

F. HOLZÄPFEL

# 13 Flugzeug-Wirbelschleppen – von der Grundlagenforschung zur Anwendung

## Aircraft wake vortices - from fundamental research to operational application

### Zusammenfassung

Die unterschiedlichen Aspekte des Themas Wirbelschleppes erschließen sich im Spannungsfeld vielfältiger fluiddynamischer Phänomene und den Herausforderungen, die Wirbelschleppen für die nachhaltige Entwicklung der Sicherheit und Kapazität der zivilen Luftfahrt darstellen. Das vorliegende Manuskript gibt eine Übersicht über verschiedene Aspekte des Themas, beginnend bei den historischen Wurzeln der Erforschung der Wirbelschleppes, über die Darstellung ihrer Eigenschaften, wie sie sich aus Messung und Modellierung erschließen, bis zur Einführung von Wirbelschleppen Simulationssystemen zur Vorhersage dynamischer Flugzeugstaffelungen in verschiedenen Flugphasen sowie zur Sensitivitätsanalyse und letztlich dem Sicherheitsnachweis.

### Summary

Aircraft trailing vortices constitute both a kaleidoscope of instructive fluid dynamics phenomena and a challenge for the sustained development of the safety and capacity of the air-transportation system. An overview of the wake vortex issue is given commencing at its historical roots, proceeding with a sketch of the nature and characteristics of wake vortices resulting from field measurement and numerical simulation, and concluding with a depiction of the design and performance of wake vortex simulation systems established for the prediction of dynamic aircraft separations in different flight phases and for sensitivity and risk analysis.

### 1 Das Phänomen Wirbelschleppes

Als unvermeidbare Folge des Auftriebs erzeugen Flugzeuge ein Paar gegensinnig rotierender und langlebiger Nachlaufwirbel - die sogenannte Wirbelschleppes. Bereits vor über einem Jahrhundert stießen LANCHESTER (1907) und PRANDTL (1918) bei ihrer Suche nach einer Theorie des Fliegens auf die Wirbelschleppes. Die Prandtl'sche Traglinientheorie besagt, dass die Stärke des gebundenen Wirbels<sup>1</sup>, ausgedrückt durch seine Zirkulation, von der Wurzel zur Spitze des Flügels hin abnimmt (siehe Abbildung 13-1). Deshalb löst sich kontinuierlich Vorticity vom Tragflügel ab und bildet eine Wirbelschicht. Diese rollt sich durch Selbstinduktion an ihren Enden auf und formiert sich zu den Nachlaufwirbeln. Die Traglinientheorie beschreibt auch bereits die Entstehung des induzierten Widerstands, der bei Flügeln unendlicher Spannweite verschwände. Bei Flügeln endlicher Spannweite entsteht der induzierte Widerstand durch einen Abwind vor der Tragfläche, der durch die Nachlaufwirbel induziert wird und damit den effektiven Anstellwinkel des Flugzeuges reduziert. Die durch den induzierten Widerstand geleistete Arbeit entspricht in etwa der kinetischen Energie der Wir-

belschleppes und kann in Analogie zum Wellenwiderstand eines Schiffes verstanden werden.

Andere Erklärungen der Wirbelschleppen-Entstehung bemühen

- die Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite des Flügels, die eine Umströmung der Flügelspitzen auslöst und dadurch die Bildung eines Wirbelpaars initiiert.
- Die Tragflächen lenken die Anströmung in einen näherungsweise uniformen Abwind um. An dessen Rändern entstehen Scherschichten, die sich zu den Nachlaufwirbeln aufrollen.
- Schließlich besagt der erste Helmholtz'sche Wirbelsatz, dass ein Wirbelfaden nicht in einem Fluid enden kann. Er ist entweder geschlossen oder endet an einer Begrenzung des Fluids. Bei Wirbelschleppen besteht der geschlossene Wirbelfaden aus dem gebundenen Wirbel am Tragflügel, wird durch die Nachlaufwirbel fortgesetzt und durch den Anfahrwirbel geschlossen.

Die Stärke der Wirbelschleppes wird durch ihre Zirkulation,  $\Gamma$ , charakterisiert. Die Zirkulation ist ein integrales Maß für

die Vorticity (Wirbelstärke) innerhalb des Wirbels. Im stationären Horizontalflug beträgt die anfängliche Zirkulation in etwa

$$\Gamma = \frac{W}{(\pi/4)\rho BV} \quad (1)$$

Somit ist die Stärke der Wirbel proportional zum Gewicht des Flugzeuges  $W$  und umgekehrt proportional zur Dichte der Luft  $\rho$ , der Spannweite  $B$  und der Fluggeschwindigkeit  $V$ . Die Zirkulationswerte im Reiseflug und im Landeanflug unterscheiden sich nur wenig, da die inverse Variation von Luftdichte und Fluggeschwindigkeit sich in etwa kompensieren.

