

AUSWERTUNG INSTATIONÄREN WIRBELVERHALTENS ANHAND VON PIV-MESSUNGEN MIT DER METHODE DER ZENTRIERTEN MITTELUNG

ANALYSING UNSTEADY VORTEX BEHAVIOUR THROUGH PIV- MEASUREMENTS USING THE METHOD OF CENTERED AVERAGING

G. Huppertz, F. Zurheide, M. Klaas und W. Schröder

Aerodynamisches Institut Aachen, RWTH Aachen, 52062 Aachen

PIV, Mittelung, Wirbel, Triebwerkstrahl, Interaktion, instationär

PIV, averaging, vortex, engine jet, interaction, unsteady

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Interaktion von Triebwerkstrahlen und Wirbeln im Nachlauf von Flügelmodellen werden PIV-Experimente im Windkanal analysiert. Dazu wird eine Methode zur Mittelung der Daten eingesetzt, welche die Genauigkeit der Auswertungen verbessert und Aussagen zum instationären Wirbelverhalten liefert. Mit Hilfe dieses Mittelungsverfahrens wird gezeigt, dass eine Interaktion von Triebwerkstrahlen und Wirbeln im unmittelbaren Nachlauf von Halbflügelmodellen nachweisbar ist. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Stabilitätseigenschaften von Wirbelsystemen durch die Interaktion mit Triebwerkstrahlen beeinflusst werden.

Einleitung

Da räumlich ausgedehnte Wirbelschleppen von Flugzeugen eine Gefährdung für den Luftverkehr darstellen, wird seit Jahren intensiv in Projekten wie Euro-Wake, WakeNet und FAR-Wake an der Erforschung der Eigenschaften dieser Wirbelsysteme gearbeitet.

Zahlreiche Experimente werden durchgeführt, um die Struktur der Wirbel im Nachlauf, ihre Interaktion, das zeitliche Verhalten und mögliche Einflussfaktoren zu untersuchen. Darüber hinaus werden experimentelle Daten in numerischen Simulationen als Eingangsdaten benutzt. Zum einen dient dies der Verifizierung der unterschiedlichen numerischen Verfahren, zum anderen kann auf diesem Weg die Analyse der Nachlaufströmung bis über den experimentellen Messbereich hinaus ausgedehnt werden. Das Ziel ist die Entwicklung robuster numerischer Verfahren, mit deren Hilfe der Nachlauf von Flugzeugen bis zum Zerfall der Wirbelschleppe zuverlässig berechnet werden kann.

Bei der numerischen Simulation von Wirbelsystemen wird häufig auf bekannte Wirbelmodelle wie denen nach Rankine oder Lamb-Oseen zurückgegriffen. Fabre & Jacquin (Fabre & Jacquin 2004) weisen auf die augenscheinlichen Abweichungen zahlreicher dieser Simulationen gegenüber experimentell ermittelten realen Flugzeugnachläufen hin. Aufbauend auf LIDAR-Messungen im Nachlauf eines Transportflugzeugs formulieren sie ein möglichst realistisches Wirbelmodell mit zwei charakteristischen Radien a_1 und a_2 , welches anhand unterschiedlicher Gleichungen den Wirbelkern, die Außenströmung und den dazwischen liegenden Über-

16.2

gangsbereich modelliert. In diesem mittleren Gebiet ergibt sich eine Abhängigkeit der Tangentialgeschwindigkeit vom radialen Abstand zum Wirbelzentrum $V_t(r) \sim r^{-\alpha}$. Wählt man den Exponenten α dergestalt, dass eine realitätsnahe Wirbelstruktur entsteht, ist das Stabilitätsverhalten des Wirbels extrem sensitiv gegenüber kleinen Änderungen von α . Ähnlich wie Devenport et al. (Devenport et al. 1997) führen sie das Mäandern des Wirbels auf die induktive Wirkung durch das den Wirbelkern umfassende Gebiet zurück und ziehen den Schluss, dass realitätsnahe Wirbelschleppen sehr viel stärker durch kurzweilige Instabilitäten beeinflusst werden als Simulationen mit vereinfachten Wirbelmodellen dies wiedergeben. Für die Stabilitätsanalyse von Wirbelschleppen ist die genaue Vermessung realer Wirbel daher unabdingbar.

