

Experimentelle Untersuchung der Wirbelschleppen von Verkehrsflugzeugen in Bodennähe

Experimental Investigation on Wake Vortices of Commercial Aircrafts in Ground Proximity

Jonas Graumann, Dr.-Ing. Andreas Wolter, Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Grundmann

Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

Wirbelschleppen, Bodeneffekte, Endeffekte, PIV, Schleppkanal
wake vortices, ground effects, end effects, towing tank

Zusammenfassung

Wirbelschleppen von Tragflächen stellen für nachfolgende Verkehrsflugzeuge eine Gefahrenquelle dar. Um diesem Problem zu begegnen gibt die Flugsicherung konservativ ausgelegte Sicherheitsabstände zwischen Starts und Landeanflügen vor. Da die konservative Auslegung die Auslastung und somit die Wirtschaftlichkeit von Flughäfen reduziert, gibt es seit Jahrzehnten fortwährende Bestrebungen durch eine tiefgreifende Erforschung des Verhaltens der Wirbelschleppen eine engere Taktung der Flugbewegungen zu ermöglichen (Holzäpfel et al., 2015). In Feldversuchen mit horizontalen Überflügen in Bodennähe wurden die Einflüsse der meteorologischen Umgebungsvariablen sowie das Gewicht der Flugzeuge auf den Verlauf, die Verweildauer sowie die Größe der Wirbel mit LiDAR-Systemen ermittelt. In Wasserschleppversuchen mit konstanter Flughöhe konnte das Verhalten der Wirbel in Abhängigkeit von Bodenhindernissen und Tragflügelanordnungen untersucht werden, womit eine Vergleichsbasis für numerische Berechnungen geschaffen wurde (Bao et al., 2003 und Nelson & Babie, 2005). Simulationen zeigen, dass Hindernisse am Boden den Wirbelzerfall begünstigen und dass es am Boden zum „Ground-Linking“, kommen kann, bei welchem sich die Wirbel der Wirbelschleppe nach der Landung einzeln am Boden ansaugen (Stephan et al., 2014). Dieses „Ground-Linking“ verlängert mutmaßlich die Verweildauer der Wirbelschleppen erheblich. Fraglich ist, ob dieser Vorgang grundsätzlich passiert oder durch verschiedene Einflussparameter begünstigt oder behindert werden kann.

Es bestehen umfangreiche Erkenntnisse zu dem Verhalten, den Lebensdauern und Zerfallsmechanismen von Wirbelschleppen im freien Raum und auch in Bodennähe nach einem horizontalen Überflug. Bisher existieren jedoch nur sehr wenige Untersuchungen zu den Zerfallsvorgängen nach der Landung, bei welcher die am Tragflügel gebundene Zirkulation frei wird und das verbliebene Wirbelsystem zerfällt. Bei diesen sogenannten Endeffekten nach und während der Landung besteht noch großer Forschungsbedarf.

Im Schleppkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock werden daher Versuche mit verschiedenen Flugmanövern in Bodennähe und dort angebrachten Hindernissen durchgeführt. In ersten Messreihen mithilfe von PIV wurden die problembestimmenden Parameter variiert und eine systematische Untersuchung begonnen. Im Folgenden wird die Problematik motiviert, die physikalischen Zusammenhänge erläutert, daraus die experimentelle Vorgehensweise abgeleitet und erste Ergebnisse diskutiert.

Einleitung

Flugzeuge erschaffen in ihrem Nachlauf Wirbelsysteme, deren Verweildauer so groß ist, dass der Luftverkehr auf Flughäfen dadurch stark beeinträchtigt wird. Dies ist eine unvermeidliche Folge des Auftriebs. Durch die verursachten lokalen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten im Strömungsfeld erfährt ein nachfolgendes Flugzeug lokal stark variierende Anströmbedingungen, die vor allem im Start- und Landeanflug die Sicherheit der Passagiere kompromittieren können (siehe Abbildung 1). Es besteht im schlimmsten Fall die Gefahr, dass die Kontrolle über das in eine Wirbelschlepe geratene Flugzeug verloren geht, weil die durch die Wirbelschlepe aufgeprägten Flugzeugbewegungen von den Piloten nicht mehr ausgleichbar sind. Aufgrund dessen gibt die Flugsicherung sehr konservative Sicherheitsabstände im Luftraum vor.