Abbildung 13-2 verdeutlicht, dass die beiden Wirbel sich gegenseitig eine Sinkgeschwindigkeit

$$w = \frac{\Gamma}{2\pi b} \quad (2)$$

induzieren, wobei  $b = \pi/4 B$  den Wirbelabstand bezeichnet. Die anfängliche Sinkgeschwindigkeit der Nachlaufwirbel kommerzieller Flugzeuge variiert zwischen 1 und 2 m/s. Unter optimalen Bedingungen (neutrale thermische Schichtung, kaum Turbulenz) können die Wirbel bis über 600 m tief absinken (MISAKA et al. 2012). Beim Absinken wird das Fluid innerhalb einer ovalen Stromlinie mitgenommen, die die Staupunkte oberhalb und unterhalb des Wirbelpaars verbindet (siehe Abbildung 13-2). Die Strömung außerhalb des Ovals entspricht der reibungsfreien Umströmung eines Festkörpers gleicher Form. Diese quasi reibungsfreie Strömungstopologie erklärt den geringen Widerstand des absinkenden Ovals und die großen Distanzen, die dieses in einer ungestörten Umgebung zurücklegen kann.

Bei entsprechenden meteorologischen Umgebungsbedingungen können Wirbelschleppen mehrere Minuten überdauern und sind daher eine potentielle Gefahr für nachfolgende Flugzeuge. Mit der Einführung der Boeing 747 in den siebziger Jahren traten erstmals größere Probleme mit Wirbelschleppen auf. Um Wirbelschleppen Begegnungen zu vermeiden, etablierten die *Federal Aviation Administration* (FAA) und die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) Mindestabstände zwischen aufeinander

führendes Flugzeug	folgendes Flugzeug	minimale Separation
SUPER (A380)	HEAVY	6 NM
SUPER	MEDIUM	7 NM
SUPER	LIGHT	8 NM
HEAVY	HEAVY (>136t)	4 NM
HEAVY	MEDIUM (>7t und 136t)	5 NM
HEAVY	LIGHT (<7t)	6 NM
MEDIUM	LIGHT	5 NM

Tabelle 13-1: ICAO-Mindeststaffelungsabstände für Wirbelschleppen. Für alle nicht genannten Gewichtsklassenkombinationen gilt die Radarstaffelung von 3 NM oder 2,5 NM.

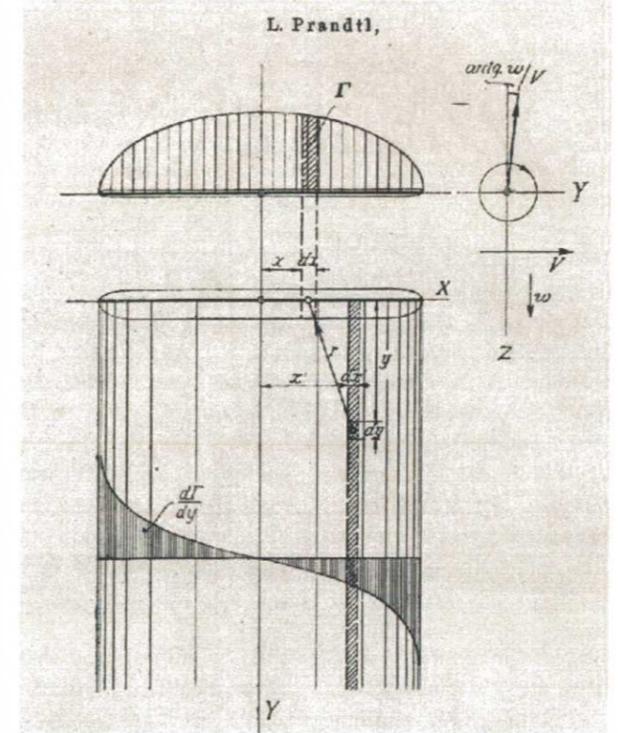


Abb. 13-1: Skizze von Ludwig Prandtl zur Illustration der elliptischen Zirkulationsverteilung entlang der Traglinie (oben) und Ablösung differentieller Wirbelfilamente (unten) (reproduziert aus PRANDTL 1918).

folgenden Flugzeugen verschiedener Gewichtsklassen, die zwischenzeitlich um die Klasse SUPER für die A380 erweitert wurden (siehe Tabelle 13-1).

Mittlerweile hat die ICAO einen Prozess zur Harmonisierung der Wirbelschleppen Separationen eingeleitet (RECAT). Zunächst sollen die vier Gewichtsklassen auf sechs Flugzeugklassen erweitert werden. Die FAA hat bereits neue Kategorien vorgestellt, die seit dem 2. November 2012 am Flughafen Memphis eingesetzt werden (SAFO 12007, 2012). Diese berücksichtigen neben dem Gewicht auch die Anfluggeschwindigkeit, die Flügelcharakteristik und teilweise auch die Wirkung des Rollmomentes auf nachfolgende Flugzeuge. In Europa hat man sich entschlossen, eigene Kategorien zu entwickeln, die aber aktuell noch diskutiert werden. Das langfristige Ziel der ICAO sieht dynamische paarweise Separationen vor, die die beteiligten Flugzeugtypen und die atmosphärischen Umgebungsbedingungen berücksichtigen (vergleiche Kapitel 4.1).

Die aktuell gültigen Mindestabstände können in Spitzenzeiten an großen Flughäfen zu erheblichen Verspätungen führen. Ein Wirbelschleppenwarnsystem, das Flugzeugseparationen bei günstigen Wetterbedingungen anpasst, ohne dadurch das Sicherheitsniveau einzuschränken, könnte erheblich zur Verringerung von Verspätungen beitragen. Im Reiseflug hat die Reduktion der vertikalen Separationen auf 1000 ft im *Reduced Vertical Separation*

<sup>1</sup> Der gebundene Wirbel ist ein hypothetisches Wirbelfilament entlang einer Traglinie und repräsentiert einen geraden Flügel. Gemäß dem Satz von Kutta-Zhukhovski erfährt der gebundene Wirbel in einer gleichförmigen Anströmung eine Auftriebskraft.

