

NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER INSTATIONÄREN AERODYNAMIK EINES 3-DIMENSIONALEN DYNAMISCHEN FLÜGELSCHLAG-MODELLS MITTELS FSI UND PIV

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE UNSTEADY AERODYNAMICS BEHIND FLAPPING WINGS USING FSI AND PIV

¹ Sebastian Ruck, ² Michael Tischmacher

¹ Institut für Strömungslehre, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Karlsruhe

² Institut für Hydromechanik, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Karlsruhe

Vogelflug, dynamisches Flügelschlagmodell, FSI, PIV
Avian Flight, Flapping Wings, FSI, PIV

Zusammenfassung

Im Gegensatz zum Insektenflug existieren bis heute nur wenige Modelle des dynamischen Vogelflugs die sich zur quantitativen sowie qualitativen Analyse der auftretenden strömungsmechanischen Effekte eignen. Aus diesem Grund wurde ein orts- und zeitabhängiges 3-dimensionales Flügelschlagmodell entwickelt, das die numerische sowie experimentelle Untersuchung der instationären, turbulenten Aerodynamik des Vogelflugs ermöglicht. Die Strömungsberechnungen des numerischen Flügelschlagmodells erfolgten anhand von partitionierten Strömung-Struktur-gekoppelten (FSI) Simulationen. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen die ganzheitliche Rekonstruktion der 3-dimensionalen, zeitabhängigen Topologie der Strömungsstruktur und erlauben deren detaillierte Beschreibung. Mit Hilfe eines TR-PIV Systems wurden Strömungsfelder im Nachlauf des mechanischen Flügelschlagmodells für korrespondierende Strömungsbedingungen gemessen und mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen verglichen. Aufgrund der Ergebnisse des quantitativen und qualitativen Vergleichs kann das verwendete numerische Modell hinsichtlich der niederfrequenten, makroskopischen Wirbelstrukturen als hinreichend validiert betrachtet werden.

Einleitung

Die Konfiguration der Strömungsstruktur im Nachlauf eines Vogels oder einer Fledermaus hängt stark von der Anströmgeschwindigkeit, der Schlagfrequenz, den geometrischen Parametern sowie der Schlagkinematik ab (Tobalske 2003, Oertel 2008). Zur Charakterisierung der Strömungszustände wird zwischen langsamen und schnellen Flug unterschieden, wobei die Relation zur Schlagfrequenz nicht zu vernachlässigen ist. Die populärsten Wirbelmodelle der idealisierten Nachlaufströmung von Vögeln sind die des *Ring Vortex Gait* (Rayner 1979(a), 1979 (b)) des *Continuous Vortex Gait* (Rayner 1986, Spedding 1987) sowie die des *Ladder Wake* (Pennycuik 1988). Mischformen sowie intermediäre Wirbelstrukturen wurden für eine Reihe von Vögeln (Spedding 2003, Hedenstroem 2006, Rosén 2004, Henningsson 2008), Fledermäusen (Murijres 2008, Johansson 2008, Hedenstroem 2007) und Insekten (Van den Berg 1997 (a), 1997 (b)) nachgewiesen. Die korrespondierenden 3-dimensionalen Modelle stellen eine idealisierte Nachlaufströmung dar und basieren auf Interpolation von 2-dimensionalen PIV-Messungen. Mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation lässt sich das Nachlaufgebiet ganzheitlich auflösen und ermöglicht eine detaillierte Beschreibung der Strömungstopologie.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein numerisches und mechanisches 3-dimensionales Flügelschlagmodell entwickelt, das die instationäre, turbulente Aerodynamik des Vogelflugs vereinfacht wiedergibt. Es konnte eine qualitative sowie quantitative Bewertung der instationären Effekte mit Hilfe von FSI-Simulationen und TR-PIV-Messungen erfolgen, die zum einen der Validierung der Numerik dient und zum anderen der Beschreibung der auftretenden Wirbelkonfigurationen beiträgt.