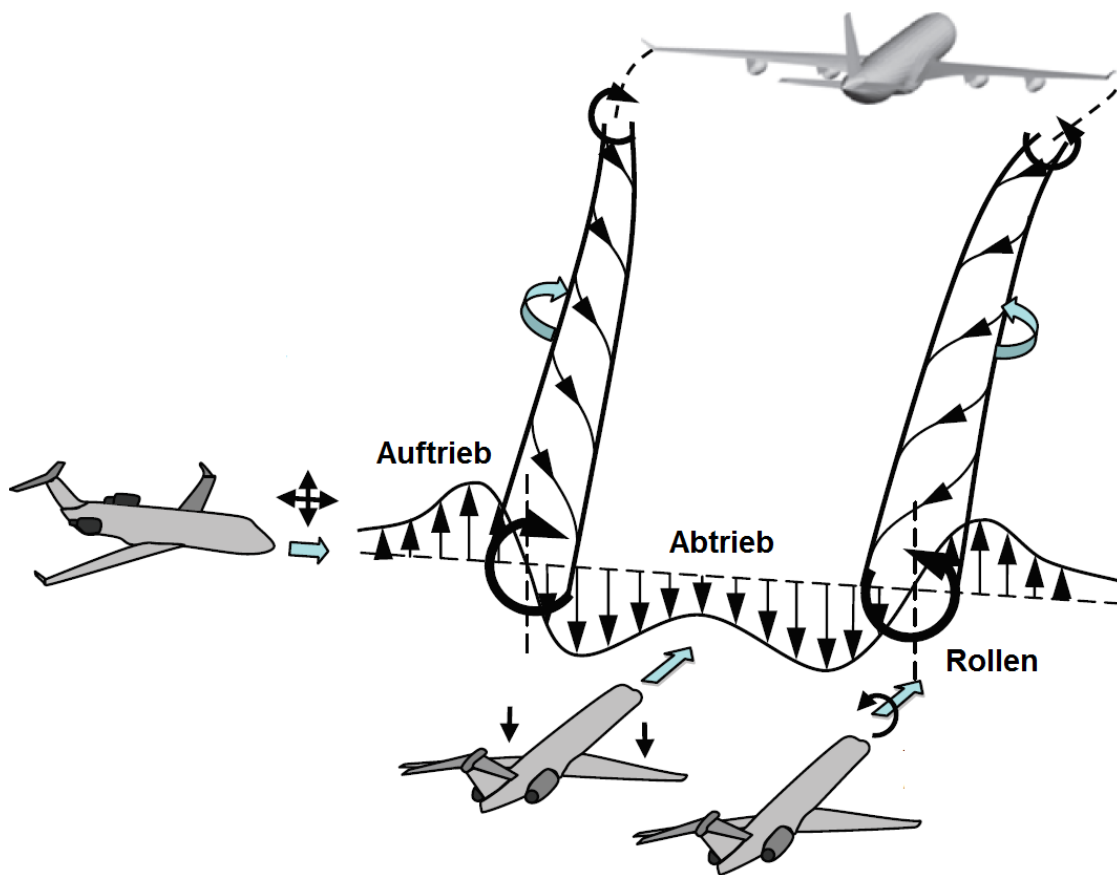


Abbildung 1: Wirkung der Wirbelschleppen auf nachfolgende Flugzeuge (Breitsamter 2011)

Die Problematik ist seit jeher bekannt und seit Jahrzehnten tiefgründig untersucht worden, aber noch immer ein Thema aktueller Forschung. Eine Zusammenfassung wichtiger Forschungsergebnisse lassen sich in Breitsamter 2011 *Wake Vortex Characteristics of Transport Aircraft* finden. In Anlehnung an diesen Bericht lässt sich die Wirbelschlepe in Längsrichtung in das Nahfeld, das erweiterte Nahfeld, das Fernfeld und die Zerfallsregion unterteilen (siehe Abbildung 2). An der Hinterkante des Tragflügels erzeugt die Zirkulation entlang der Spannweite b zahlreiche Einzelwirbelschleppen, die abfließen und das Nahfeld charakterisieren. Die Drehrichtung jeder Schlepe wird durch die lokale Strömungstopologie bestimmt, welche durch die Triebwerksanordnung, das Leitwerk und den Triebwerksstrahl maßgeblich beeinflusst sind. Die Wirbel verschmelzen in bestimmter Reihenfolge nach und