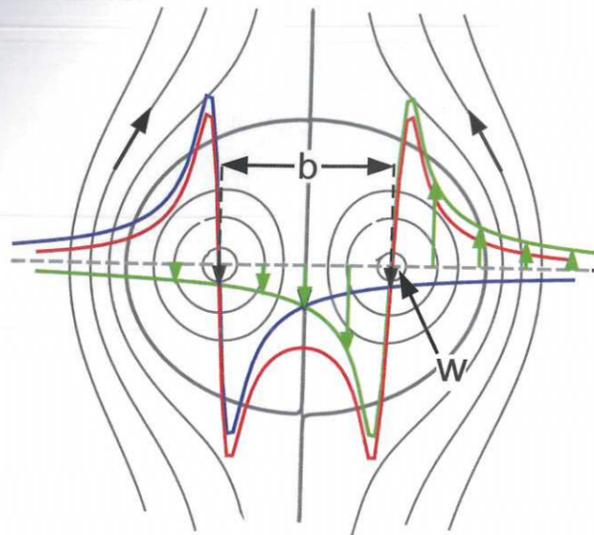


Abb. 13-2: Vertikale Geschwindigkeitsprofile der beiden gegensinnig rotierenden Wirbel (grün und blau) und resultierende Einhüllende der Vertikalgeschwindigkeiten (rot) vor grauen Stromlinien.

Minimum-Lufttraum (RVSM) zu einer deutlichen – wenn gleich nur schwer quantifizierbaren – Erhöhung der Zahl der Wirbelbegegnungen geführt. Die durch das *Single European Sky ATM Research Programme* (SESAR) und das *Next Generation Air Transportation System* (NextGen) angestrebte Liberalisierung des Lufttraums könnte zu einer weiteren Erhöhung der Wirbeleinflüge in der oberen Atmosphäre führen. Auch die zunehmende Diversifizierung von Flugzeugtypen von Very Light Jets bis zum Megaliner A380 mit zwei durchgängigen Passagierdecks oder der B 747-8 haben umfangreiche Untersuchungen ausgelöst. Offenbar besteht also ein Bedarf an Systemen zur Vermeidung von Wirbelschleppenbegegnungen; am besten nahtlos vom Start bis zur Landung.

Die Entwicklung von Wirbelschleppenwarnsystemen ist eine interdisziplinäre Aufgabe und muss in enger Kooperation der Fachrichtungen Fluidodynamik, Meteorologie, Aerodynamik und Flugführung erfolgen. Die Akzeptanz und Einführung derartiger Systeme bedarf jedoch der Einbindung einer viel größeren Gemeinschaft aus Flugzeugherstellern, Luftverkehrskontrolle, Flughäfen, Fluglinien, Luftfahrtbehörden und nicht zuletzt Piloten.

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden in den Projekten Wirbelschlepp (1999-2007) und Wetter & Fliegen (2008-2012) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und profitierten von zahlreichen EU-Projekten wie ATC-Wake, AWIA-TOR, CREDOS, C-Wake, FAR-Wake, FLYSAFE, I-Wake, S-Wake, WakeNet, WakeNet2-Europe und WakeNet3-Europe.

Aus den verschiedenen Übersichtsartikeln zum Thema Wirbelschlepp werden hier einige neuere Arbeiten exemplarisch herausgegriffen (HALLOCK et al. 1998, SPAL-

ART 1998, ROSSOW 1999, GERZ et al. 2002, BREITAMTER 2011).

## 2 Der Physik der Wirbelschlepp auf der Spur

Ein primäres Ziel der Wirbelschleppenforschung ist die Zerfallsmechanismen der Wirbelschlepp zu entschlüsseln, zu modellieren, vorherzusagen oder gar zu beschleunigen. Die große Lebensdauer der Wirbelschlepp jedoch beschränkt Untersuchungen im Windkanal auf relativ junge Wirbel und erschwert Experimente in Einrichtungen wie dem Katapult und Wasserschleppkanal. Direkten Zugang zum realen Wirbelverhalten bietet das *Light detection and ranging Instrument* (Lidar), das Wirbelschleppen realer Flugzeuge vermisst. Doch leider können am Flughafen die meteorologischen Umgebungsbedingungen, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Wirbelverhalten haben, weder kontrolliert noch reproduziert werden. Da bei Lidar Messungen die maximale gemessene Geschwindigkeit entlang des Laserstrahls der Wirbelschlepp zugeordnet wird, ist die Interpretation komplexer Geschwindigkeitsfelder in bereits erodierten Wirbeln nur schwer möglich.

