induzierten Strömungswinkel bilden sich analog zum Wirbelaufrollen in der Strömung mit zunehmender Lauflänge deutlicher aus.



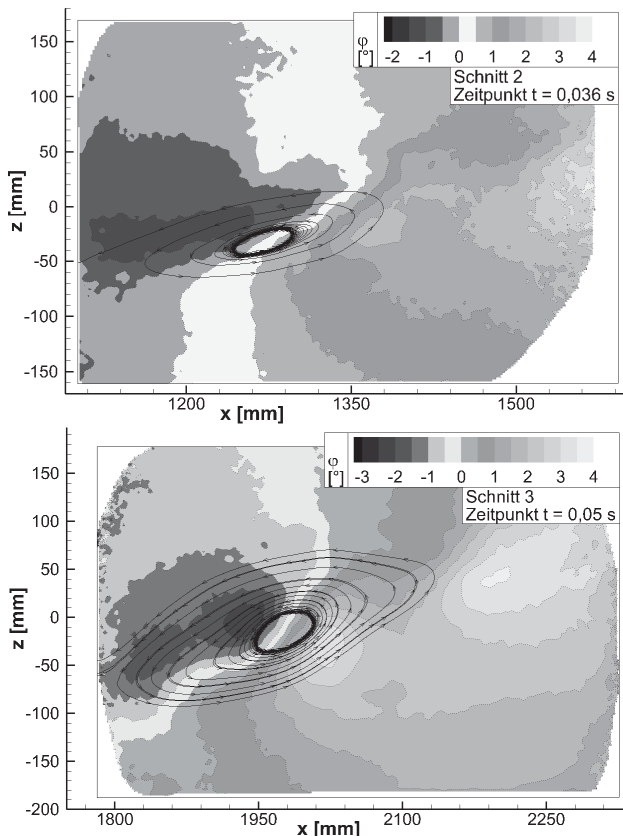


BILD 9. Induzierte Strömungswinkel ϕ in der x - z Ebene in den Messschnitten 1, 2, 3 zu den Zeitpunkten $t = 12, 36, 50$ ms nach Nickbeginn des Böengenerators

Die Transportgeschwindigkeit des Wirbels in der Messstrecke wurde mittels der gemessenen phasenstarrten PIV Zeitschritte innerhalb der Auswerteschnitte auf die mittlere Kanalgeschwindigkeit von 50 m/s bestimmt.

4.3. Vergleichsmessungen

Zusätzlich zu den phasenaufgelösten PIV-Messungen wurden Vergleichsmessungen mit der zeitauflösenden Fünflochsonde durchgeführt. Der Vergleich der erhobenen Messdaten ergab gute Übereinstimmung.

Mit der Fünflochsonde wurden Messungen in den Messschnitten 1 und 3 bei ca. 260 mm und 2100 mm hinter und 100, 75, 50, 25, 0 [mm] über und unter der Böengenerator-Hinterkante bei $\alpha = 0^\circ$ Böengeneratorausschlag durchgeführt. BILD 10 zeigt exemplarisch den Vergleich von PIV Messungen, dargestellt durch Quadrate, in 2 ms Abstand, mit der Fünflochsondenmessung an der Position $x = 260$ mm; $z = 100$ mm während eines Aufschlags. Das im Diagramm dargestellte Dreieck zum Zeitpunkt $t = 0$ s steht für PIV Messungen mit statisch unausgeschlagenem Böengenerator ($\alpha = 0^\circ$), wohingegen das Dreieck zum Zeitpunkt $t = 0,15$ s für statischen Vollausschlag ($\alpha = 10^\circ$) steht. Die dunkle Linie zeigt die über 80 Zyklen Ensemble-gemittelte Fünflochsondenmessung, wohingegen die hellen Linien deren Standardabweichung symbolisieren. In BILD 11 sind die Symbole und Linien entsprechend für die Stelle $x = 2100$ mm, $z = 100$ mm dargestellt.