nach im erweiterten Nahfeld, sodass am Ende ein dominierendes Wirbelpaar entsteht, welches zueinander den Abstand b_0 einnimmt. Das Verhältnis von b/b_0 ist von der Spannweite und insbesondere von dem Zirkulationsverlauf entlang dieser bestimmt. Das zueinander entgegengesetzt drehende Wirbelpaar induziert in sich selbst eine Abwärtsbewegung und somit einen Abwind für nachfolgende Flugzeuge, dessen Betrag von der spannwitigen Position, der Zirkulation und dem Verhältnis b/b_0 abhängig ist. Ab diesem Zeitpunkt führt Dissipation zu einer fortwährenden Abschwächung des Wirbelsystems, bis es unweigerlich zur Crow-Instabilität kommt (Crow 1970). Die beiden entgegengesetzt drehenden Wirbelröhren schließen sich entlang ihrer Symmetrieachse zu mehreren Wirbelringen zusammen. Dieser Prozess kann bis zu einigen Minuten andauern und spielt sich im Fernfeld ab. Diese Instabilität führt schließlich zum Zerfall der Wirbelschlepe.

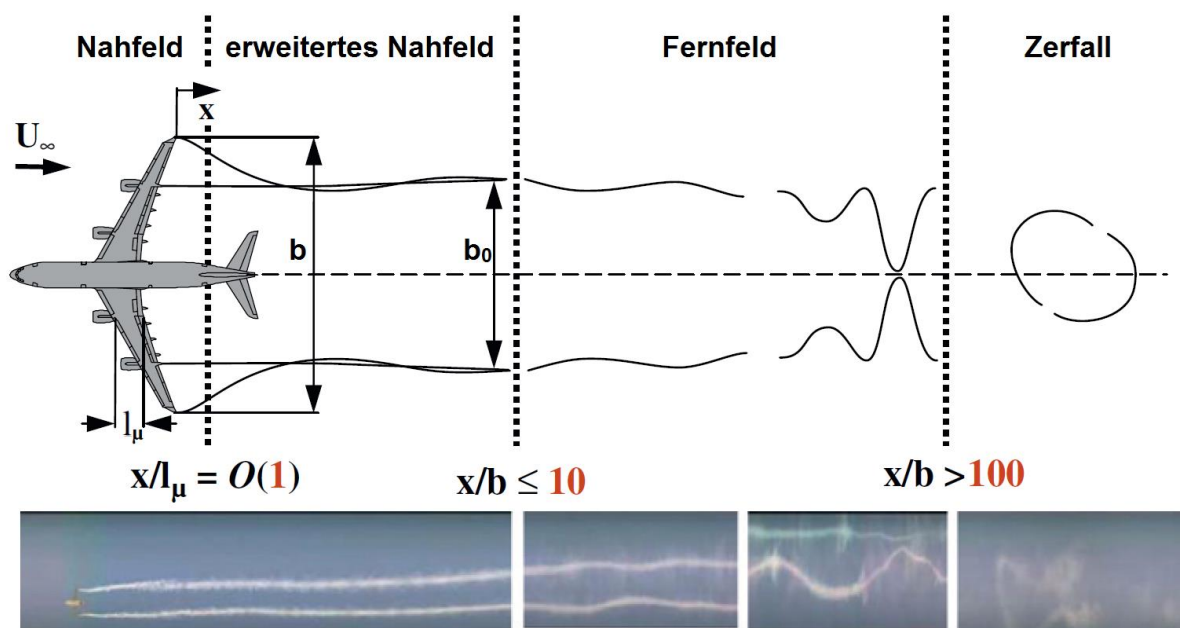


Abbildung 2: Lebenszyklus einer Wirbelschlepe (Breitsamter 2011)

Das DLR untersucht mittels Feldversuchen und numerischen Simulationen unter anderem die Zerfallsprozesse auch Endeffekte genannt, denen die Wirbelschleppen in Bodennähe bei Start und Landung unterliegen (Holzäpfel et al. 2016). Da nachfolgende Flugzeuge in Flughafennähe im Gegensatz zum freien Luftraum keine Ausweichmöglichkeiten haben, ist es das Ziel, durch geeignete Auftriebsverläufe und Bodenstrukturen die Wirbel zu schwächen und ihre Lebensdauer zu verkürzen. Das Bestreben darin begründet sich in der Tatsache, dass die Wirtschaftlichkeit von Flughäfen von der Auslastung ihrer Terminals abhängt, welche durch die Taktung der Flüge begrenzt ist. Ein schnellerer Zerfall würde eine Verringerung der Sicherheitsabstände bei Start und Landung ermöglichen und somit den Durchsatz erhöhen, ohne die Sicherheitsbestimmungen zu verletzen. Auf dem Flugplatz Oberpfaffenhofen wurden LIDAR-Messungen an Wirbelschleppen durchgeführt, sowie deren Beeinflussung durch Bodenstrukturen in Form von senkrecht zur Flugrichtung angeordneten Platten. Sowohl die Messungen als auch Simulationen am DLR haben gezeigt, dass der Wirbelzerfall durch geeignete Plattenanordnungen (Platelines) beschleunigt werden kann (siehe Abbildung 3).