Die Analyse der Struktur von Wirbeln anhand experimenteller Methoden ist jedoch schwierig. Untersuchungen von Phillips & Graham (Phillips & Graham 1984) sowie Devenport et al. (Devenport et al. 1997) zeigen anhand von Hitzdrahtmessungen die Bedeutung sowohl eines Jets als auch der Flügelscherschicht für Eigenschaften des Flügelrandwirbels. Trotz aufwändiger Verfahren kann die Struktur von Wirbeln anhand von Hitzdrahtmessungen allerdings nicht vollständig rekonstruiert werden, da punktuelle Messverfahren wie Druck- oder Hitzdrahtsonden keine zeitlich zusammenhängenden Datensätze liefern.

Flächenhafte Messverfahren wie PIV nutzen das Signal zugesetzter Partikel zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Messstrecken experimenteller Einrichtungen und der Tatsache, dass bei Dichteunterschieden zwischen Strömung und Partikeln diese durch Fliehkräfte aus dem Wirbelkern heraus transportiert werden können, sind detaillierte Messungen der Struktur und des zeitlichen Verhaltens von Wirbeln ebenfalls schwierig. In der Regel können geschlossene Vektorverteilungen mit glatten Geschwindigkeitsgradienten nur durch Mittelung über eine große Zahl von Einzelmessungen erreicht werden. Bei aperiodisch instationären Strömungsvorgängen sind phasengetriggerte Aufnahmezyklen nicht möglich, so dass ein Mittelungsprozess in Form einer Ensemble-Mittelung eine resultierende Vektorverteilung mit abgeschwächten Geschwindigkeitsgradienten und überzeichneter räumlicher Ausdehnung der Strömungsstrukturen zur Folge hat.

Die im nachfolgenden Kapitel beschriebene Methode der zentrierten Mittelung zur Auswertung von PIV-Messungen erlaubt die detaillierte Ermittlung der Struktur schlanker Wirbel und des sie umgebenden Strömungsfeldes unter weitgehender Vermeidung der Mittelungsfehler von Ensemble-Mittelungen. Das Mäandern oder Wirbelwandern genannte Bewegungen des Wirbelzentrums in einer Ebene orthogonal zur Hauptströmungsrichtung wird dabei gleichzeitig quantitativ bestimmt. Die Relevanz dieser Zusammenhänge für die Untersuchung von Wirbelschleppen wird anhand einiger Untersuchungsergebnisse in [Huppertz 2006] diskutiert. Zum Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Wirbel-Triebwerkstrahl-Interaktion schreiben Crouch und Spalart 2001: "... however there are additional unknowns related to differences in the wakes behind aircraft in flight The most significant of these unknowns is the potential effect of thrust on the near-field evolution of the multiple vortex system".

Methode der zentrierten Mittelung

Bei der Auswertung über eine Serie von PIV-Bildern werden die berechneten Geschwindigkeiten der einzelnen Datensätze entlang der Zeitachse für gleiche Gitterkoordinaten gemittelt. Dieses Verfahren dient zunächst der Minimierung des resultierenden Fehlers der für jeden Gitterpunkt ermittelten Partikelverschiebung. Ist die vermessene Strömung instationär, repräsentiert das Mittelungsergebnis im resultierenden Datensatz eine Verteilung zeitlicher Mittelwerte, die die instantanen Strömungsstrukturen nicht mehr abbilden. Betrachtet man

einen seiner Struktur nach zeitlich unveränderlichen Wirbel, dessen Position im Beobachtungsgebiet sich zeitlich ändert, führt die Ensemble-Mittelung in diesem Fall zu einer resultierenden Wirbelstruktur, die gegenüber der Struktur des Einzelwirbels innerhalb des Wirbelkerns reduzierte Extremwerte und Gradienten aufweist. Außerhalb des Wirbelkerns sind die gemittelten Werte gegenüber den Originalwerten erhöht, bei ebenfalls reduzierten Gradienten. Die Höhe der Verfälschung ist abhängig von den Gradienten des Originalwirbels, der Ausdehnung des Bewegungsgebiets und der statistischen Verteilung des Wirbels innerhalb dieses Gebietes. Abbildung 1 verdeutlicht anhand von Profilverläufen der Tangentialgeschwindigkeitsverteilungen eines zweidimensionalen Wirbels nach Hallock-Burnham für drei Schwankungsgebiete und zwei Verteilungsfunktionen die Auswirkungen des Ensemble-Mittelungsverfahrens. Die oberste Kurve entspricht dem unverfälschten Ausgangswirbel. Man erkennt, dass mit steigender radialer Amplitude der Wirbelbewegung die maximale Tangentialgeschwindigkeit im Zentrum steigt, am Wirbelrand sinkt und der Wirbelkernradius wächst. Bei den oberen drei Beispielen der Legende handelt es sich um Gauß'sche Verteilungen, bei denen 95 % der Wirbelzentren einen auf den Wirbelkernradius r_C bezogenen absoluten Abstand vom Koordinatenursprung von $|x|/r_C \leq 75 \%$, 100 % bzw. 200 % besitzen. Der Fall „Ring 1 r_C “ stellt den Extremfall der Bewegung des Wirbels auf einer Kreisbahn mit dem Radius r_C dar. In diesem Fall wird die Wirbelstruktur durch die Ensemble-Mittelung drastisch verfälscht.