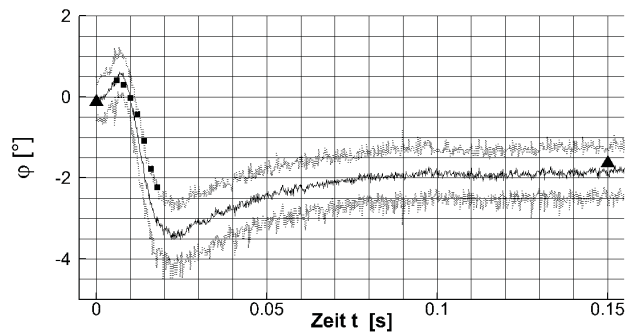


BILD 10. Vergleich der Fünflochsondenmessungen (-) des Winkels ϕ mit PIV-Messungen (■▲) bei $x = 260$ mm, $z = 100$ mm

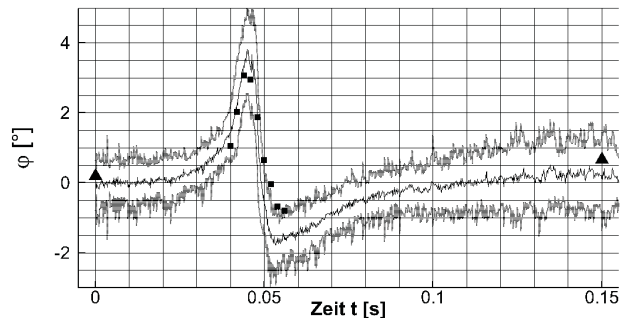


BILD 11. Vergleich der Fünflochsondenmessungen (-) des Winkels ϕ mit PIV-Messungen (■▲) bei $x = 2100$ mm, $z = 100$ mm

Zu sehen ist, dass in beiden Fällen die PIV Messungen innerhalb der Grenzen der Standardabweichungen der Fünflochsonde liegen. Ebenso ist zu sehen, dass sehr ähnliche Absolutwinkel wie auch Gradienten der Winkeländerungen gemessen wurden.

Aus BILD 10 und BILD 11 ist ferner ersichtlich, dass ein positives Anstellen des Böengenerators wie erwartet zunächst einen positiven, gefolgt von einem negativen Winkel in die Strömung induziert. Es wird also erwartungsgemäß ein gegen die Zirkulationsrichtung des Böengenerator-Profiles drehender Wirbel induziert.

Die Übereinstimmung der mit PIV und der Fünflochsonde ermittelten Daten war in aller Regel gut. Starke Abweichungen ergaben sich im Nachlauf des Profils. Prinzipbedingt kann die Fünflochsonde turbulente Fluktuationen mit Korrelationslängen kleiner als die 4,2 mm des Sondenkopfdurchmessers nicht in eine Winkelinformation umsetzen. Derartige Turbulenz führt zu deutlich wahrnehmbaren Rauschen der gemessenen mittleren Winkel, sowie zu einem deutlichen Anstieg der Standardabweichungen. Kleinskalige Turbulenz tritt in gegebenem Fall insbesondere im Nachlaufbereich des Profils auf.

Die in BILD 12 dargestellte Messposition entspricht $x = 260$ mm; $z = -25$ mm. In BILD 13 ist die Messung an vergleichbarer Position stromab dargestellt, $x = 2100$ mm; $z = -25$ mm. Wie schon in den vorangehenden Bildern stehen die dunklen Linien für die über 80 Zyklen Ensemble-gemittelten Fünflochsondenmessungen und die helleren für ihre ermittelte Standardabweichung. Die Dreiecke stehen für $\alpha = 0^\circ$, bzw. 10° statischen Böengeneratorausschlag, die Quadrate für phasenstarr gemessene dynamische Ausschläge in Zeitabständen von $\Delta t = 2$ ms.