Komplementär empfiehlt sich die hochauflösende numerische Simulation, um ein detailliertes Verständnis des Wirbelzerfalls zu erwerben. Der große Vorteil ist, dass alle interessierenden Parameter für die Analyse unmittelbar zur Verfügung stehen. Doch gibt es natürlich auch hier Einschränkungen. Einerseits sollten die numerischen Simulationen in großen Rechengebieten durchgeführt werden, um die Interaktion der Wirbelschlepp mit großen turbulenten Wirbeln der Atmosphäre zu berücksichtigen. Andererseits sollte die Wechselwirkung von Turbulenz und Rotation im kompakten Wirbelkern gut aufgelöst werden. Während direkte numerische Simulationen (DNS) nur kleine Reynoldszahlen erreichen, beeinflusst das Schließungsmodell der Grobstruktursimulation (LES) die Entwicklung des Wirbelkerns. Beide Ansätze schaffen es nicht, die komplexe Interaktion von Turbulenz und Rotation bei großen Reynoldszahlen, mit den Einflüssen komplexer Flugzeuggeometrien und realistischer Umgebungsbedingungen zu vereinen. Trotz der enormen Entwicklung der Rechenleistung und eleganter numerischer Methoden werden Simulationen auch in der Zukunft auf Grenzen stoßen. Experimentelle Untersuchungen realer Wirbelschleppen werden daher auch weiterhin notwendig sein, um die Gültigkeit der Erkenntnisse numerischer Simulationen zu untermauern.

### 2.1 Lidar-Messungen

Bereits 1983 wurden erste Lidar Messungen von Wirbelschleppen am Flughafen Frankfurt durchgeführt. Damals wurde ein 10,6  $\mu\text{m}$ -Continuous-Wave-Doppler-Lidar eingesetzt, das ursprünglich für Wind- und Turbulenzmessungen in der atmosphärischen Grenzschicht entwickelt worden war. Die Ergebnisse dieser Messungen flossen in

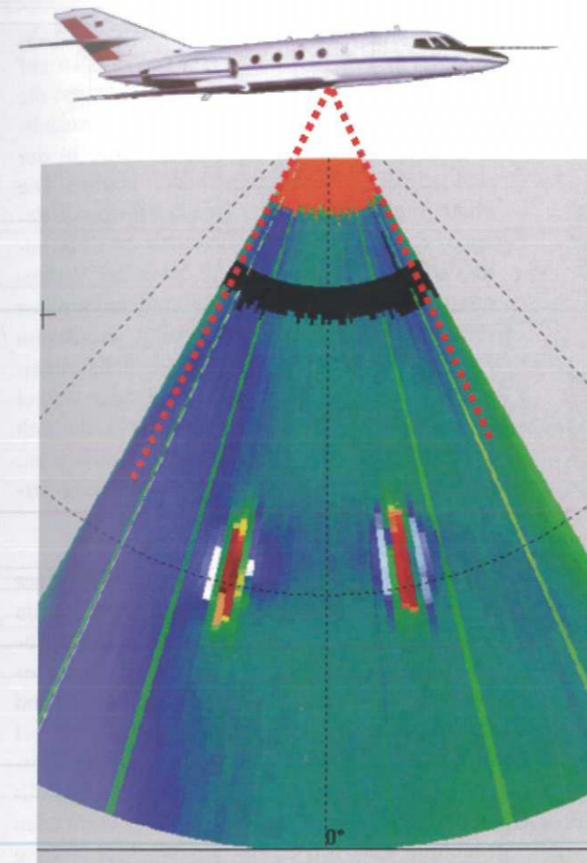


Abb. 13-3: Gleichzeitige Messung der Wirbelschleppen der A380 (rechts) und der A340 (links) mit Lidar an Bord des Forschungsflugzeugs Falcon.

die Entwicklung des Wirbelschleppenwarnsystems der Deutschen Flugsicherung für den Flughafen Frankfurt ein (GURKE und LAFFERTON 1997), welches aber nie in Betrieb genommen wurde.

Zahlreiche Messkampagnen mit unterschiedlichsten Anwendungen und Entwicklungen folgten an den Flughäfen Frankfurt, Istres, München, Oberpfaffenhofen, Tarbes und Toulouse. Während der WakeOP-Kampagne im Jahr 2001 wurden gemeinsam mit Kollegen vom *Office national d'études et de recherches aérospatiales* (ONERA) und der *Defence Evaluation and Research Agency* (DERA) drei Continuous-Wave-Lidar-Systeme am Flughafen Oberpfaffenhofen betrieben, um gleichzeitig die Wirbelschleppen des Forschungsflugzeugs *Advanced Technologies Testing Aircraft System* (ATTAS) zu vermessen. Mit Methoden der Triangulation wurden die Positionen der Wirbelkerne und ihre Abstände mit hoher Genauigkeit bestimmt. Später konnte gezeigt werden, dass auch ein gepulstes 2  $\mu\text{m}$ -Doppler-Lidar, trotz seiner großen Pulslänge von etwa 100 m, die Wirbel von ihrer Entstehung bis zu einem fortgeschrittenen Stadium des Zerfalls charakterisieren kann (KÖPP et al. 2004). Hohe Genauigkeiten der Wirbeltrajektorien und Zirkulation werden allerdings nur mit einem aufwändigen interaktiven Auswertalgorithmus erzielt. Jedoch

können mit dem Lidar alternierend auch Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der turbulenten Dissipationsrate bestimmt werden – beides Größen, die das Geschick der Wirbel stark beeinflussen.

