

Allgemeinverständliche Beschreibung des Phänomens Wirbelschleppen hinter Verkehrsflugzeugen

1 Physikalische Erklärung zum Aufbau und Zerfall einer Wirbelschleppe

Als unvermeidbare Konsequenz des Auftriebs erzeugt jedes Flugzeug (LFZ) hinter seinen Tragflächen ein Paar gegensinnig rotierender und langlebiger Wirbel – die so genannte Wirbelschleppe. Die Wirbelschleppe bildet sich an den Spitzen der Flügel und Klappen hinter dem Flugzeug. Bild 1 links zeigt einen der ansonsten unsichtbaren Wirbel, der hier vom DLR-Forschungsflugzeug ATTAS, einer VFW614, beim Durchstarten am Flughafen Braunschweig erzeugt und durch roten Rauch sichtbar gemacht wurde. Bild 1 rechts zeigt in einem Schnitt senkrecht zur Flugrichtung die entsprechende Strömung verursacht durch beide Wirbel.

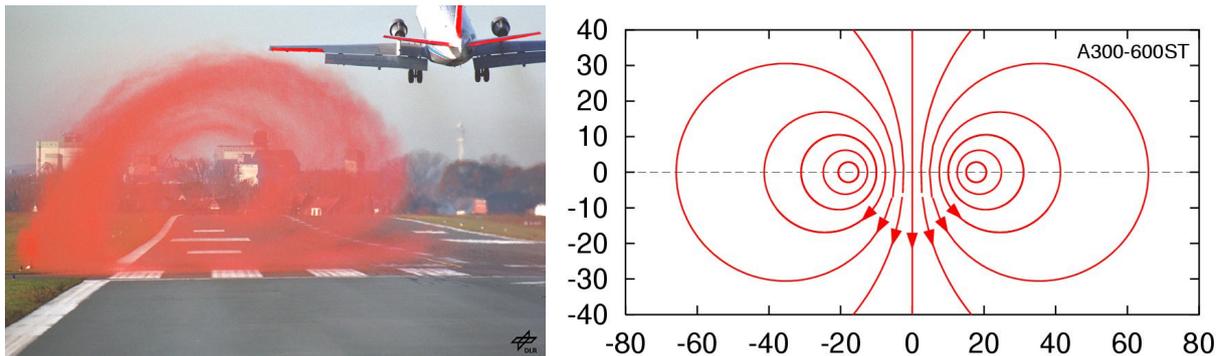


Bild 1. Sichtbarmachung eines Wirbels durch Rauch (links)
und momentane Struktur der Wirbelschleppe (rechts); Abmessungen in Meter.

Bild 2 links zeigt die Geschwindigkeitsverteilung im rechten Wirbel. Im Wirbelzentrum ist die Geschwindigkeit null und nimmt nach außen bis zum sog. Kernradius (proportional zum Abstand vom Wirbelzentrum) zu. Außerhalb des Kernradius nimmt die Geschwindigkeit wieder kontinuierlich (und zwar umgekehrt proportional zum Abstand vom Wirbel) ab. Bild 2 rechts zeigt zusätzlich in blau die Geschwindigkeitsverteilung des linken Wirbels. In rot sind die Geschwindigkeiten der beiden Wirbel zur resultierenden Geschwindigkeitsverteilung der Wirbelschleppe überlagert. Man erkennt, dass zwischen den Wirbelzentren die Geschwindigkeiten (im sog. *downwash*) nach unten gerichtet sind. Außerhalb der Wirbelzentren zeigen die Geschwindigkeiten (im sog. *upwash*) nach oben. Bild 2 rechts erklärt außerdem, warum die Wirbelschleppe absinkt: Jeder Wirbel erfährt in seinem Zentrum durch seinen Nachbarwirbel eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit W , die der Sinkgeschwindigkeit des Wirbelpaares entspricht. Die nach unten gerichtete Geschwindigkeit W wächst mit der Stärke der Wirbel (Zirkulation Γ) und ist umso kleiner, je größer der Abstand b der Wirbel voneinander ist.