Modellierung

Das Modell beinhaltet einen starren Modellkörper und ein bewegliches Flügelpaar. Die Flügelkinematik wird durch zwei überlagerte Rotationen bewerkstelligt, wobei der Auf- und Abschlag durch eine Drehung des Flügels um die Flügelrumpfachse erfolgt und die Supination sowie Pronation durch eine Rotation um die mitbewegte Flügellängsachse realisiert wird, siehe Ruck et al. 2010 (a). Der maximale Schlagwinkel beträgt 30° und der Kippwinkel 20° . Eine stufenlos einstellbare Schlagfrequenz von bis zu $f=12$ Hz gewährleistet das Auftreten instationärer Strömungseffekte auch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und erlaubt somit die strömungsmesstechnische Untersuchung für einen großen Reynoldszahlbereich ($16.000 < Re < 50.000$) und für hohe reduzierte Frequenzen ($0,22 < k < 1,00$).

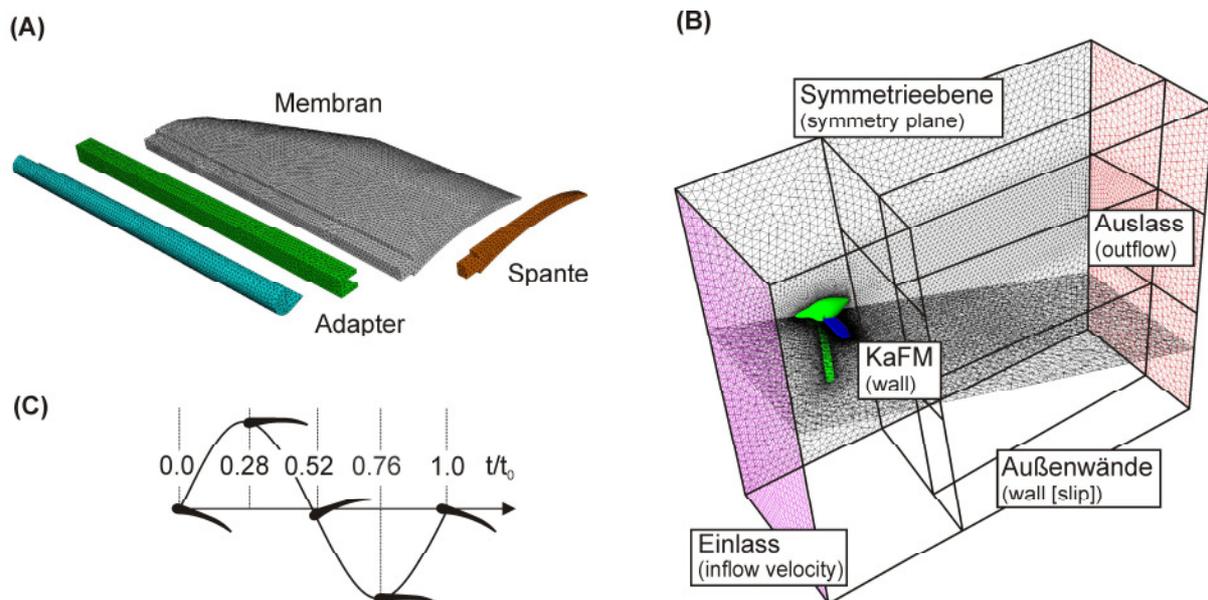


Abb. 1: (A) Strukturmodell, (B) Fluidmodell, (C) Zeitverlauf der Schlagperiode

Für die FSI-Simulationen wurde die Kopplungsbibliothek MpCCI 3.0 (Mesh-based parallel Code Coupling Interface) des Fraunhofer-Instituts verwendet, die standardmäßig eine explizite, serielle Kopplung ermöglicht. Die Verwendung eines partitionierten Kopplungsverfahrens erfordert die jeweilige Generierung eines numerischen Modells des entsprechenden Teilgebiets. Die Rechenggebiete wurden jeweils mit Tetraeder-Zellen diskretisiert. Das Strukturmodell wurde aus $9,6 \cdot 10^4$ Zellen aufgebaut und ist in Abbildung 1 (A) dargestellt. Es besteht aus einem Adapter (Aluminium, $E=70$ GPa, $\rho=2700$ kg/m³), einer Flügelmembran (PUR, $E=2,0$ GPa, $\rho=1190$ kg/m³) und einer Spante (Aluminium, $E=70$ GPa, $\rho=2700$ kg/m³) an der Flügelbasis. Das Materialverhalten wurde als elastisch, isotrop angenommen. Das Fluidmodell repräsentiert den Strömungsbereich und beinhaltet den Modellkörper, die Modellflügel sowie die Modellbefestigung. Unter der Annahme einer symmetrischen Nachlaufströmung bezüglich der modellmittigen, vertikalen Schnittebene in Strömungsrichtung, erfolgt die einseitige, räumliche Generierung des Rechengebiets. Es besteht aus $1,7 \cdot 10^6$ Zellen. Als