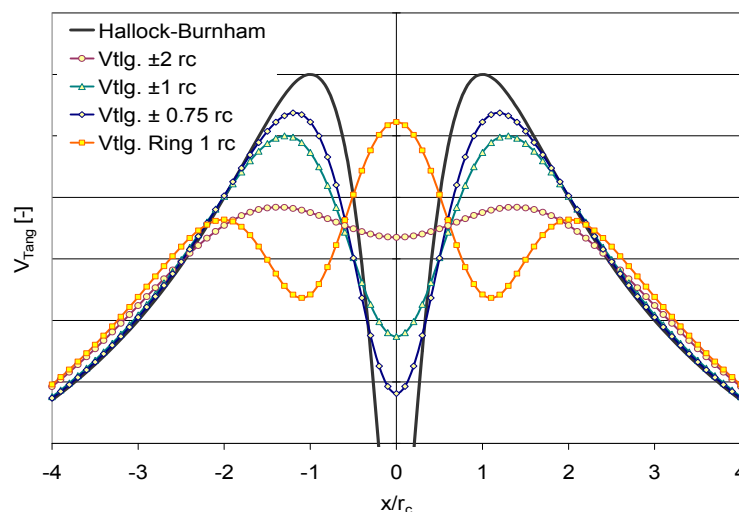


Abb. 1: Normierte Tangentialgeschwindigkeitsprofile einer Ensemble-Mittelung über $n=80$ Datensätze für die Geschwindigkeitsverteilung eines Wirbels nach Hallock-Burnham. Ergebnisse für zwei Verteilungsformen bzw. drei Schwankungsamplituden kleiner gleich $\pm 0,75$ bis $\pm 2,0$ Wirbelkernradien r_C .

Zur Reduzierung des Einflusses der Wirbelbewegung auf das Messergebnis werden bei der zentrierten Methode vor der Mittelung alle Wirbelzentren auf die Koordinate verschoben, die dem Zentrum des resultierenden Wirbels nach einer Ensemble-Mittelung entspricht. Der prinzipielle Unterschied gegenüber der Ensemble-Mittelung wird in Abbildung 2 verdeutlicht.

Zur Bestimmung der Lage des Wirbelzentrums wird in jedem Datensatz mit einem an die durchschnittliche Größe der gemessenen Wirbelkerne angepassten Feld aus $n \times n$ Vektoren das aufsummierte Maximum der Vorticity bestimmt. Die Verwendung eines Summenkriteriums vermeidet Fehler durch Datenlücken, wie sie im Wirbelzentrum durch verminderte Partikeldichte und niedrige Korrelationskoeffizienten zu erwarten sind. Auf Interpolation fehlender Datenwerte, die vollständige Vektorverteilungen in jedem einzelnen Datensatz erzeugen, wird verzichtet. Zur Berechnung der Wirbelstärke wird die Zirkulationsmethode verwendet. Im Vergleich zur Least Squares Methode führt diese zu stärkeren Gradienten, was die Be-

16.4

stimmung des Wirbelzentrums verbessert. Mit der so gefundenen Koordinate erfolgt die Verschiebung auf den Bezugspunkt der Mittelung. Die Genauigkeit der Verschiebung ist umgekehrt proportional zu den Maschenweiten ΔX , ΔY und limitiert auf ± 1 Maschenweite in jeder Koordinatenrichtung, da das Wirbelzentrum jedes einzelnen Datensatzes in der Regel nicht auf einen Gitterpunkt fällt. Ohne Verschiebung jedes einzelnen Datensatzes auf den jeweiligen Wirbelmittelpunkt mit anschließender Interpolation aller Werte auf das gemeinsame Koordinatensystem vor der danach auszuführenden zentrierten Mittelung kann diese Genauigkeit daher nicht gesteigert werden. Dadurch würde aber der Ansatz dieser Methode, die Struktur der Wirbel unverfälscht zu ermitteln, konterkariert.