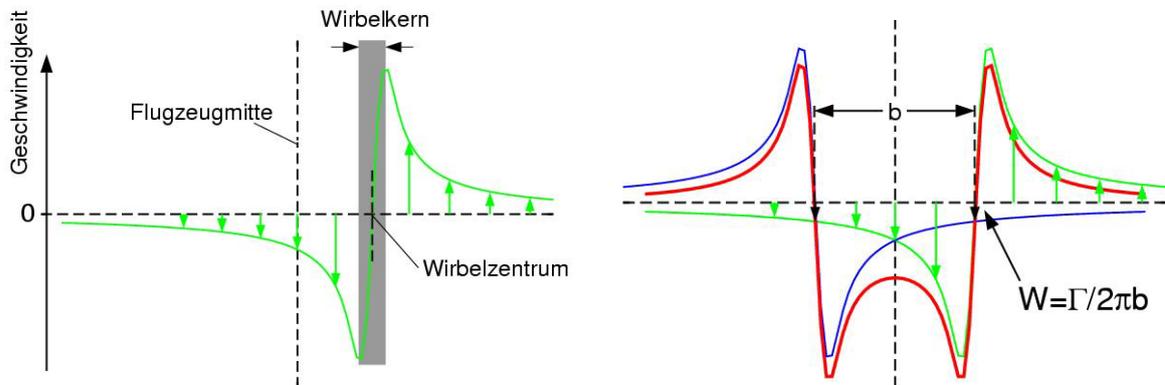


Bild 2. Geschwindigkeitsverlauf durch den rechten Wirbel (links) und die gesamte Wirbelschleife (rechts in rot).

Die Zirkulation Γ der Wirbel folgt direkt aus dem Auftrieb, den das Flugzeug erzeugen muss, um zu fliegen: Je schwerer es ist, umso mehr Auftrieb muss es erzeugen und umso stärker ist die Intensität der Wirbel; umgekehrt wird der benötigte Auftrieb reduziert, wenn das Flugzeug schneller fliegt oder eine größere Spannweite hat, also ist die Stärke der Wirbel um so kleiner je größer die Fluggeschwindigkeit und Flügelspannweite eines LFZ sind. Schließlich spielt noch die Dichte der Luft eine Rolle: je dichter die Luft umso größer der Auftrieb, also reduziert eine größere Luftdichte ebenfalls die Zirkulation der Wirbel.

Transport und Zerfall der Wirbel werden maßgeblich durch die umgebende Atmosphäre bestimmt. Die durch eigenen Antrieb absinkende Wirbelschleife wird gleichzeitig durch den sie umgebenden Wind verdriftet. Da die Windgeschwindigkeiten der Atmosphäre nicht gleichförmig sind, werden die beiden Wirbel entsprechend deformiert (Bild 3).

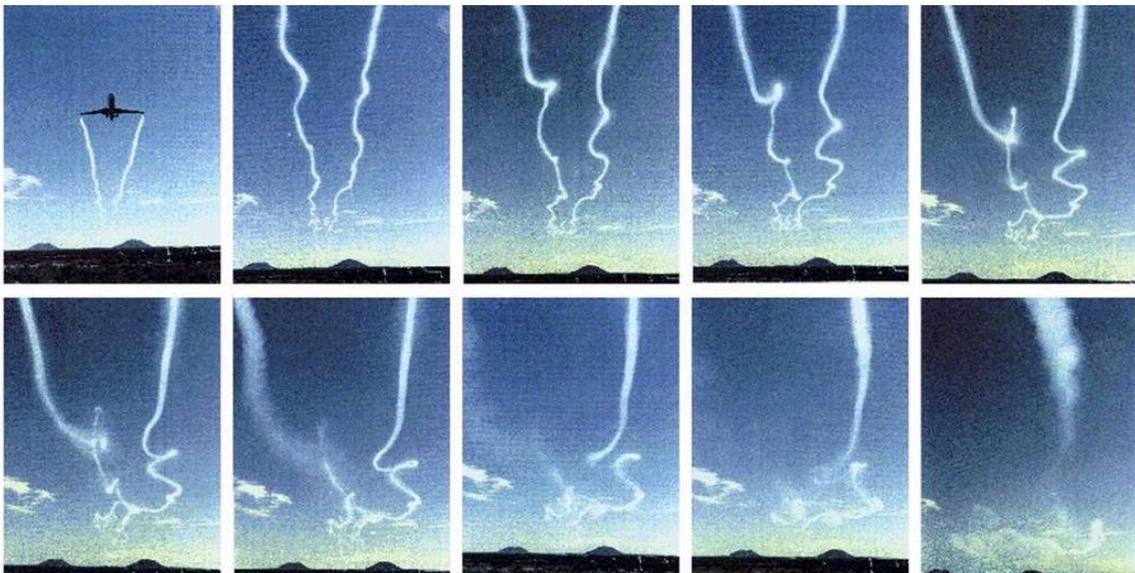


Bild 3. Durch Rauch sichtbar gemachte deformierte Wirbelschleppen (Foto: NASA).