$t/t_0=0,00$, $t/t_0=0,28$, $t/t_0=0,52$ und $t/t_0=0,76$ (siehe Abbildung 1 (C)) diskutiert und mit den analog analysierten Ergebnissen der FSI-Simulationen verglichen werden. Die ermittelten Geschwindigkeitsfelder zeigten einen periodischen Verlauf über die Messdauer T_R . Für die Analyse erfolgte die zeitliche Mittelung der Geschwindigkeitsfelder. Hierbei wurden die Geschwindigkeitsverläufe von 40 Schlagzyklen eines jeden Messbereichs verwendet und die phasenbezogenen Mittelwerte für jeden Raumpunkt einer Messebene berechnet. Anhand der räumlichen Bestimmtheit der Messbereiche bezüglich der Orientierung des Flügel-schlagmodells KaFM konnte ein direkter Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe der Experimente mit denen der numerischen Simulation ermöglicht werden.

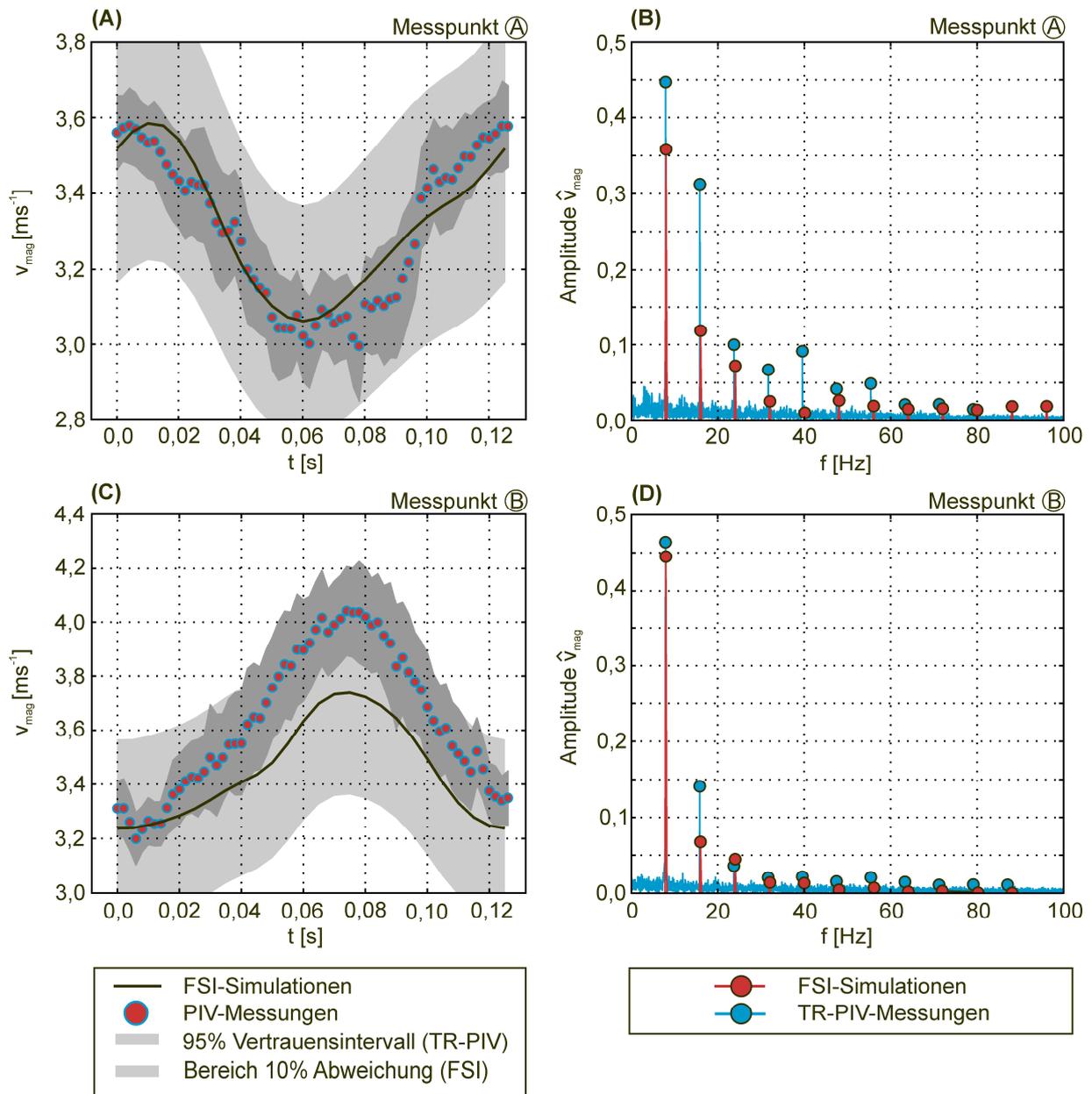


Abb. 3: Geschwindigkeitsbetrag an Messpunkt A und B sowie die korrespondierenden Amplitudenspektren

Abbildung 3 (A) und (C) zeigen die zeitlichen Änderungen des intervall-gemittelten Geschwindigkeitsbetrags v_{mag} für einen Schlagzyklus an den Mittelpunkten der Messbereiche A und B. Die Darstellung der gemittelten Messwerte ist durch die Angabe des entsprechenden 95%-Vertrauensintervalls ($\pm 2.021 \cdot \text{SEM}$) für jeden Zeitschritt ergänzt. Des Weiteren sind die Toleranzbereiche für eine 10%-Abweichung bezüglich der numerischen Ergebnisse be-