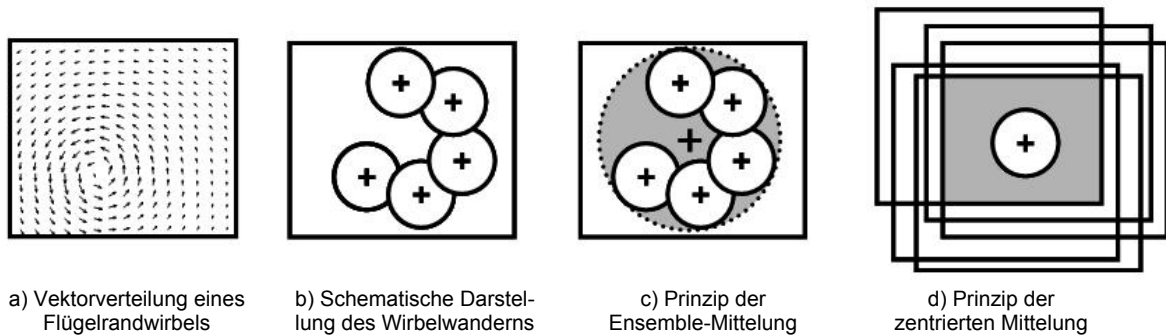


Abb. 2: a) Typische Vektorverteilung eines Flügelrandwirbels; b) schematische Darstellung der Wirbelbewegung. Kreise symbolisieren die Wirbelkerne, Kreuze die Lage der Wirbelzentren; c) Prinzipdarstellung der Ensemble-Mittelung: in dem grau unterlegten Schwankungsgebiet der Wirbelkerne wird über unterschiedliche Strukturteile gemittelt. Das stationäre äußere Strömungsfeld wird unverfälscht wiedergegeben; d) Prinzipdarstellung der zentrierten Mittelung: durch aufeinander positionierte Zentren der Wirbel bleibt die Wirbelstruktur unverfälscht. Für das grau dargestellte äußere Strömungsfeld werden künstlich erhöhte Schwankungsgrößen ermittelt.

Nach der durchgeführten zentrierten Mittelung werden in einem weiteren Durchgang die Schwankungsgrößen und abgeleitete Größen wie Tangentialgeschwindigkeit und Vorticity auf Basis der ermittelten Daten berechnet. Als Nebenprodukt ergibt sich für jeden Datensatz die Information der radialen Ablage des Wirbelzentrums vom Bezugspunkt, dem zeitlich gemittelten Wirbelzentrum. Methodisch bedingt sind die gemessenen Fluktuationen im Bereich des Wirbelkerns niedriger und im äußeren Strömungsgebiet höher im Vergleich zur Ensemble-Mittelung. Diese Tatsache kann man ausnutzen, um die Größe des Gebietes zu ermitteln, das den sich bewegenden Wirbelkern wie ein Puffer zur stationären Außenströmung umgibt.

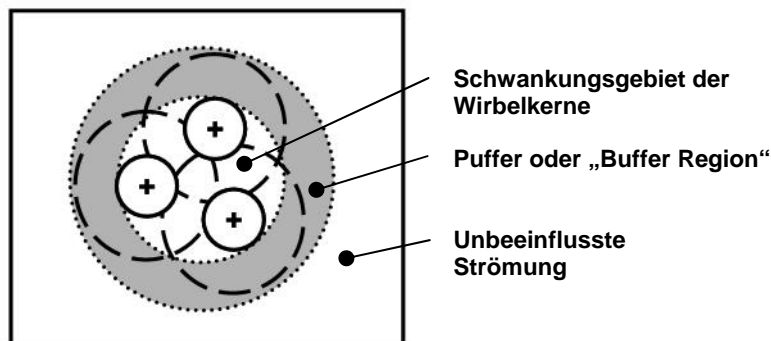


Abb. 3: Schematische Darstellung des Puffers zwischen dem Gebiet der instationären Wirbelbewegung und der Außenströmung