Die strömungsmechanische Ähnlichkeitstheorie erlaubt es, diese Thematik in wassergefüllten Schleppkanälen zu untersuchen (Bao et al. 2003 und Stephan et al. 2013). Dabei ist zu

beachten, dass die Re-Zahl nur in seltenen Fällen eingehalten werden kann und in der Regel eine Diskrepanz von zwei Größenordnungen zwischen Labor und Feld besteht. Bei Untersuchungen, die sich mit den Bodeneffekten auseinandersetzen, wurden die Versuchskörper im Horizontalflug bewegt. Mit Bodeneffekten ist zu rechnen, wenn für die Flughöhe $z < b_0$ gilt (Proctor 2000). Während einer Landung kommt es durch Winkel- und Geschwindigkeitsänderungen zu kontinuierlichen Zirkulationsänderungen am Tragflügel. Inwiefern der Verlauf dieser Änderung die Endeffekte beeinflusst, ist noch offen.

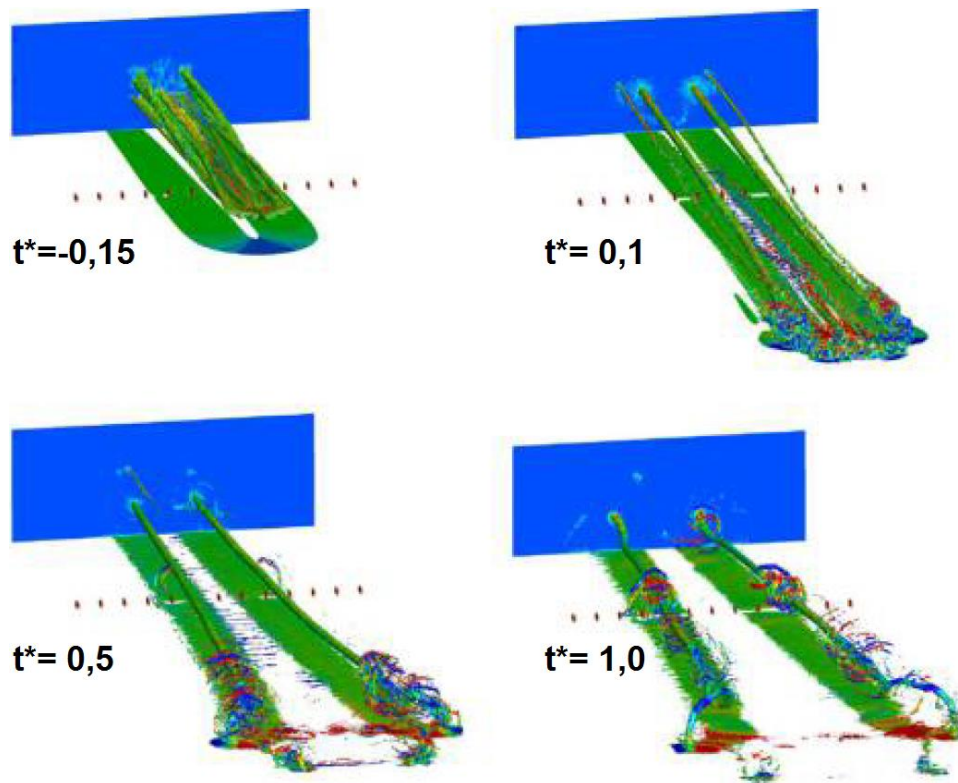


Abbildung 3: Wirbelschleppenzerfall über Bodenplatten aus Hybrid- LES (Holzäpfel et al. 2016)

Der Lebenszyklus in Bodennähe unterscheidet sich unter anderem, von dem im ungestörten Luftraum, darin, dass es zum „Ground-Linking“ kommen kann (Bisgood et al. 1971). Dabei bilden sich nach der Crow-Instabilität anstelle von Wirbelringen Halbringe aus, die ein imaginäres am Boden gespiegeltes Spiegelbild besitzen, (siehe Abbildung 4). Dieser Vorgang braucht ein Mindestmaß an initialer Umgebungsturbulenz und kommt daher nicht häufig vor (Proctor et al. 2000). In einer hybriden LES wurde gezeigt, dass dieses Phänomen den Zerfall der Wirbelschleppen beschleunigt (Stephan et al. 2014). Davon abgesehen ist die Crow-Instabilität in Bodennähe nur beim horizontalen Überflug ohne Endeffekte (Landung) relevant, da die Endeffekte bedeutend schneller ablaufen als sich die Crow-Instabilität entwickelt.