stimmt, um die Unterschiede der Kurvenverläufe untereinander besser einschätzen zu können. Ergänzend hierzu erfolgt die Darstellung der korrespondierenden Amplitudenspektren in Abbildung 3 (B) (D). Charakterisiert man die zeitliche Entwicklung des Geschwindigkeitsbetrags anhand der auftretenden globalen Maxima und Minima, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Experiment und Simulation, wobei die Änderungen der Simulationswerte geringer sind. Die Abweichung der Werte entlang der Zeitachse liegt unterhalb von 10%, wobei eine maximale Abweichung des Geschwindigkeitsbetrags von 9,2% erzielt wird. Des Weiteren sind lokale Schwankungen des Geschwindigkeitsbetrags bei den Experimenten zu erkennen, die von den numerisch gewonnenen Ergebnissen nicht abgebildet werden. Diese sind auf das kontinuierliche Ablösen kleinskaliger Wirbelstrukturen am bewegten Flügel zurückzuführen, die aufgrund der höheren räumlichen Auflösung im Experiment gemessen werden konnten. Ihr Auftreten spiegelt sich auch in den Amplitudenspektren der Abbildung 3 (B) (D) wieder. Die Grundfrequenz der Amplitudenspektren beträgt ~ 8 Hz ($f(\text{PIV})=7,9$ Hz; $f(\text{FSI})=8,0$ Hz) und ist sowohl für die Simulationen als auch für die Experimente an allen Messpunkten nahezu identisch. Diese beruht auf dem Auftreten von entgegengesetzt drehenden Wirbelstrukturen im Nachlauf, die aufgrund der Flügelbewegung hervorgerufen werden, und eine Geschwindigkeitsänderung des Strömungsfeldes nach sich ziehen. Die weiteren gekennzeichneten Amplituden stellen die Harmonischen der Grundschwingung dar. Deren Werte fallen mit steigender Frequenz, wobei eine vergleichbare relative Abnahme mit steigender Frequenz im unteren Frequenzbereich auftritt. Für Frequenzen $f > 100$ Hz treten keine weiteren signifikanten Amplitudenänderungen auf.