Davon ausgehend, dass der wandernde Wirbelkern in seiner unmittelbaren Umgebung ein deutlich messbares instationäres Strömungsverhalten bewirkt, andererseits in genügend großem Abstand vom Wirbelzentrum dieses instationäre Verhalten nicht mehr nachweisbar ist, also stationäre Strömungsverhältnisse gelten, muss ein Gebiet existieren, in dem eine zeitlich veränderliche Strömungsstruktur den Rand des wandernden Wirbelkerns mit dem Rand des stationären Strömungsbereichs verbindet. Da auch in stationärer Strömung Geschwindigkeitsfluktuationen herrschen, ist eine unmittelbare Bestimmung dieses Pufferbereichs nicht möglich. Bildet man allerdings den Quotienten $R_{Tu} = Tu_{ZM}/Tu_{EM}$ des Turbulenzgrades Tu_{ZM} der zentrierten Mittelung im Verhältnis zu Tu_{EM} der Ensemble-Mittelung erhält man eine Verteilung, die Werte $R_{Tu} < 1,0$ im Bereich des Wirbelkerns und $R_{Tu} > 1,0$ im äußeren Bereich aufweist. Der Grenzfall $R_{Tu} = 1,0$ markiert dabei den Bereich, innerhalb dessen die Fluktuationen im Falle der Ensemble-Mittelung größer sind als die der zentrierten Mittelung. Somit kennzeichnet diese Grenze die Ausdehnung des Puffergebiets, der buffer region. In Abbildung 3 wird diese buffer region durch einen grauen Ring dargestellt, der zwischen dem Aufenthaltsgebiet des Wirbelkerns und der Außenströmung liegt. Die gestrichelten Kreise um die drei eingezeichneten Wirbelkerne stellen den Bereich dar, in dem sich der Gradient der Zirkulation $\partial\Gamma/\partial r$ mit wachsendem Abstand vom Wirbelzentrum verringert.

In Abbildung 3 sind die Strukturen vereinfacht punktsymmetrisch dargestellt. Die Geschwindigkeitsverteilung zwischen Wirbelkern und Pufferrand ist je nach Position des Wirbels unterschiedlich und kann nicht punktsymmetrisch sein. Auch können über eine rein statistische Erfassung momentaner Wirbel-Positionen hinausgehende Aussagen zur Bewegungsform des Wirbels innerhalb des Schwankungsgebiets nur anhand zeitaufgelöster PIV-Messungen getroffen werden. Zusammen mit den ermittelten Strukturdaten des Wirbels können mit der beschriebenen Methode alle Daten gewonnen werden, die prinzipiell zur Generierung handhabbarer instationärer Eingangsdatensätze für numerische Simulationen notwendig sind, siehe Abbildung 4. Für den Bereich der Außenströmung werden die konstanten Werte der Ensemble-Mittelung verwendet. Innerhalb der buffer region wird die durch die zentrierte Mittelung gewonnene Wirbelstruktur zyklisch etwa entsprechend einer gemessenen Trajektorie oder aufgrund anderer Annahmen je Zeitschritt versetzt. Im Bereich zwischen Wirbelkern und Pufferrand muss durch Interpolation ein stetiger Übergang erzeugt werden. Nimmt man vereinfacht eine kreisförmige Bewegung des Wirbels an, bleibt die Struktur des Pufferbereichs konstant und wird insgesamt je Zeitschritt gedreht. Die Erzeugung kleiner Störungen zur Anfachung von Instabilitäten wird neben den gemessenen Fluktuationsgrößen der Außenströmung durch den instationären Prozess innerhalb der buffer region erreicht und basiert somit auf für die jeweilige Untersuchung individuell ermittelten realitätsnahen strömungsphysikalischen Prozessen.

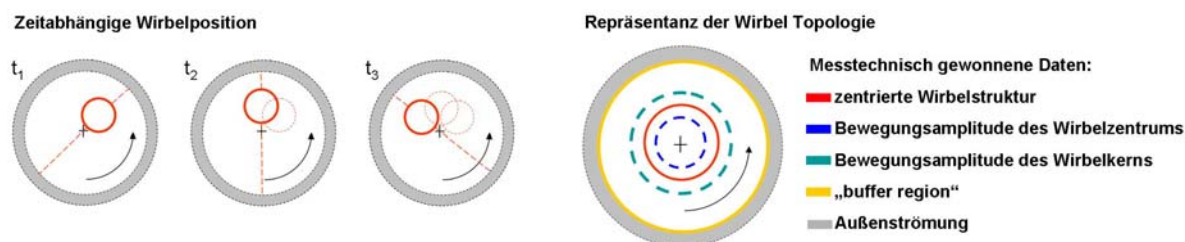


Abb. 4: Schematische Darstellung der mittels des Verfahrens der zentrierten Mittelung ermittelten Parameter eines sich bewegenden Wirbels.