Mit dem Airbus A380 wurde im Oktober 2007 ein Flugzeug in Betrieb genommen, dessen Spannweite und Gewicht frühere Flugzeuge deutlich übertrifft. Um geeignete Sicherheitsabstände zu anderen Flugzeugen festzulegen, hat Airbus ein noch nie dagewesenes Testprogramm mit 388 Flugstunden durchgeführt. Zwischen Mai 2005 und Dezember 2007 wurden über 600 Überflüge mit Lidar vermessen und eine einzigartige Datenbasis der Wirbelcharakteristiken der A380 und der Referenzflugzeuge A340 und B747 erstellt. Im August 2006 beobachteten hunderte Neugieriger, wie die A380 und eine B747 der Lufthansa über München ihre Kreise zogen, während am Flughafen Oberpfaffenhofen die Wirbelschleppen bei verschiedenen Flugzeugkonfigurationen mit Lidar vermessen wurden.

Das Testprogramm erreichte seinen Höhepunkt mit innovativen Lidar-Messungen an Bord des Forschungsflugzeugs Falcon (Abbildung 13-3). Zur Markierung der Nachlaufwirbel wurden Rauchgeneratoren an den Flügeln montiert oder Kerosin in die Triebwerksstrahlen eingespritzt. Durch den unmittelbaren Vergleich der Wirbelschleppen, der Flügelspitze an Flügelspitze fliegenden A380 und A340, konnte der Einfluss der Variabilität der Atmosphäre minimiert werden. Die Lidar Messungen ermöglichten es, die A380-Separationen vom vorläufigen Wert von 10 NM auf 6 NM, 7 NM beziehungsweise 8 NM für nachfolgende Flugzeuge der Gewichtsklassen Heavy, Medium beziehungsweise Light zu reduzieren (siehe Tabelle 13-1). Der Zuschlag von 2 NM gegenüber Heavys ergibt sich durch Aufrunden und einem Sicherheitszuschlag von 1 NM.

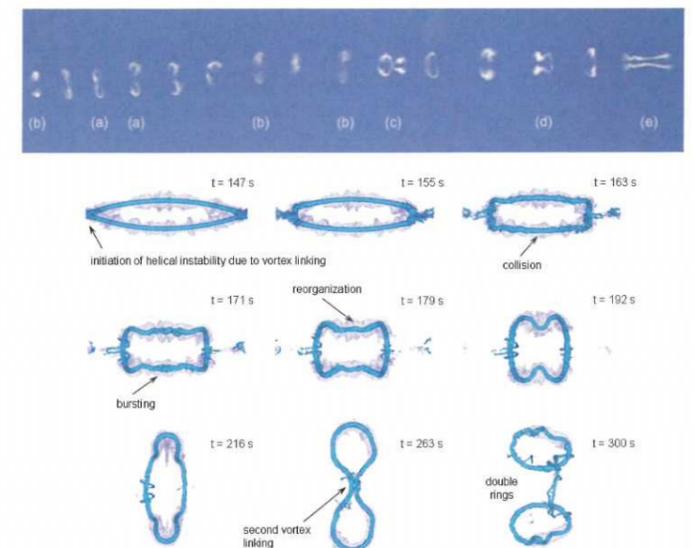


Abb. 13-4: Phasen der Wirbelringentwicklung (oben, Foto: Sven Lüke). Unten: LES der Wirbelschlepp in schwach turbulenter Umgebung (reproduziert aus MISAKA et al. 2012).

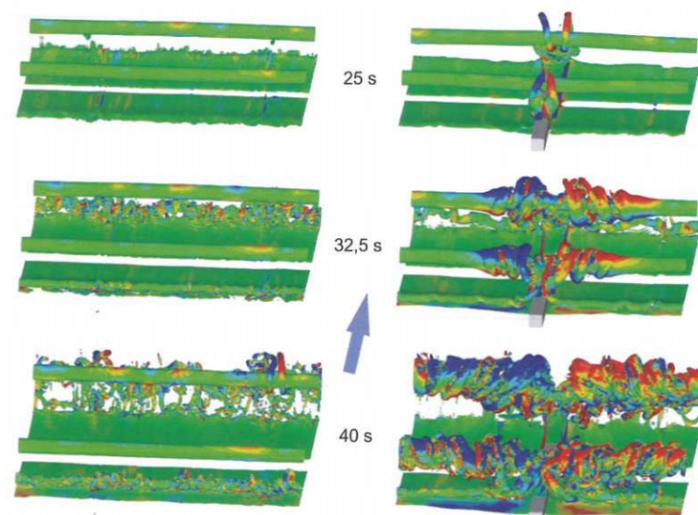


Abb. 13-5: Wandauflösende LES der Wirbelschleppenentwicklung in Bodennähe mit turbulentem Querwind. Links ohne und rechts mit Hindernis am Boden.

## 2.2 Grobstruktur-Simulation

Die hochauflösende Grobstruktursimulation (*Large Eddy Simulation, LES*) auf Supercomputern gewährt instruktive Einblicke in das Verhalten und die Physik der Wirbelschleppes bei unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen (PROCTOR und SWITZER 2000, DE VISSCHER et al. 2013). Sie leistet damit wertvolle Orientierungshilfe bei der Entwicklung schneller Wirbelschleppenvorhersagemodelle, die wiederum elementare Komponenten von Wirbelschleppenwarnsystemen sind. LES von Wirbelschleppen wurden in turbulenten, thermisch stabil geschichteten und gescherten Umgebungen sowie in konvektiven Grenzschichten durchgeführt. Dabei wurde unter anderem der zweiphasige Zerfallsprozess der Wirbelschleppes entdeckt, der später durch Lidar Messungen bestätigt wurde. Auch die Einbindung des Triebwerkstrahls in die absinkende Wirbelschleppes, mit den darauf folgenden Mischungs- und Verdünnungsprozessen der Abgase, waren Gegenstand von LES.