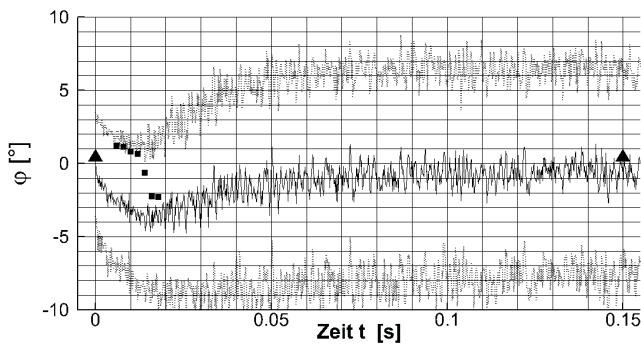


BILD 12. Vergleich der Fünflochsondenmessungen (-) des Winkels ϕ mit PIV-Messungen (■▲) bei $x = 260$ mm, $z = -25$ mm

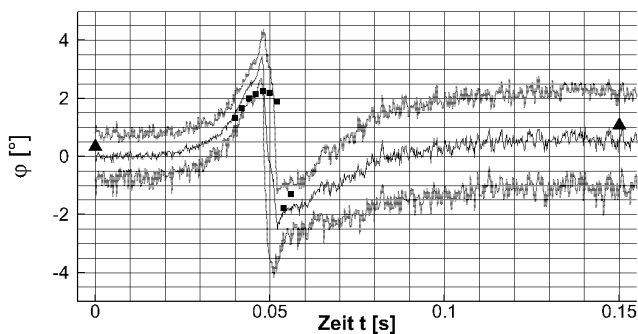


BILD 13. Vergleich der Fünflochsondenmessungen (-) des Winkels ϕ mit PIV-Messungen (■▲) bei $x = 2100$ mm, $z = -25$ mm

Während die PIV Messungen für den dargestellten Vergleichspunkt in Schnitt 1 noch alle innerhalb der Standardabweichung der Fünflochsonde liegen, ist dies für die Punkte in Schnitt 3 dargestellt in BILD 13 nicht mehr für alle Zeitpunkte der Fall. Auch hier besteht die Vermutung, dass das Auflösungsvermögen kleiner turbulenter Strukturen der Messmethode nicht ausreicht. Die Absolutwerte sowie die Gradienten der Winkeländerung werden für die PIV Messungen mit zunehmendem Abstand zum Nachlauf des Profils kongruenter zu den Messungen mit der Fünflochsonde. Diese Hypothese soll mit weiteren Windkanaluntersuchungen untersucht werden.