Das nachfolgende Kapitel zeigt einige Ergebnisse bei Anwendung der zentrierten Mittelung auf 3C-PIV-Messungen im Nachlauf eines Halbflügels mit einem in Spannweitenrichtung versetzbaren Modelltriebwerk.

Anwendung der Methode auf PIV-Messungen im Flügelnachlauf

Zur Untersuchung des Einflusses der Flügelscherschicht auf den Flügelrandwirbel wurde im Windkanal des Aerodynamischen Institut Aachen ein orthogonal zur Anströmung orientierter 50 x 80 mm großer Ausschnitt unmittelbar stromab eines Halbflügelmodells mittels 3C-PIV vermessen und anhand der zentrierten Mittelung ausgewertet. Aufgrund des im Vergleich zum Wirbeldurchmesser von ca. 6 mm großen Messgebietes wird die Struktur des Wirbelkerns mit nur sieben Punkten aufgelöst. Der Versuch stellt für die Methode ein „worst case“ Szenario dar, da mit steigender räumlicher Auflösung die Korrektur der Wirbelpositionen in den Datensätzen an Genauigkeit zunimmt und die Effizienz der Methode steigt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse der verschiedenen Mittelungsverfahren bei Testfällen mit bzw. ohne Flap und Slats am Halbflügel („mFS“ bzw. „oFS“) und bei ein- („mTW“) bzw. abgeschaltetem („oTW“) Triebwerk. Bei den Messungen wird der Triebwerksstrahl bei laufendem Windkanal zu- oder abgeschaltet und die Auswertung erfolgt mit jeweils identischen Parametern. Unterschiedliche Messergebnisse sind daher auf strömungsphysikalische Ursachen zurückzuführen.

Für den in Abbildung 5 dargestellten Vergleich der Tangentialgeschwindigkeitsprofile V_{Tang} durch das Wirbelzentrum ergibt die zentrierte Mittelung eine gegenüber der Ensemble-Mittelung auf 84% reduzierte Geschwindigkeit im Zentrum. Am Wirbelkernrand steigt die maximale Umfangsgeschwindigkeit um 4,6 %, was einer Differenz von mehr als 0,8 m/s entspricht. Als Amplitude der Wirbelbewegung wurde $r/r_c = 62\%$ ermittelt. Das Versuchsergebnis entspricht qualitativ wie quantitativ den Erwartungswerten aufgrund der theoretischen Verläufe in Abbildung 1. Dort beträgt das Defizit der maximalen Tangentialgeschwindigkeit der Ensemble-Mittelung 6,4 % bzw. 11,1 % gegenüber dem originalen Hallock-Burnham-Wirbel bei Schwankungsamplituden von $r/r_c = 75\%$ bzw. 100 %. Die Asymmetrie des gemessenen Geschwindigkeitsprofils ist durch den laufenden Aufrollprozess der Flügelscherschicht in den Wirbel bedingt, zu erkennen in Abbildung 7.

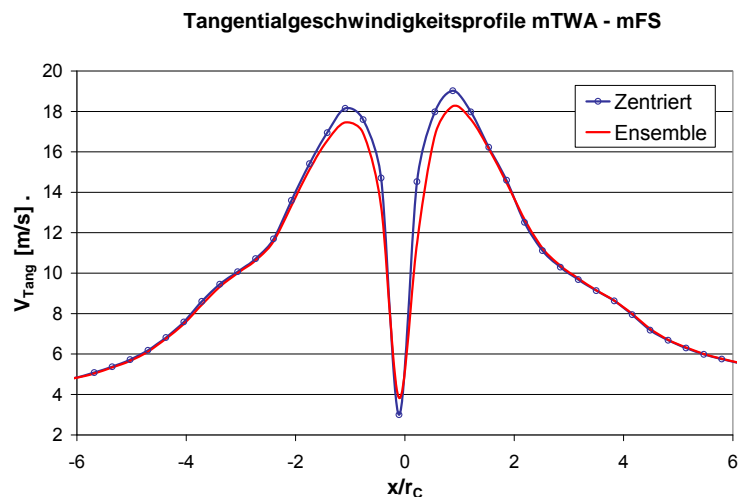


Abb. 5: Vergleich der Tangentialgeschwindigkeiten entlang eines Schnittes durch das Wirbelzentrum für die beiden diskutierten Mittelungsmethoden.

