

Abstract

A potential danger for airplanes is the wake vortices produced by preceding aircraft, particularly in the terminal area of an airport where takeoffs and landings occur. The first part of this research work investigates experimentally in a towing tank the so-called end effects of wake vortices produced by a decelerating wing without ground interaction. The second part delves into the complex ground interaction when an aircraft's wing lands, particularly the phenomenon so-called ground-linking that happens when vortices connect with the ground after the wing comes to rest.

End-effects, the implications of the deceleration process on wake vortices, can be observed without ground interaction. The first part of the experimental investigation analyzes two vortex disturbances due to these end-effects and their impact on tangential and axial velocities in the wake vortices through Particle Image Velocimetry (PIV) measurements.

It is shown that the vortex core initially exhibits wake-like axial flow before transitioning to jet-like axial flow with the first disturbance, which increases in magnitude until the second disturbance with a helical-like topology occurs. The first disturbance is caused by a traveling pressure wave (vortex bursting) shortly after deceleration, while the second disturbance occurs shortly after the wing comes to rest. The disturbances affect the axial and tangential velocity profiles but do not trigger vortex breakdown or directly influence vortex decay. Nevertheless, these disturbances impair and degrade the vortices.

In the second part of the experimental investigation, a towed model is used to recreate a simplified landing trajectory that can adjust the angle of attack while decreasing the distance above the ground. Experimental evidence of ground-linking is provided by analyzing various measurement planes and discussing the three-dimensional vortex topology. The height above the ground where the wing comes to rest is systematically increased from one chord length to six chord lengths. The data analysis shows that the vortices take a longer time to link to the ground as the distance above the ground increases, and the vortices display different characteristics.

Lastly, an investigation of wake vortex ground-linking for low and high-speed approaches is carried out. The low-speed approach exhibits late vortex ground connection and low circulation values, whereas the high-speed approach shows an immediate connection to the ground and high circulation values. The vortices remain stationary in the low-speed approach and drift considerably in the fast approach.

These findings highlight the importance of understanding the vortex system's characteristics, which depend on the approach speed and terminal height above ground. Unique patterns emerge in each situation, and comprehending these patterns is critical to ensure airport safety and create effective strategies to reduce aircraft spacing.

Zusammenfassung

Eine potenzielle Gefahr für Flugzeuge sind Wirbelschleppen, die von vorausfliegenden Flugzeugen erzeugt werden, insbesondere im Terminalbereich eines Flughafens, wo Starts und Landungen stattfinden. Der erste Teil dieser Forschungsarbeit untersucht experimentell in einem Schleppkanal die sogenannten Endeffekte (end-effects) von Wirbelschleppen, die durch einen abbremsenden Flügel ohne Bodeninteraktion erzeugt werden. Der zweite Teil befasst sich mit der komplexen Bodeninteraktion bei der Landung eines Flugzeugflügels, vorwiegend mit dem sogenannten Phänomen "Ground-linking", das auftritt, wenn sich Wirbel mit dem Boden verbinden, nachdem der Flügel zur Ruhe gekommen ist.

Endeffekte, also die Auswirkungen des Verzögerungsprozesses auf Wirbelschleppen, können ohne Bodeninteraktion beobachtet werden. Im ersten Teil der experimentellen Untersuchung werden zwei durch diese Endeffekte verursachten Wirbelstörungen und deren Einfluss auf die Tangential- und Axialgeschwindigkeiten in den Wirbelschleppen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen analysiert.

Es wird gezeigt, dass der Wirbelkern zunächst eine nachlaufartige axiale Strömung aufweist, bevor er mit der ersten Störung in eine strahlarartige axiale Strömung übergeht, deren Stärke zunimmt, bis die zweite Störung mit einer helikalen Topologie auftritt. Die erste Störung wird durch eine wandernde Druckwelle (bursting) kurz nach dem Abbremsen verursacht, während die zweite Störung kurz nach dem Stillstand des Flügels auftritt. Die Störungen wirken sich auf die axialen und tangentialen Geschwindigkeitsprofile aus, lösen jedoch keinen Wirbelzusammenbruch (break down) aus und haben auch keinen direkten Einfluss auf den Wirbelzerfall. Dennoch beeinträchtigen und schwächen diese Störungen die Wirbel.

Im zweiten Teil der experimentellen Untersuchung wird ein Schleppmodell verwendet, um eine vereinfachte Landebahn nachzubilden, die den Anstellwinkel anpassen und gleichzeitig den Abstand über dem Boden verringern kann. Der experimentelle Nachweis der Bodenanbindung (ground-linking) erfolgt durch die Analyse verschiedener Messebenen und die Diskussion der dreidimensionalen Wirbeltopologie.

Die Höhe über dem Boden, in der der Flügel anhält, wird systematisch von einer Sehnenlänge auf sechs Sehnenlängen erhöht. Die Datenanalyse zeigt, dass die Verbindung der Wirbel mit dem Boden mit zunehmender Entfernung über dem Boden länger dauert und die Wirbel unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Abschließend wird eine Untersuchung der Wirbelschleppen-Bodenkopplung für Anflüge mit niedriger und hoher Geschwindigkeit durchgeführt. Der Ansatz mit niedriger Geschwindigkeit zeigt eine späte Wirbel-Bodenverbindung und niedrige Zirkulationswerte, wohingegen der Ansatz mit hoher Geschwindigkeit eine unmittelbare Verbindung zum Boden und hohe Zirkulationswerte zeigt. Die Wirbel bleiben beim langsamen Anflug stationär und driften beim schnellen Anflug erheblich ab.

Diese Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig es ist, die Eigenschaften des Wirbelsystems zu verstehen, die von der Annäherungsgeschwindigkeit und der Endhöhe über dem Boden abhängen. In jeder Situation treten einzigartige Muster auf, und das Verständnis dieser Muster ist von entscheidender Bedeutung, um die Flughafensicherheit zu gewährleisten und wirksame Strategien zur Reduzierung der Flugzeugabstände zu entwickeln.