Für die Generierung der Stromlinienbilder aus den Experimentaldaten wurden die intervallgemittelten Geschwindigkeitsfelder verwendet. Für die Strömungsvisualisierung bietet es sich an, die Geschwindigkeitskomponenten in Anströmrichtung abzüglich ihres instantanen, räumlichen Mittelwertes des entsprechenden Messbereichs zu verwenden. Die zeitliche Mittelung der periodischen Strömung führt zu einem Verschwinden der kleinen Wirbelstrukturen, wenn deren zeitliches Verhalten nicht einem Vielfachen der Grundschwingung entspricht. Ausgehend von den punktuell ermittelten Geschwindigkeitsverläufen erfolgt die Darstellung der Stromlinienbilder für Experiment und Simulation mit einer zeitlichen Toleranz von $\pm 2 \cdot 1/f_R = \pm 0,004$ s. Bezüglich der Anströmgeschwindigkeit ergibt sich somit eine räumliche Toleranzbreite von $\pm 0,0144$ m. Die Darstellung erfolgt zu den Zeitpunkten $t/t_0=0,00$, $t/t_0=0,28$, $t/t_0=0,52$ und $t/t_0=0,76$.

Im Hinblick auf die punktuelle Auswertung der Geschwindigkeitsverläufe wird eine gute Übereinstimmung der Strömungsstrukturen zwischen Experiment und Simulation erwartet. Zum Zeitpunkt $t/t_0=0,00$ wird das Strömungsfeld der FSI-Simulationen des Messbereichs A (Abbildung 4 (A)) durch den Fokus F1 eines positiv (im Uhrzeigersinn) drehenden Wirbels sowie durch den Sattelpunkt S1 bestimmt. Die korrespondierenden Ergebnisse der TR-PIV-Messungen geben vergleichbare Strukturen wieder, jedoch zeigt sich ein weiterer positiv drehender Fokus F2 im unteren Teil des Messbereichs A. Anhand der Analyse des gesamten Strömungsbereichs lassen sich die Fokuse F1 einander zuordnen. Der Wirbel mit dem Fokus F2 wird im Messbereich B fortgesetzt (Abbildung 5 (B)). Zum Zeitpunkt $t/t_0=0,28$ hat der Fokus F1 den Messbereich A verlassen (TR-PIV und FSI). Im unteren linken Bildbereich ist eine entgegengesetzt drehende Wirbelstruktur durch den Fokus F3 abgebildet. Dieser bewegt sich aufgrund der Strömung von links nach rechts durch den Messbereich (vergleiche $t/t_0=0,52$) und wird zum Zeitpunkt $t/t_0=0,76$ anhand der nach unten gerichteten, positiv drehenden Stromlinien angedeutet. Aufgrund der periodischen Nachlaufströmung lassen sich die entgegengesetzt drehenden Stromlinien am linken Rand des Messbereichs einer weiteren Wirbelstruktur zuordnen, die zum Zeitpunkt $t/t_0=0,00$ mit der des Fokus F1 zusammenfällt. Die Stromlinienbilder des Messbereichs B (Abbildung 5) zeigen eine ähnlich gute Übereinstimmung der Strömungsstrukturen wie in Messbereich A. Zum Zeitpunkt $t/t_0=0,00$ ist ein Knotenpunkt K1 zu erkennen. Des Weiteren deutet der Fokus F2 die Struktur eines Wirbels im oberen Teil des Messbereichs an, wobei die Drehrichtung positiv ist (vergleiche Fokus F1 in Abbildung 4 (A)-(B)). Der experimentell ermittelte Wirbel mit dem Fokus F2 wird