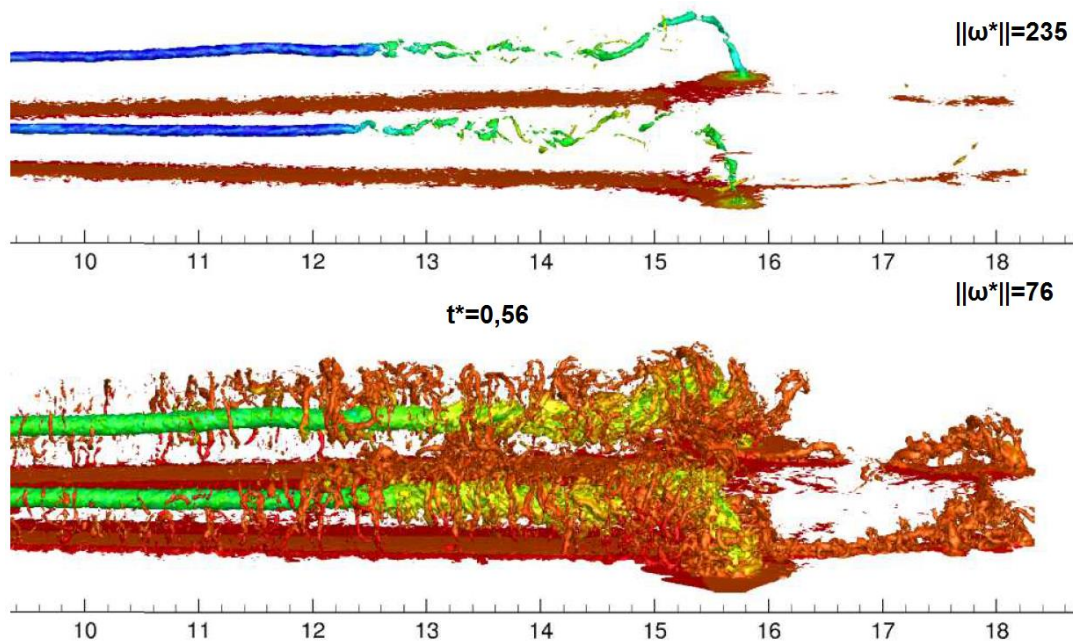


Abbildung 4: Ground-Linking aus LES mit unterschiedlichen Isoflächen der Wirbelstärke (Stephan 2014)

Daraus lässt sich ableiten, dass noch großer Forschungsbedarf für experimentelle Untersuchungen der Endeffekte besteht. Diese würden zusätzlich zur Bestätigung der numerischen Berechnung dienen und könnten neue Randbedingungen für Simulationen liefern. Dem Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock stehen dafür ein leistungsfähiges 4D-Schleppsystem, eine Schlepprinne von 37x5x3m und ein 2C2D-Unterwasser-PIV-System zur Verfügung. Als Tragflügelmodell dient ein Hydrofoil mit einer Spannweite von 1m (siehe Abbildung 5). Nach systematischer Untersuchung der im Labor vorliegenden Randbedingungen, wie zum Beispiel der Einfluss der Wasseroberfläche oder die Reproduzierbarkeit der Wirbeltrajektorien, sollen die Endeffekte zunächst ohne, später mit Bodeneinfluss gemessen werden. Die Zirkulationsvariationen zur Erzeugung der Endeffekte werden durch Kombinationen von abruptem Stoppen, Verzögern und Beschleunigen oder durch Knicke in den Bahnlinien zur Veränderung des effektiven Anstellwinkels realisiert.