Die obere Zeile der Abbildung 6 zeigt für den Testfall aus Abbildung 5 die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit um die Wirbelachse. Geschwindigkeiten oberhalb eines Wertes von $V_{\text{Tang}} = 18$ m/s sind weiß dargestellt, um die räumliche Ausdehnung des Mittelungseffekts zu verdeutlichen. Aufgrund der gestiegenen Gradienten und der höheren Umfangsgeschwindigkeiten steigt der Wert der maximalen Wirbelstärke gegenüber der Ensemble-

Mittelung um 16 %, dargestellt in der unteren Zeile des Bildes. Vergleicht man die rechte Spalte des Bildes mit den anderen beiden, erkennt man, dass der Einfluss des Triebwerkstrahls auf die Wirbelstruktur von gleicher Größenordnung ist, wie der der Mittelungsmethode. Zur Analyse der Auswirkung des Triebwerkstrahls auf die Wirbelstruktur ist die zentrierte Mittelung daher wesentlich besser geeignet als eine Ensemble-Mittelung.

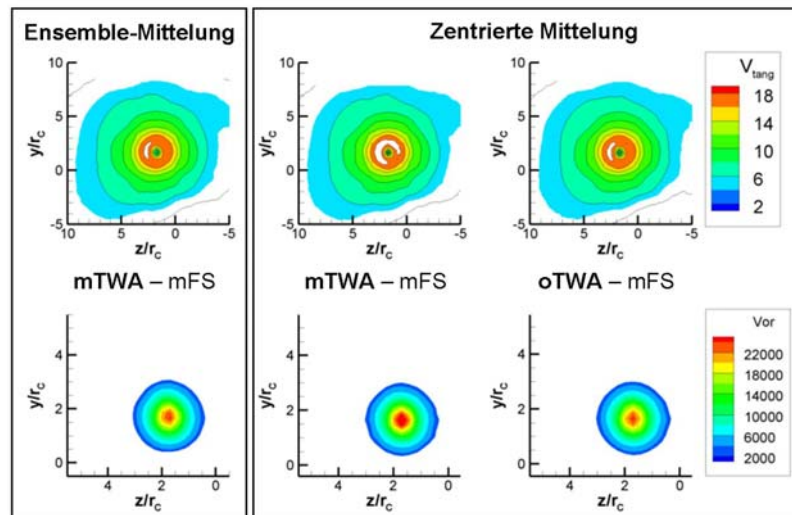


Abb. 6: Vergleich des Einflusses der Mittelungsmethoden und des Triebwerkstrahls auf die resultierende Wirbelstruktur des Flügelrandwirbels bei Hochauftriebskonfiguration.

Die beiden Verfahren ergänzen sich jedoch bei der Untersuchung der Auswirkung der Triebwerkstrahl-Wirbel-Interaktion auf das instationäre Wirbelverhalten bzw. die Fluktuationsgrößen. Für fünf verschiedene Testfälle ist in Abbildung 7 der per Ensemble-Mittelung berechnete globale Turbulenzgrad dargestellt. Das Quadrat an der Spitze des rechts abgebildeten Flügels verdeutlicht den Messbereich, in dem der äußere Rand des spiralförmigen Flügel-nachlaufs und der Flügelrandwirbel zu sehen sind. Man erkennt deutlich die Auswirkung der Parameter Triebwerkslage, Strahlbetrieb und Flügelkonfiguration auf die Höhe der Geschwindigkeitsschwankungen sowohl im Nachlauf als auch im Bereich des Wirbelkerns.

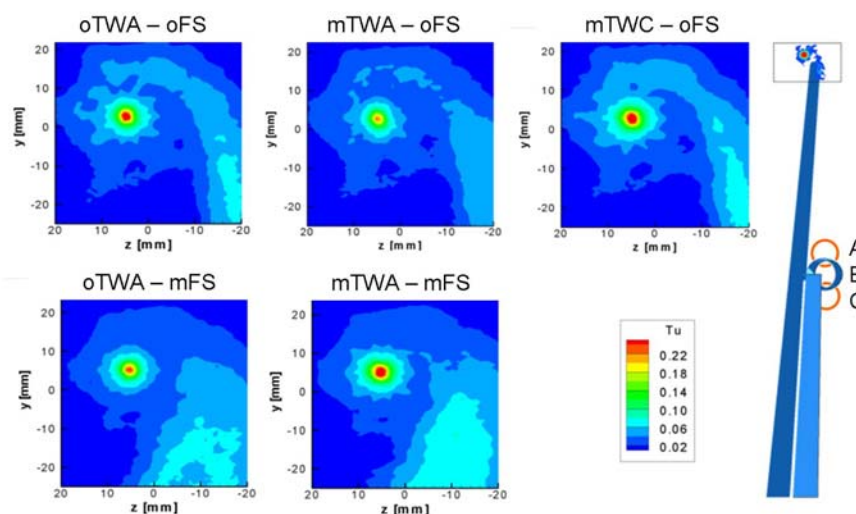


Abb. 7: Turbulenzverteilungen verschiedener Testfälle im Nachlauf eines Halbflügels