Die hier vorgestellten LES wurden mit MGLET durchgeführt - einem finite Volumenverfahren vierter Ordnung zur Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen, das das Lagrangesche Dynamische Schließungsmodell verwendet. Die numerischen Experimente nutzen typischerweise kartesische Gitter mit 1 m Auflösung und Rechengrößen von bis zu  $1024 \times 1024 \times 1024 \text{ m}^3$ . Solche großen Rechengrößen mit über einer Milliarde Gitterpunkten werden zum Beispiel verwendet, um große turbulente Längenskalen der umgebenden Atmosphäre zu realisieren. Höhere Auflösungen mit variablen Gitterabständen werden eingesetzt, um die Flugzeugumströmung, die Wirbelkerne oder die Bodengrenzschicht angemessen aufzulösen. Für die massiv parallelen Simulationen werden bis zu 2048 Prozessoren verwendet. Zwei Beispiele sollen die Möglichkeiten der LES exemplarisch darstellen.

Im Reiseflug ist die Umgebungsturbulenz, trotz starker Winde, meist nur schwach. Dafür begrenzt die in dieser

Höhe vorwiegend stabile thermische Schichtung die Lebensdauer der Wirbelschleppen auf etwa drei Minuten. Abbildung 13-4 skizziert die Wirbelentwicklung in einer neutral geschichteten, schwach turbulenten Umgebung, in der sich langlebige Wirbelringe bilden können. Die Photographie (oben) zeigt eine faszinierende Sequenz der Wirbelformen, die durch die LES (unten) schön reproduziert wird: Nach der Verbindung des Wirbelpaars entsteht zunächst ein fast rechteckiger länglicher Wirbelring, an dessen Flanken sich helixförmige Instabilitäten ausbreiten. Der darauf folgende knochenförmige Wirbel verwandelt sich in eine stehende Acht, die sich dann in zwei kleinere Einzelringe aufspaltet, welche später auch wieder zu einem Ring verschmelzen können (MISAKA et al. 2012).

Im Endanflug ist die Wahrscheinlichkeit einer Wirbelschleppenbegegnung am höchsten, da dort die Wirbel nicht ungehindert unter den Flugpfad absinken, sondern durch die Wechselwirkung mit dem Boden wieder aufsteigen können. Bei moderatem Querwind kann es passieren, dass der wiederaufsteigende Luvwirbel genau im Flugpfad eines nachfolgenden Flugzeuges verharrt. In der finalen Flugphase sollten unerwünschte Rollbewegungen des Flugzeuges jedoch unbedingt vermieden werden. Abbildung 13-5 links zeigt die Wechselwirkung der Primärwirbel mit den kohärenten Strukturen, die der Querwind am Boden erzeugt. Bei einem Wirbelalter von etwa 30 Sekunden löst sich die vom Leewirbel (hinten) erzeugte Wirbelschicht vom Boden ab und beginnt um den Primärwirbel zu rotieren (STEPHAN et al. 2013). Dabei entstehen aus den streifenförmigen Übergeschwindigkeiten des Querwindes am Boden (Streaks) Omega-Schleifen, die sich um die Primärwirbel wickeln und den Wirbelzerfall einleiten.

Geeignete Hindernisse am Boden (siehe Abbildung 13-5, rechts) können kräftige Sekundärwirbel auslösen, die dort wo die meisten Wirbelbegegnungen stattfinden, den Wirbelzerfall maßgeblich beschleunigen. An Flughäfen sollen anstatt der massiven Rechteckprofile leicht montierbare Plattenreihen installiert werden. Diese Idee nutzt gezielt Eigenschaften der Wirbeldynamik, um den Wirbelzerfall in Landebahnnähe zu beschleunigen. Abbildung 13-5 rechts gibt die einzelnen Schritte wieder:

- Frühe Ablösung kräftiger omegaförmiger Sekundärwirbel,
- Omega-Form bewirkt schnelle Annäherung an Primärwirbel durch Selbstinduktion,
- nachdem sich der Sekundärwirbel um den Primärwirbel gewickelt hat, breitet er sich – wiederum durch Selbstinduktion – in beide Richtungen entlang des Primärwirbels aus,
- der künstliche Wirbel bleibt mit dem regulären Bodenwirbel verbunden und bezieht dadurch von diesem weiterhin Energie,
- die intensive Interaktion der Primär- und Sekundär-