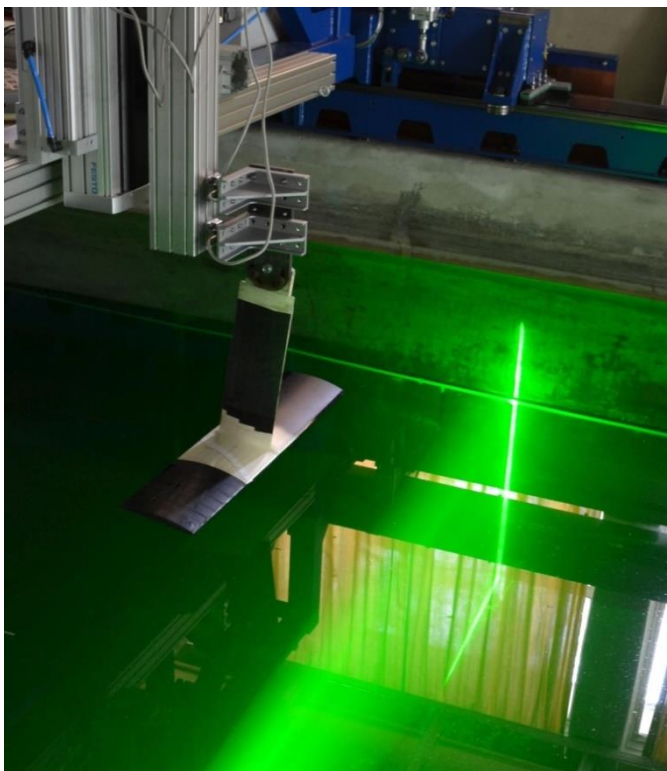


Abbildung 5: Versuchsaufbau in der Schlepprinne des Lehrstuhls Strömungsmechanik

Beschleunigen oder durch Knicke in den Bahnlinien zur Veränderung des effektiven Anstellwinkels realisiert.

Durchgeführte Experimente

Zunächst wurde geprüft, unter welchen Bedingungen sich die Wirbelschleppen sowohl in ihrer Zirkulationsmagnitudo als auch in ihrer Trajektorie am besten reproduzieren lassen. Die variierten Parameter waren die Zeitspanne zwischen den Versuchen und das Einschalten der Mikroblasenanlage, zum Erzeugen des Seedings. Dabei hat sich gezeigt, dass zwar die Zirkulationswerte eine zufriedenstellend geringe Varianz aufweisen, die Trajektorien sich jedoch in ihrem Verlauf teilweise stark unterscheiden. Da weder eine Pause zwischen den Versuchsfahrten mit dem Schleppsystem von 24h, 10min oder 3min einen Unterschied aufwiesen, wurde entschieden für alle Versuche eine Beruhigungszeit des Schleppkanals exakt 3min einzuhalten. Die Ursache dafür ist in der instationären Strömung zu suchen, welche dem Messfeld durch die langsam aufsteigenden Mikroblasen aufgeprägt wird. Der zeitlich gemittelt homogene Blasenvorhang ist für PIV-Messungen hervorragend geeignet ist, erhöht jedoch die räumliche Varianz der Wirbelschleppenbahnen deutlich. Künftige Verfeinerungen des experimentellen Aufbaus und Justage der Mikroblasenanlage müssen diesen Einfluss minimieren.

Mikroblasen bringen in diesem Experiment aufgrund ihrer geringeren Dichte bezüglich Wassers einen Vorteil mit sich. Sie sammeln sich aufgrund des dort vorherrschenden Druckminimums im Wirbelkern und machen diesen somit sichtbar. Dadurch konnte bei den Versuchen mit einer Zirkulationsänderung während der Fahrt, beobachtet werden, dass im Wirbelkern erhebliche Druckschwankungen vorhanden sind. Bei einer geringen Auftriebssenkung am Tragflügel 2m nach passieren des Lichtschnitts, wanderte eine Druckstörung durch den Wirbelkern, welches ein kurzzeitiges Austreten der Mikroblasen aus diesem nach sich zog. Fiel die Absenkung des Auftriebs stärker aus, konnten die Blasen sich anschließend nicht