Die Lebensdauer der Wirbel hängt vor allem von der Turbulenz der Atmosphäre aber auch von der Temperaturverteilung (Schichtung) der umgebenden Luft ab. Bild 4 zeigt die zeitliche Abnahme der Wirbelstärke Γ für verschieden starke Turbulenz der Atmosphäre. Je älter die Wirbel umso mehr geht die in Bildern 1 und 2 gezeigte Struktur verloren: die Geschwindigkeiten werden geringer und zunehmend regellos; am Ende sind sie von atmosphärischer Turbulenz nicht mehr zu unterscheiden.

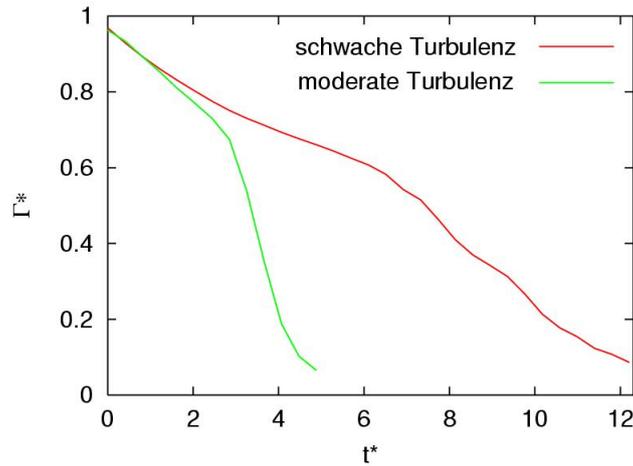


Bild 4. Abnahme der (normierten) Wirbelstärke Γ^* mit der (normierten) Zeit t^* für geringe und moderate Turbulenz.

Der Einfluss des Bodens trägt ebenfalls zum Zerfall bei: In Bodennähe sinken die Wirbelzentren in der Regel bis auf den halben Abstand der Wirbel zum Boden ab und laufen dann seitlich weg. Durch die Wechselwirkung mit dem Boden entstehen zusätzliche kleinere Wirbel, die zum einen zum Wiederaufsteigen der Hauptwirbel führen (Bild 5), zum anderen aber auch den Zerfall beschleunigen.

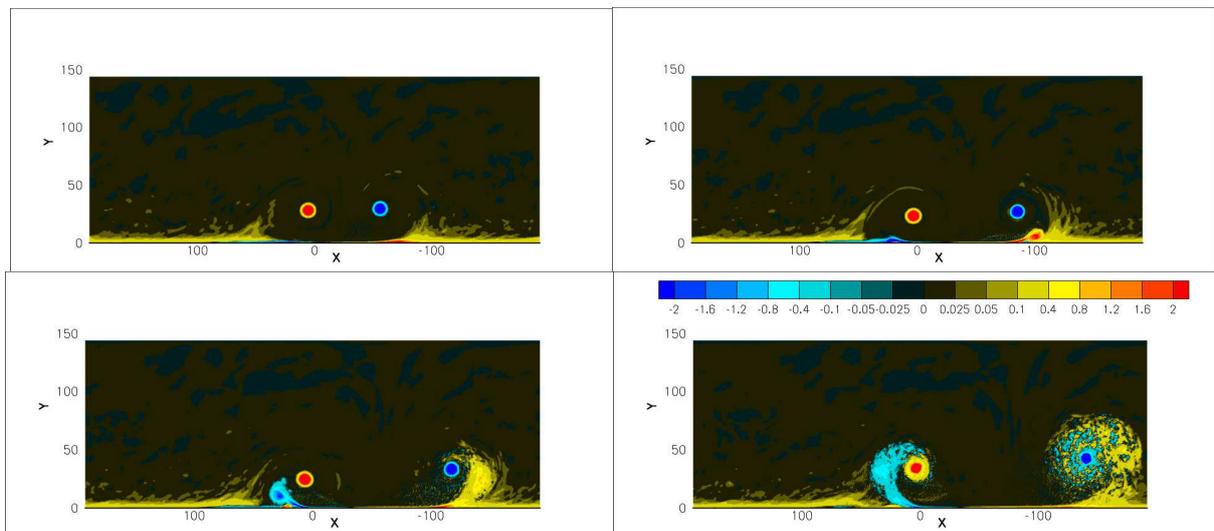


Bild 5. Sequenz des Verhaltens der Wirbelschleife bei Annäherung an den Boden und Querwind (Quelle: Anton Stephan, DLR).