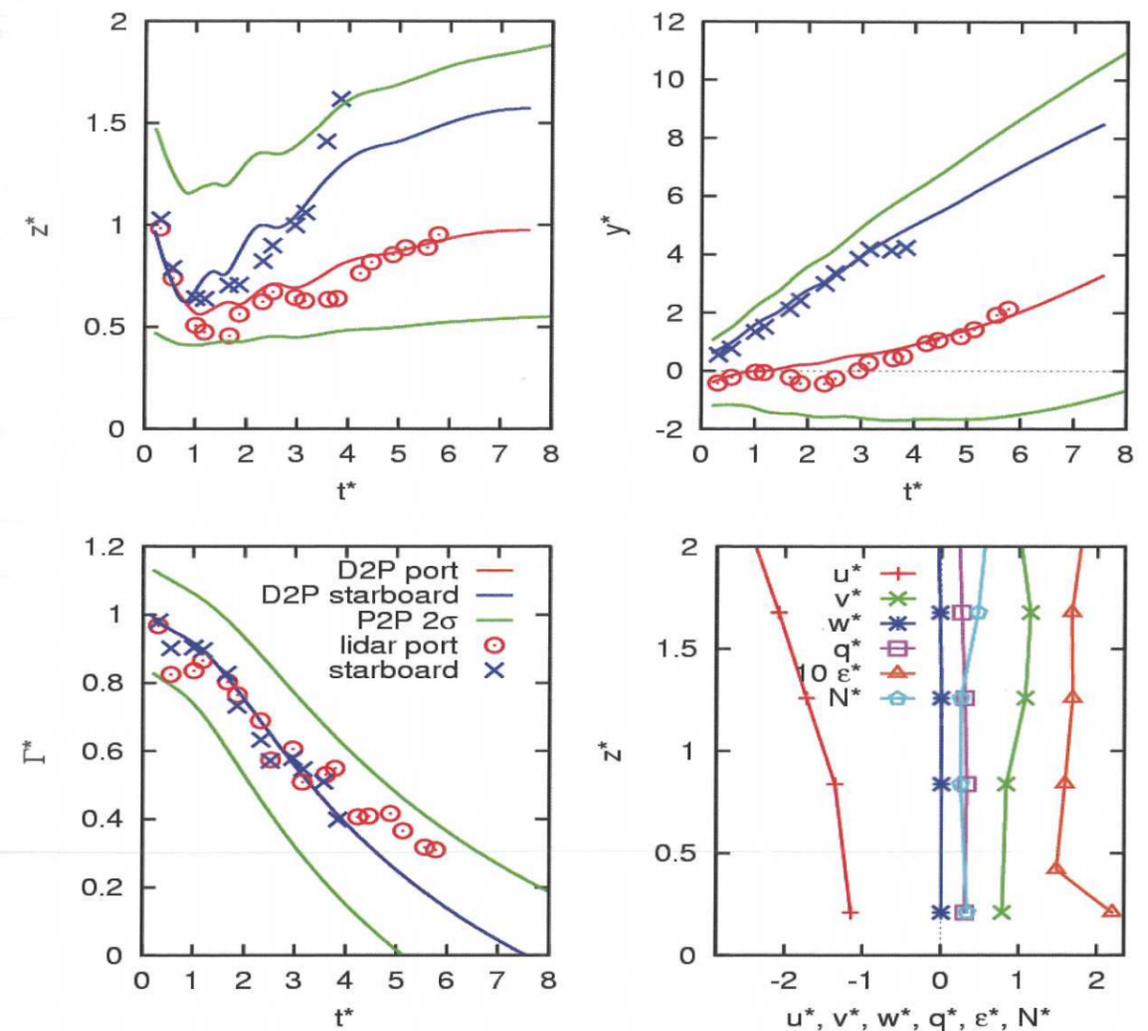


Abb. 13-6: Entwicklung der normierten vertikalen ( $z^*$ ) und lateralen Positionen ( $y^*$ ) und der Zirkulation ( $\Gamma^*$ ) der Wirbelschleppes am Boden. Messungen mit Lidar (Symbole) und Vorhersagen mit P2P-Wirbelschleppenmodell (Linien). Blaue und rote Linien bezeichnen deterministische Vorhersagen; grüne Linien probabilistische Einhüllende (95,4 %). Unten rechts vertikale Profile der normierten gemessenen meteorologischen Parameter.

wirbel, bewirkt einen rapiden Wirbelzerfall, unabhängig von den vorherrschenden Wetterbedingungen.

Im April 2013 wurden Feldexperimente mit dem Forschungsflugzeug HALO am Flughafen Oberpfaffenhofen durchgeführt, die die Wirkung des unter der Nummer DE 10 2011 010 147 patentierten Ansatzes belegen. Wie bei der hier vorgestellten Interaktion mit dem Boden, können Effekte der Turbulenz, thermischer Schichtung und Scherung (HOLZÄPFEL et al. 2003), aber auch Phänomene wie Wirbelaufplatzen oder die Bildung von Wirbeltrichtern (MISAKA et al. 2012), durch die Wechselwirkung primärer und sekundärer kohärenter Wirbelstrukturen gedeutet werden.

## 3 Modellbildung für die Luftfahrt

Um schnelle und zuverlässige Wirbelschleppenwarnsysteme zu entwickeln, müssen zunächst komplexe Komponenten (Flugzeugtrajektorien, Flugzeugparameter, me-

teorologische Bedingungen, Wirbelschleppen Verhalten, Sicherheitsabstände) angemessen vereinfacht und modelliert werden. Die Herausforderung liegt darin, einen optimalen Vereinfachungsgrad der Teilmodelle zu finden, der einerseits Echtzeitbetrieb erlaubt und andererseits seltene aber sicherheitsrelevante Ereignisse abdeckt. Exemplarisch wird hier das Probabilistische 2-Phasen Wirbelschleppentransport- und Zerfallsmodell P2P (HOLZÄPFEL 2003) vorgestellt.