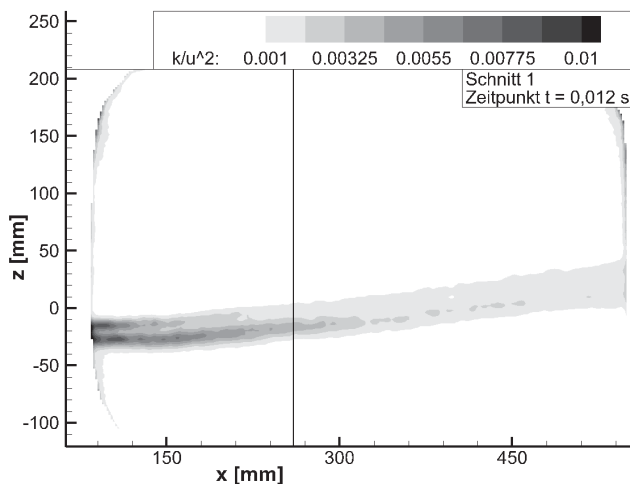


BILD 14. Turbulente kinetische Energie in Schnitt 1 zum Zeitpunkt $t = 0,012$ s

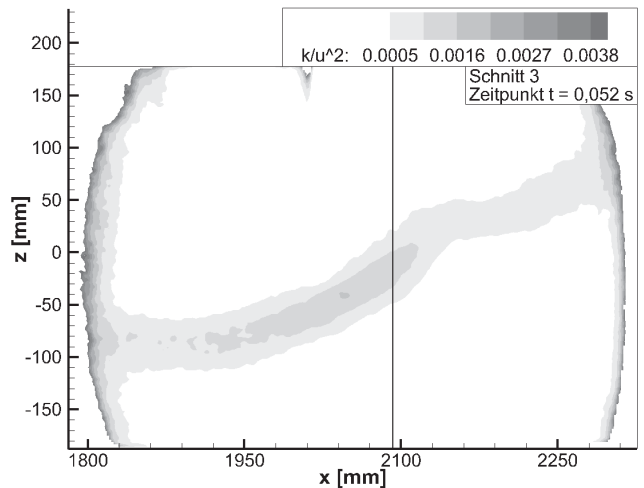


BILD 15. Turbulente kinetische Energie in Schnitt 3 zum Zeitpunkt $t = 0,052$ s

Die Bilder BILD 14 und BILD 15 zeigen die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie und damit den Nachlauf des Böengeneratorprofils. Die schwarzen vertikalen Linien zeigen dabei die x -Position der Fünflochsondenmessungen. BILD 14 zeigt den Schnitt 1 zu einem Zeitpunkt an dem der erzeugte Start-Wirbel die Fünflochsonden-Messposition gerade passiert. BILD 15 zeigt die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie in Schnitt 3 zu vergleichbarem Zeitpunkt bezogen auf die Position des Wirbels innerhalb des Messschnitts.

4.4. Auswertung der Quergeschwindigkeit

Die Auswertung der mit der Fünflochsonde ermittelten Quergeschwindigkeiten v im Mittelschnitt gibt Aufschluss über die horizontale Ausprägung der Böe. Zur Überprüfung der Zweidimensionalität des erzeugten Wirbels sind Messungen in einer Ebene alleine jedoch nicht ausreichend.

In BILD 16 und BILD 17 sind die ermittelten Winkel ψ in der x - y Ebene an den bekannten Messpunkten $x = 260, 2100$ [mm]; $z = 100$ mm und $x = 260, 2100$ [mm]; $z = -25$ mm exemplarisch dargestellt. Mit ψ wird hier der Winkel der in die x - y Ebene projizierten Strömungsgeschwindigkeit bezeichnet. Die dunklen Linien stehen für über 80 Zyklen Ensemble-gemittelte Fünflochsondenmessungen und die helleren Linien für ihre Standardabweichungen.

Es wurden sowohl in Schnitt 1, also in Profilnähe, als auch 2100 mm nur sehr kleine mittlere Werte von ψ gefunden. Dieses lässt den Schluss zu, dass die Ausrichtung des Wirbels normal zur Symmetrieebene (x - z) des Windkanalaufbaus verläuft.

Zudem wurde im Nachlauf des Profils eine Tendenz zu erhöhten Werten in der Standardabweichung der ψ Winkels festgestellt. Dies deutet, wie bereits in Abschnitt 4.3 erwähnt, auf erhöhte Turbulenz hin.

Die in BILD 16 und BILD 17 dargestellten Diagramme zeigen in der Tat den Durchzug des Wirbels, dessen Winkel ϕ in BILD 10 und BILD 11 bereits diskutiert wurden. Es ist durchaus bemerkenswert, dass selbst zum Zeitpunkt des Wirbeldurchgangs kaum signifikante Quergeschwindigkeiten und somit auch keine Winkel ψ auftreten. Dies spricht dafür, dass der dargestellte Störwirbel – zumindest im Mittelschnitt – ein ebener Querwirbel ist. Weitere zukünftige spannungsvoll verteilte Messungen sollen die tatsächliche Zweidimensionalität des Wirbels klären.

ren.