2 Vorhersagbarkeit der Wirbelschleppe

Das Verhalten der Wirbelschleppen kann in Abhängigkeit der Flugzeugparameter und der meteorologischen Einflüsse vorhergesagt werden. Aufgrund des Zufallscharakters sowohl der atmosphärischen Turbulenz als auch der Wirbelströmung selbst sind jedoch brauchbare Vorhersagen nur im Sinne von Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Vorhersagen werden typischerweise mit sog. parametrischen Modellen, wie dem von uns verwendeten Modell P2P (für *probabilistic 2-phase wake vortex model*), erstellt. P2P wurde anhand umfangreicher wissenschaftlicher theoretischer und praktischer Untersuchungen entwickelt und in vielen Feldmesskampagnen verifiziert. P2P verwendet in seiner Prognose Sicherheitsmargen, die, wie die Wirbelmessungen zeigen, über 99% der beobachteten Fälle bzgl. des Wirbeltransports und 98% der Fälle bzgl. der Wirbelstärke abdecken. Als Eingabegrößen verwendet das Modell die entsprechenden Flugzeugparameter und gemessene oder prognostizierte Profile der Windgeschwindigkeit, der turbulenten kinetischen Energie und der Temperatur.

3 Potentielle Gefährdungen für Flugzeuge bzw. Objekte und Personen am Boden

Die potentielle Gefährdung von Flugzeugen durch Wirbelschleppen rührt daher, dass diese in einen der Wirbel, die vom voraus oder darüber fliegenden LFZ erzeugt wurden, einfliegen können. Im ungünstigsten Fall kann ein nachfolgendes Flugzeug direkt in das Zentrum eines Wirbels einfliegen (Bild 6), wo es die maximalen Rollmomente und somit die größte Gefährdung erfährt. Die Drehbewegung des LFZ um seine Längsachse (das Rollen) ist dabei umso größer je größer die Stärke des Wirbels ist, ausgedrückt durch die Zirkulation (vergleichbar einem Drehmoment, also "angreifende Geschwindigkeit * Hebelarm", Einheit m^2/s). Um dieser Gefahr vorzubeugen, hat die ICAO horizontale Mindestabstände zwischen zwei LFZ festgelegt. Je größer also das LFZ, umso größer und potentiell gefährlicher ist auch sein Wirbel für nachfolgende LFZ.

Wie Bild 6 ebenfalls verdeutlicht, ist für die Gefährdung von Personen oder Objekten am Boden entscheidend, wie weit sich der Wirbel dem Boden annähert. Eine mögliche Gefährdung von Personen oder Objekten am Boden resultiert aus der durch den Wirbel dort induzierten Windgeschwindigkeit und dem im Wirbelkern herrschenden Unterdruck. Die maximalen Geschwindigkeiten treten am Rand des Wirbelkerns auf, der maximale Unterdruck im Zentrum des Wirbelkerns. Es ist also entscheidend, wie weit sich der Wirbel mit seinem Kern dem Boden annähert. Ein Objekt erfährt die maximale Geschwindigkeit und den maximalen Unterdruck nur dann, wenn es so hoch ist, dass es vom Kern des Wirbels berührt wird, bzw. wenn der Wirbel entsprechend tief absinkt.