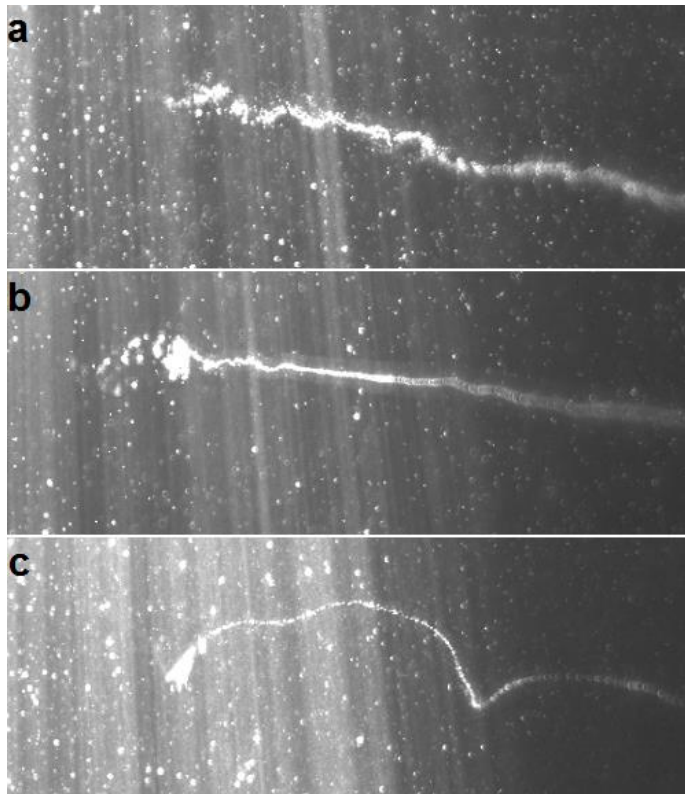


Abbildung 6: verschiedene Druckschwankungen
a. geringe Auftriebssenkung b. hohe Auftriebssenkung c. Auftriebserhöhung

mehr im Kern sammeln. Gemessen am Verhalten der Luftblasen muss hier ein Drucksprung im Wirbelkern vorliegen. Eine Vergrößerung der Zirkulation am Profil hingegen ließ den Wirbelkern spiralförmig rotieren, ohne mit einem Ausstoßen der Blasen einherzugehen. Dies spricht dafür, dass der Kern eine Spirale um ein neues Druckminimum schlägt (siehe Abbildung 6). Dieses Phänomen wurde bereits in numerischen Simulationen nachgewiesen und intensiv erforscht (Moet et al.2005). Die Modellierung der Fortschrittsgeschwindigkeit dieser Druckstörung stellt bisher noch eine konservative Approximation dar, welche durch experimentelle Nachweise verbessert werden könnte (Stephan et al. 2013).

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen, dass die CCD-Kamera des PIV-Systems nicht senkrecht auf die Messebene gerichtet ist. Dieser Winkelversatz ermöglicht es die Fortschrittsgeschwindigkeit der beobachteten Druckstörungen in Fahrtrichtung an-

hand von kalibrierten PIV-Daten zu berechnen. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Druckstörungen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten, deren Abhängigkeiten noch detailliert untersucht werden müssen.

Das Verhalten der Wirbel in den Experimenten ähnelt dem Verhalten der Wirbelschleppen, wie es auf Flughafenlandebahnen auftritt. Nähern sich die Wirbel der Landebahn, entfernen sie sich voneinander. Je geringer der Bodenabstand ist, desto schneller wächst ihr lateraler Abstand. Für diesen Effekt kann potentialtheoretisch dieselbe Erklärung wie für die Abwärtsbewegung herangezogen werden, jedoch mit dem Unterschied, dass die Symmetrieebene für den gespiegelten Wirbel nun eine feste Wand, der Boden ist. Ebenso wirkt die Wasseroberfläche wie eine Spiegelebene, mit dem Unterschied, dass der an ihr gespiegelte Wirbel eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung in den realen Wirbel induziert.

Daraus geht zwangsläufig hervor, dass die Wasseroberfläche dem lateralen Auseinanderdriften der zwei Wirbel einer Wirbelschleppe entgegen wirkt. Dieser zunächst unerwünschte Effekt wurde genutzt, um mit einem geeigneten Abstand zwischen Tragflügel und Boden sowie zwischen Tragflügel und Wasseroberfläche die Wirbel an einer Stelle zu halten und ihre Dissipation somit über einen langen Zeitraum ohne Drift untersuchen zu können.

Die aus den PIV Daten berechnete Zirkulation des Wirbelschleppenwirbels, stimmt mit den erwarteten Werten für das genutzte Tragflügelmodell überein. Allerdings ist die Dissipationsrate nicht von derselben Größenordnung wie in den Feldversuchen und Simulationen bei der Großausführung. Erst mit zunehmender Zirkulationsmagnitude können reale Abklingraten erreicht werden. Für eine modellgetreue Untersuchung von Wirbelschleppen in der Schlepprinne, ist daher eine Tragflügelprofil notwendig, das wesentlich größere Auftriebe erzeugen kann, als das bisher genutzte. Eine Geschwindigkeitserhöhung des Schleppwagens zu Auftriebserhöhung ist nur bedingt eine Lösung, da dies mit einer wesentlich stärkeren Beunruhigung der Wasseroberfläche verbunden wäre. Die Wirkung der daraus resultierenden Sekundäreffekte bleibt noch unklar.