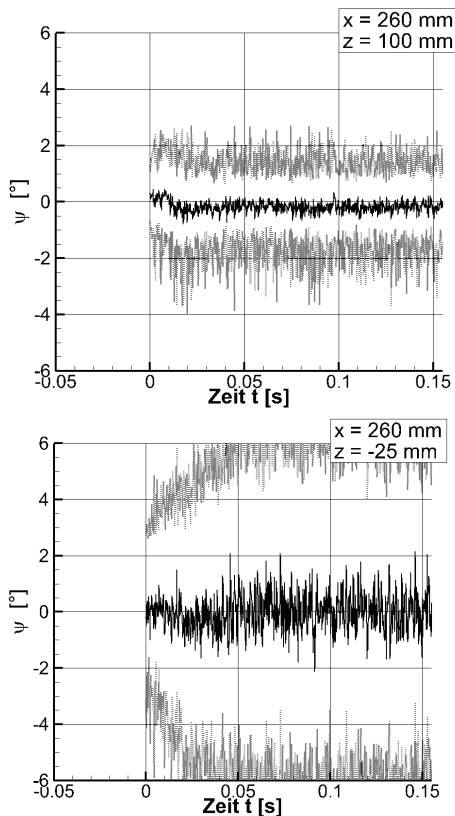


BILD 16. Induzierte Strömungswinkel ψ in der x - y Ebene an der Stelle $x = 260$ mm und $z = 100$ mm, $z = -25$ mm

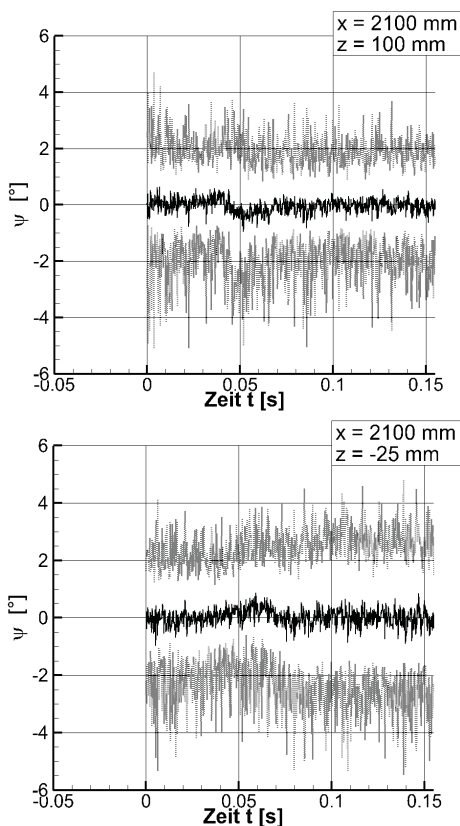


BILD 17. Induzierte Strömungswinkel ψ in der x - y Ebene an der Stelle $x = 2100$ mm und $z = 100$ mm, $z = -25$ mm

5. FAZIT / AUSBLICK

Ein neuer Böengenerator wurde in einem Niedergeschwindigkeitskanal getestet und die damit erzeugten Wirbel qualifiziert. Die gewählten Mittel zur Überwachung der Funktionalität des Böengenerators waren dabei die Motor-Positionen und der Motorstrom, ein Drehwinkel-messer an der Rotationsachse des Böenprofils und ein Beschleunigungssensor an einem der Linear-Servo-Motoren. Zur Qualifizierung der erzeugten Querswirbel wurde die PIV Technik, sowie eine zeitaufauflösende Fünflochsonde verwendet.

Die Messungen zeigten, dass der Böengenerator in der Lage ist, Einzelwirbel reproduzierbar und als Folgen zu erzeugen. Die angestrebte induzierte Strömungswinkel-änderung von $\varphi = 5^\circ$ konnte dabei mit einem Ausschlag des Böengenerators von $\alpha = 10^\circ$ erreicht werden. Die Stärke und Größe der Wirbel und die dazu notwendige Drehgeschwindigkeit des Wirbelgenerators wurden über eine empirische Optimierung der Antriebssteuerung mit $13\text{ms}/10^\circ$ erreicht.