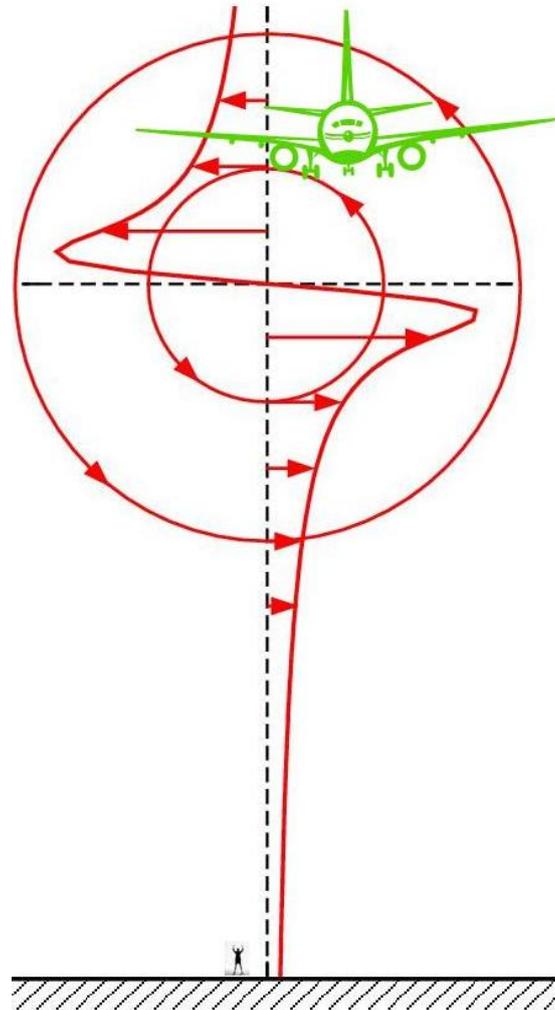


Bild 6. Skizze zur Verdeutlichung der Wirkung einer Wirbelschleife auf einfliegende LFZ bzw. Personen und Objekten am Boden. Die annähernd maßstäbliche Darstellung zeigt den von einem großen LFZ in 50 m über Grund erzeugten Wirbel, ein einfliegenes LFZ mit 30 m Flügelspannweite und eine 1,8 m große Person.

4 Die Richtlinien der ICAO

Die ICAO (*International Civil Aviation Organization*) legt die LFZ-Separation nach dem maximalen Startgewicht (MTOW) der beteiligten LFZ fest. Dies ist plausibel, da die Stärke (Zirkulation) der Wirbel proportional mit der Masse des sie erzeugenden LFZ wächst und umgekehrt ein nachfolgendes LFZ bei gegebener Wirbelstärke umso leichter um die eigene Achse rollt, je kleiner (leichter) es ist. Von der ICAO werden heute noch nicht die weiteren Parameter berücksichtigt, die ebenfalls den Wert der Zirkulation eines Wirbels bestimmen: Spannweite, Geschwindigkeit des LFZ und Luftdichte. Allerdings erarbeiten die FAA (*Federal Aviation Administration*) und EUROCONTROL zur Zeit im Auftrag der ICAO neue Abstandsrichtlinien für LFZ, um dem tatsächlichen Gefährdungspotential verschiedener Flugzeugpaarungen gerecht zu werden.



5 Die Aufgabe des DLR

Um dem Risiko eines Unfalls durch Wirbelschleppen zu begegnen wurden in den siebziger Jahren Sicherheitsabstände zwischen Flugzeugpaaren festgelegt unter deren Einhaltung bisher kein Unfall eintrat, die aber auch die Kapazität großer Flughäfen zunehmend einschränken. Eine EUROCONTROL Studie prognostiziert, dass die Zunahme des Luftverkehrs den Bedarf an Flugzeugbewegungen eines großen europäischen Flughafens bis zum Jahr 2025 mehr als verdoppeln könne und somit 60 europäische Flughäfen an die Grenzen ihrer Kapazität stoßen könnten.

Angesichts dieser Entwicklungen etablierte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Jahre 1999 das Projekt *Wirbelschleppe*, in dem nahezu alle Aspekte des Themas bearbeitet werden. Dabei gilt stets die Maxime, dass Kapazitätssteigerungen nur bei mindestens gleich bleibender Sicherheit umgesetzt werden können. Die Themen umfassen (i) die Minimierung der Stärke und der Lebensdauer der Wirbelschleppe durch konstruktive Maßnahmen am Flügel, (ii) die bordseitige Erkennung und Warnung vor Wirbelschleppeneinflügen, (iii) die Kompensation des induzierten Rollmoments durch automatische Steuerungsmaßnahmen und schließlich (iv) die Entwicklung eines Systems zur Vorhersage und Beobachtung von Wirbelschleppen (WSVBS) zur dynamischen Reduzierung der Wirbelschleppenstaffelung im Landeanflug unter geeigneten meteorologischen Bedingungen. Die meisten Themen wurden im DLR-Nachfolgeprojekt *Wetter & Fliegen* weiterverfolgt und werden auf nationaler und europäischer Ebene im Rahmen des Programms SESAR zur Marktreife gebracht.