Zusammenfassung

Das Wirbelverhalten in den Experimenten mit Bodeneinfluss hat bisher eine große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Simulationen gezeigt. Durch die Einstellung der Abstände zwischen Boden, Tragflügel und Wasseroberfläche können die einzelnen Wirbel lokal fixiert werden. Dies ermöglicht es Dissipationsvorgänge und den Einfluss von Bodenstrukturen mit einem einfachen Messaufbau über einen langen Zeitraum hinweg zu untersuchen. Außerdem verlieren somit räumliche Einschränkungen, welche durch die Dimension der Versuchseinrichtung gegeben sind, an Bedeutung.

Um besser belastbare und auswertbare Ergebnisse erhalten zu können, müssen noch einige Anstrengungen unternommen werden. Zwar können Wirbelschleppen gleicher Zirkulation wiederholt erzeugt werden, aber ihre zeitlichen und räumlichen Trajektorien weisen eine erhebliche Streuung auf. Es wird daher zum einen notwendig sein, die Anzahl der Experimente für jede Parameterkombination zu erhöhen, um eine statistische Aussagekraft zu gewährleisten, und zum anderen müssen mit verfeinerter Messtechnik mehr Daten pro Experiment erhoben werden, um jedes einzeln detailliert auswerten zu können.

Die bisherigen Untersuchungen der Wirbelschleppen im Schleppkanal der Universität Rostock sind als Vorversuche für ein ausgedehntes Forschungsvorhaben zu verstehen. In den kommenden Monaten werden die Endeffekte mit und ohne Nähe zum Boden detaillierter untersucht werden. Sie bestehen aus zwei Störungen, die zuvor beschriebene Druckstörung durch das Aufplatzen des Wirbels, und das spiralförmige Aufrollen sekundärer, entgegengesetzter Wirbelstärke um den Wirbel herum. Beide Vorgänge pflanzen sich mit unterschiedlichen Fortschrittsgeschwindigkeiten entlang der Wirbelachse fort. Ihre Geschwindigkeiten

und Abhängigkeiten von der Entstehungsweise der Zirkulationsänderung am Tragflügel, von der Reynoldszahl, von der Zirkulationsmagnitude, der Nähe zum Boden etc. werden in den folgenden Monaten systematisch untersucht.

Literatur

BAO, F., VOLLMERS, H., MATTNER, H., 2003: „Experimental study on controlling wake vortex in water towing tank“. Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF'

BISGOOD, P. L., MALTBY, R. L., DEE, F. W., 1971: „Some work at the Royal Aircraft Establishment on the behaviour of vortex wakes“. Aircraft Wake Turbulence and its Detection. Springer US. S. 171-206.

BREITSAMTER, C., 2011: „Wake vortex characteristics of transport aircraft“. Progress in Aerospace Sciences, 47. Jg., Nr. 2, S. 89-134.

CROW, S. C., 1970: „Stability theory for a pair of trailing vortices“. AIAA journal, 8. Jg., Nr. 12, S. 2172-2179.

HOLZÄPFEL, F., REINKE, A., KAUERTZ, S., 2015: „Aircraft wake vortex state-of-the-art & research needs“. Tech. rep., WakeNet3-Europe

HOLZÄPFEL, F; et al., 2016: „Enhanced wake vortex decay in ground proximity triggered by plate lines“. Aircraft Engineering and Aerospace Technology An International Journal, 88. Jg.,

MOET, H., et al., 2005: „Wave propagation in vortices and vortex bursting. Physics of Fluids“ 17. Jg., Nr. 5, S. 054109.

NELSON, R., BABIE, B., 2005: „An experimental study of the stability of a four-vortex system“. 23rd AIAA Applied Aerodynamics Conference. S. 4852.

PROCTOR, F., HAMILTON, D., HAN, J., 2000: „Wake vortex transport and decay in ground effect-Vortex linking with the ground“. In 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. S. 75

STEPHAN, A., et al., 2013: „Aircraft wake-vortex decay in ground proximity—Physical mechanisms and artificial enhancement.“ Journal of Aircraft, 50. Jg., Nr.

STEPHAN, A., et al., 2013: „Enhancement of aircraft wake vortex decay in ground proximity Experiment versus Simulation“. CEAS Aeronautical Journal, S. 1-17.

STEPHAN, A., 2014: „Wake vortices of landing aircraft“. Doktorarbeit. Imu.