Die Charakteristik der mit diesen Einstellungen erzeugten Wirbel wurde im Mittelschnitt des Windkanals in drei Schnitten vermessen. Es wurden nahe des Böengenerators, 2 m dahinter und dazwischen jeweils 2D2C PIV Messungen phasenstarr durchgeführt, um die Entwicklung der abgeworfenen Wirbel zu dokumentieren. Als komplementäre Messtechnik wurden in zwei Messebenen zusätzlich zeitaufgelöste Messungen mit einer Fünflochsonde vollzogen. Es zeigte sich auch durch diese Messungen, dass der Böengenerator induzierte Strömungswinkel durch Querswirbel bis zu $\Delta\varphi = 5^\circ$ in die Strömung absetzen konnte. Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass der Querswirbel symmetrisch zur Mittelebene des Windkanalaufbaus verläuft.

Darüber hinaus, sind in einer zukünftigen Messreihe mit dem Böengenerator und nachfolgendem Hochauftriebsprofil in der Messstrecke, wie in BILD 1 dargestellt, weitere Messungen bezüglich der Zweidimensionalität und horizontalen Ausrichtung geplant. Ebenso ist eine Untersuchung des Überziehverhaltens des nachfolgenden Profils mit Hochauftriebsklappe geplant. Bei diesen Messungen werden die bisher verwendeten Messmethoden (2D2C PIV und zeitaufauflösende Fünflochsonde) durch zeitaufauflösende statische Druckmessungen auf dem Hochauftriebsprofil ergänzt werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Barlow J.B., Rae W.H., Pope A.: "Low-Speed Wind Tunnel Testing" Wiley-Interscience Publication 1999
- [2] Freymann R.: „Die Böensimulationsanlage des 3m x 3m – Niedergeschwindigkeitskanals der DFVLR in Göttingen“, DFVLR-FB 85-04 1985
- [3] Gromke, C., Ruck, B. „Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen“ 13. GALA Fachtagung 2005
- [4] Hahn D., Scholz P., Radespiel R. „Experimental evaluation of the stall characteristics of a two-element high-lift airfoil“ Second Symposium "Simulation of Wing and Nacelle Stall", Braunschweig, 2010
- [5] Helmke C., Auerswald T., Raasch S., Bange J.: "Comparison of two methods to provide highly resolved atmospheric turbulence data for simulations of

wing and nacelle circulations" Second Symposium "Simulation of Wing and Nacelle Stall", Braunschweig, 2010

- [6] Kähler CJ, Sammler B, Kompenhans J: Generation and control of particle size distributions for optical velocity measurement techniques in fluid mechanics. *Exp. Fluids* 33, pp. 736–742, 2002
- [7] Krag B.: „Vermessung des Böenfeldes hinter harmonisch schwingenden Böenerzeugern im Modell-Unterschall-Kanal <MUK>“ 1982. Forschungsbericht. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt ; 82-26.
- [8] Lee T., Gerontakos P.: „Investigation of flow over an oscillating airfoil”, *Journal of Fluid Mechanics* 2004, Vol. 512, pp. 313-341
- [9] Schlichting H., Truckenbrodt E.: “Aerodynamik des Flugzeuges” Springer Verlag Band 1, 2 1962
- [10] Semaan R., Scholz P. “Pressure correction of five-hole probe measurements using the Wiener deconvolution method” *Experiments in Fluids* Submitted 2011
- [11] Strike J. A., Hind M. D., Saini M. S., Naughton J. W.: “Unsteady surface pressure Reconstruction on an oscillating airfoil using the Wiener deconvolution method” 27th AIAA aerodynamic measurement technology and ground testing conference 06-7.2010 Chicago
- [12] Swalwell K. E., Sheridan J., Melbourne W. H.: “The effect of Turbulence Intensity on stall of the NACA 0021 Airfoil”, 14th Australasian Fluid Mechanics Conference Adelaide Australia 10-14 December 2001
- [13] Wild J., Wichmann G., Haucke F., Peltzer I., Scholz P.: “Large scale separation flow control experiments within the German Flow Control Network”, AIAA-2009-530, 2009