16.8

Dividiert man die Turbulenzdaten beider Verfahren miteinander, erhält man eine Verteilung entsprechend der rechten Seite von Abbildung 8. Die gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen Werten größer bzw. kleiner dem Einheitswert. Zum einen ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsschwankungen im Wirbelkern durch die zentrierte Mittelung gegenüber der Ensemble-Mittelung deutlich gesunken sind. Dies stellt das eigentliche Gütekriterium bei der Beurteilung des Erfolgs der zentrierten Mittelung dar. Je besser das Verfahren unter den gegebenen Rahmenbedingungen funktioniert, desto geringer werden die Werte des Quotienten bzw. der Fluktuationsgrößen im Wirbelkern. Bei den hier vorgestellten Testfällen sinken die rms- und Schwankungswerte um bis zu 50%. Bei höherer räumlicher Auflösung des Wirbels steigen diese Werte an. Zum anderen kann man am Verhältnis der Fluktuationswerte die Größe der buffer region ablesen, in der die instationäre Wirbelbewegung gepuffert wird. Im ausgewählten Beispiel beträgt die Ausdehnung dieses Puffers ca. 6 Wirbelradien und ist damit ein Vielfaches größer als die Schwankungsamplitude des Wirbels.

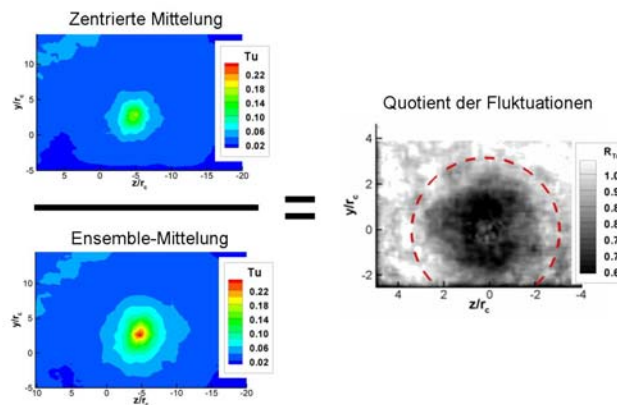


Abb. 8: Bestimmung der buffer region und Effizienzkontrolle anhand des Quotienten der Turbulenzwerte. Die rechte Farbskala ist zur besseren Darstellung des Wirbelzentrums limitiert auf $R_{Tu} \geq 0,6$.

Schlussfolgerung

Die zentrierte Mittelung verbessert signifikant die Untersuchung der Strukturen mäandernder Wirbel und ihres instationären Verhaltens. Bei Anwendung der Methode auf PIV-Messungen kann die Interaktion von Triebwerksstrahl und Wirbel im Nachlauf von Tragflügeln nachgewiesen werden. Die mittels der zentrierten Mittelung gewonnenen Daten vereinfachen die Generierung von Eingangsdatensätzen für instationäre numerische Simulationen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Teilprojekts A5 des Sonderforschungsbereichs 401, aus dem diese Ergebnisse stammen.

Literatur

- Phillips, W.R.C., Graham, J.A.H., 1984: "Reynolds-Stress measurements in a turbulent trailing vortex", J. Fluid Mech., vol. 147, pp.353-371
- Devenport, W.J., Zsoldos, J.S., Vogel, C.M., 1997: "The structure and development of a counter rotating wing-tip vortex pair", J. Fluid Mech., vol. 332, pp. 71-104
- Fabre, D., Jacquin, L., 2004: "Short-wave cooperative instabilities in representative aircraft vortices", Physics of. Fluids, vol. 16, no. 5, pp. 1366-1378
- Huppertz, G., Schroeder, W., Klaas, M., 2006: "Engine Jet/Vortex Interaction in the Near Wake of an Airfoil", AIAA-2006-3747
- Crouch, J.D., Miller, G.D., Spalart, P.R., 2001: "Active-Control System for Breakup of Airplane Trailing Vortices" AIAA J., vol. 39, pp. 2374-2381