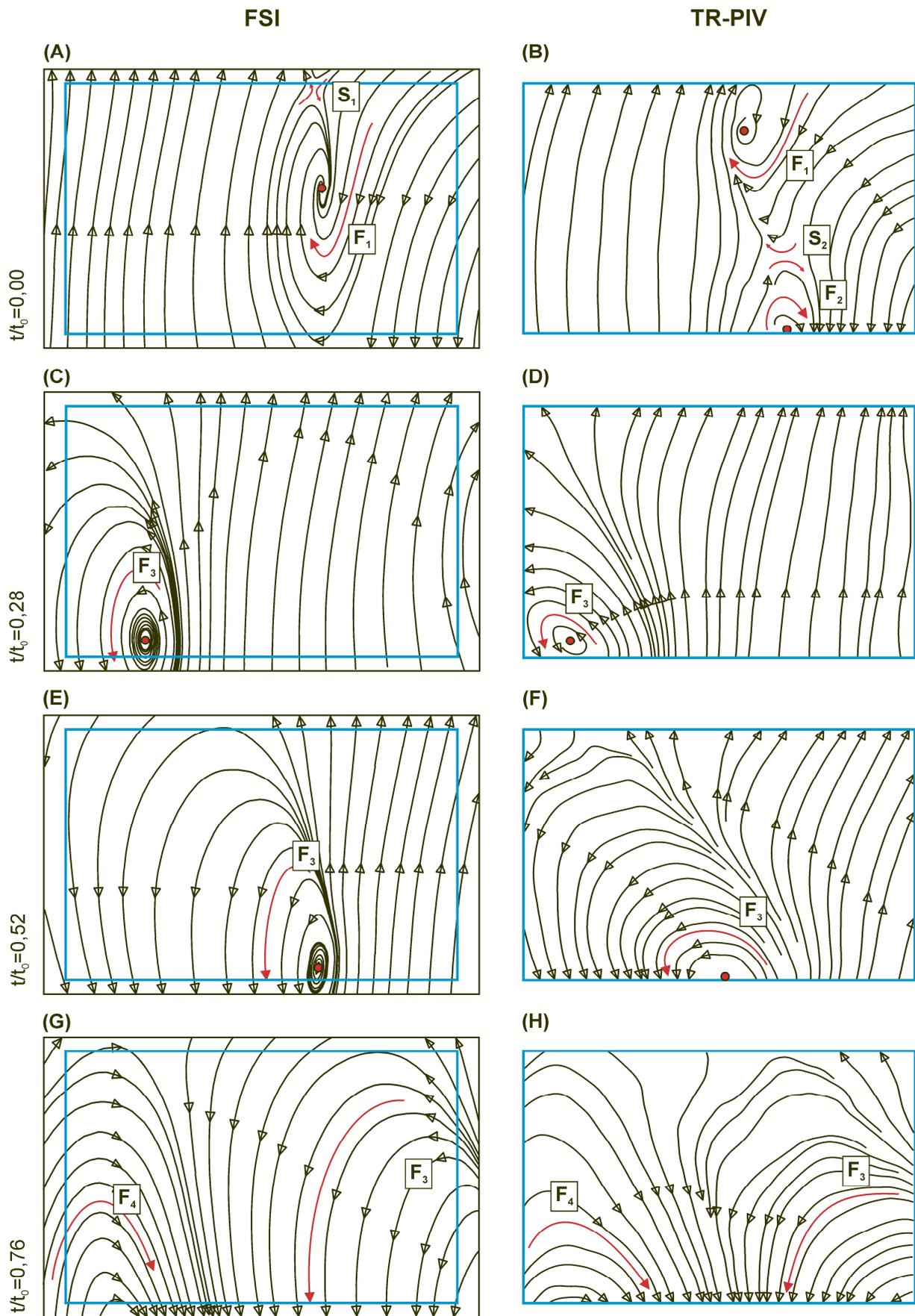


Abb. 4: Stromlinien des Messbereichs A

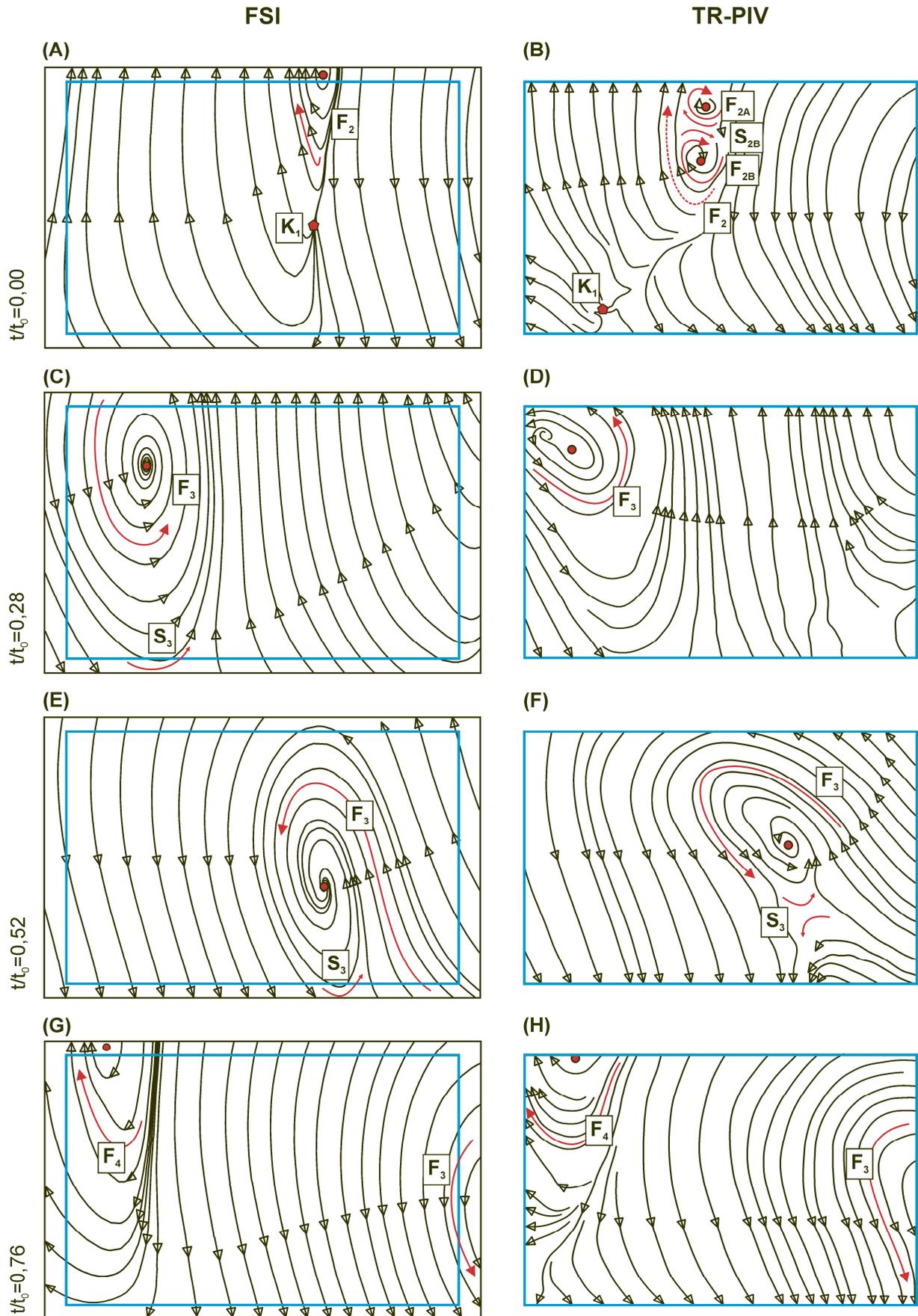


Abb. 5: Stromlinien des Messbereichs B

durch das Auftreten der Fokusse F2A und F2B im Wirbelinneren beeinflusst. Im weiteren Verlauf zerfällt der Wirbel mit dem Fokus F2 aufgrund der gegenläufigen Bewegung der Fokusse F2A und F2B. Zum Zeitpunkt $t/t_0=0,28$ und $t/t_0=0,52$ ist die räumlich fortgesetzte Wirbelstruktur (Fokus F3) aus Messbereich A (Abbildung 4 (C)-(F)) zu erkennen. Der Drehsinn ist ebenfalls negativ. Während die räumliche Anordnung des Fokus F3 gut in Experiment und Simulation übereinstimmt, weichen die relativen Anordnungen bezüglich des Sattelpunktes S3 von einander ab. Die am linken Rand des Messbereichs A angedeutete Wirbelstruktur um den Fokus F4 ($t/t_0=0,76$) ist in Messbereich B eindeutig wiederzufinden.

Zusammenfassung

Trotz der hohen Komplexität der Experimente und der numerischen Simulationen zeigen die ermittelten Geschwindigkeitsverläufe sowie die 2-dimensionalen Strömungsstrukturen über weite Bereiche für die Strömungskonfiguration der reduzierten Frequenz $k=0,67$ eine sehr gute Übereinstimmung. Die aufgrund der Flügelschlagbewegung induzierten Wirbelstrukturen sind sowohl in den FSI-Simulationen, als auch in den TR-PIV-Messungen zu finden, und stimmen hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Entwicklung gut überein. Die Schwankungen der Strömungsgrößen sind auf eine Vielzahl von Einflussfaktoren zurückzuführen und werden im Folgenden zusammengefasst:

- Bei den numerischen Simulationen werden Symmetrierandbedingungen verwendet. Diese verhindern die Ausbildung von periodischen Strömungsstrukturen quer zur Anströmrichtung. Ablöseinduzierte Geschwindigkeitsänderungen der Nachlaufströmung hinter der Modellbefestigung sowie dem Modellkörper werden nicht wiedergegeben.
- Die räumliche Auflösung der Messungen ist deutlich höher als in den Simulationen. Somit lassen sich Bereiche kleiner Geschwindigkeitsänderungen erfassen, die in den numerischen Simulationen nicht berücksichtigt werden.
- Die zeitliche Mittelung der Messergebnisse vermindert den Einfluss der Strömungsänderungen aufgrund kleiner Wirbelstrukturen.
- Die Interaktion der Strömung mit dem Windkanal und der Messumgebung wurde in den Simulationen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Ergebnisse des quantitativen und qualitativen Vergleichs kann das verwendete numerische Modell hinsichtlich der niederfrequenten, makroskopischen Wirbelstrukturen als hinreichend validiert betrachtet werden.

Literatur

1. Hedenström, A., 2006: "Vortex wakes generate by robins *Erithacus rubecula* during free flight in a wind tunnel", *J. R. Soc. Interface*, 3, No. 7, pp. 263-276
2. Hedenström, A., Johansson, L.C., Wolf, M., Von Busse, R., Winter, Y., Speeding, G.R., 2007: "Bat Flight Generates Complex Aerodynamic Tracks", *Science*, 316, pp. 894-897
3. Menter, F. R., 1994: "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, 32, No. 8, pp. 1598-1605
4. Menter, F.R. Kuntz, M., Langtry, R., 2003: "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4, Begell House, Inc, pp. 625 - 632
5. Murijes, F.T., Johansson, L. C., Barfield, R., Wolf, M., Spedding, G. R., Hedenström, A., 2008: "Leading-Edge Vortex improves Lift in slow-flying Bats", *Science*, 319, pp. 1250-1253
6. Oertel, H. jr., 2008: "Bioströmungsmechanik", Vieweg-Teubner Verlag
7. Pennycuik, C.J., 1988: "On the reconstruction of pterosaurs and their manner of flight, with notes on the vortex wakes", *Biol. Rev.*, 63, pp. 299-331
8. Rayner, J. M. V., 1979 (a): "A vortex theory of animal flight. I. The vortex wake of a hovering animal", *J. Fluid Mech.*, 91, pp. 697-730
9. Rayner, J. M. V. 1979 (b): "A vortex theory of animal flight. II. The forward flight of birds", *J. Fluid Mech.* 91, pp. 731-763
10. Rayner, J. M. V., 1986: "Vertebrate flapping flight mechanics and aerodynamics, and the evolution of flight in bats", *Biona Report 5*; pp. 27-74

11. Rosén, M., Spedding, G.R., Hedenström, A., 2004: "The Relationship between wingbeat kinematics and vortex wake of a thrush nightingale", *J. Exp. Biol.*, 207, pp. 4255-4268
12. Ruck, S., Schenkel, T., Oertel, H., 2010 (a): "Vortex Configuration behind Flapping Wings", *Proceedings BBVIV Symposium, Capri, Italy*
13. Ruck, S., Tischmacher, M., Schenkel, T., Oertel, H., 2010 (b): "Biofluidmechanics of Avian Flight: Recent Numerical and Experimental Investigations", *IFMBE Proceedings World Congress on Biomechanics, Sinapur*
14. Spedding, G. R., 1987: "The wake of a kestrel (*Falco tinnunculus*) in flapping flight", *J. Exp. Biol.* 127, pp. 59-78
15. Spedding, G. R., Rosén, M., Hedenström, A., 2003: "A family of vortex wakes generated by a thrush nightingale in free flight in a wind tunnel over its entire natural range of flight speeds", *J. Exp. Biol.* 206, pp. 2313-2344
16. Tobalske, B., Hedrick, T., Biewener, A. (2003): "Flight kinematics of avian flight across speeds", *Journal of Avian Biology*, 352, pp. 177-184
17. Van den Berg, C., Ellington, C. P., 1997 (a): "The vortex wake of a 'hovering' model hawkmoth", *Phil. Trans. R. Soc. Lond, B* 352, pp. 317-328
18. Van den Berg, C., Ellington, C. P., 1997 (b): "The three dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth", *Phil. Trans. R. Soc. Lond, B* 352, pp. 329-340