Zunächst wurde P2P zur Prognose des Wirbelverhaltens bei Landungen entwickelt. Später wurde es auf Starts und den Reiseflug erweitert. P2P berücksichtigt alle relevanten flugzeugseitigen Parameter (Masse, Spannweite, Geschwindigkeit, Ort, Lagewinkel) und meteorologischen Größen (Wind, Windscherung, Turbulenz, thermische Schichtung, Dichte, Boden). Das Modell prognostiziert sowohl das deterministische (mittlere) Wirbelverhalten (D2P) als auch probabilistische Einhüllende der Wirbelposition und Stärke (P2P). Abbildung 13-6 zeigt exempla-

risch das asymmetrische Wiederaufsteigen der Wirbel in einer Querwindssituation kurz vor der Landebahn (Backbordwirbel rot, Steuerbordwirbel blau). Fast alle Lidar-Messungen (Symbole) liegen innerhalb der grünen prognostizierten probabilistischen Einhüllenden.

Das Modelldesign ruht auf vier Säulen:

1. Das Modell ist dimensionslos formuliert. Bei Verwendung der charakteristischen Größen anfänglicher Wirbelabstand  $b_0$  und Zirkulation  $\Gamma_0$  ergibt sich die Zeitskala  $t_0 = 2\pi b_0^2/\Gamma_0$ , die der Zeit entspricht, in der die Wirbel um einen Wirbelabstand absinken. Die Normierung ermöglicht das Wirbelschleppenmodell für vielfältige Luftfahrzeugtypen und Umgebungsbedingungen anzuwenden.
2. Die Gleichungen für den Zirkulationsverlauf und das Absinken basieren auf der exakten Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen für den laminar zerfallenden Potentialwirbel. Die Gleichungen wurden so erweitert, dass sie das Verhalten turbulenter Wirbelpaare wiedergeben können.
3. Parameter der Gleichungen wurden an Ergebnisse von LES-Simulationen des DLR und der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (PROCTOR und SWITZER 2000) angepasst. Präzise deterministische Wirbelschleppenprognosen sind in der Praxis kaum möglich. Die stochastische Natur der turbulenten Atmosphäre deformiert und transportiert die Wirbel in vielfältiger Weise, was zu erheblichen Bandbreiten von Wirbelposition und Stärke in Ort und Zeit führen kann (siehe Abbildung 13-4). Auch die Flugzeugparameter sind nie genau bekannt. Daher prognostiziert P2P primär Vertrauensintervalle der Wirbelparameter. Es kombiniert verschiedene statische und dynamische Sicherheitszuschläge und wurde
4. mit Daten aus Feldmessungen kalibriert, so dass letztlich Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Wirbelparameter prognostiziert werden können. Mit diesen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen kann die Prognose an das benötigte Wahrscheinlichkeitsniveau angepasst werden. Die Rechenzeit variiert je nach Anwendung zwischen etwa 0,001 s und 0,01 s.

Bislang wurde P2P mit Messdaten aus zwei US- und über sechs europäischen Messkampagnen mit insgesamt über 10 000 Fällen validiert. Dabei wurde es auf vielfältige Flugzeugtypen und Flugphasen inklusive Anflug, Landung, Start, Abflug und Cruise angewandt. Ein standardisiertes Bewertungsverfahren zeigt, dass die Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage über die Jahre kontinuierlich abnehmen. Dies belegt wiederum die Fortschritte in Simulation, Messung und Analyseverfahren.

#### 4 Wirbelschleppensysteme

Dieses Kapitel beschreibt die bodengebundenen und flugzeuggestützten Wirbelschleppenwarnsysteme WSVBS und

WEPS sowie das Luftraum-Simulationssystem „Wake-Scene“ zur Sensitivitäts- und Risikoanalyse.

#### 4.1 WSVBS

Das Wirbelschleppenvorhersage- und beobachtungssystem (WSVBS) wurde für die taktische Steigerung der Flughafenkapazität für eng benachbarte und einzelne Landebahnen konzipiert (HOLZÄPFEL et al. 2009). Vorläufersysteme waren das Wirbelschleppenwarnsystem (WSWS) der Deutschen Flugsicherung (GURKE und LAFFERTON 1997) und das *Aircraft Vortex Spacing System* (AVOSS) der NASA (HINTON et al. 2000). Das WSVBS soll eine dynamische Optimierung der Flugzeugabstände in Abhängigkeit des wetterbedingten Wirbelverhaltens ermöglichen, ohne dabei die Sicherheit einzuschränken. Dazu prognostiziert es den Wirbeltransport und Zerfall inklusive dynamischer Sicherheitsabstände zum Wirbel entlang des Gleitpfades vom *Final Approach Fix* bis zur Landebahnschwelle.

Der Engpass eines derartigen Landebahnsystems liegt in Bodennähe, da dort wiederaufsteigende Wirbel im Flugkorridor verharren können. Daher wird dort die beste Prognosequalität benötigt, die mit direkten Messungen der meteorologischen Parameter, mit zum Beispiel einem *Sound Detecting And Ranging/Radio Acoustic Sounding System* (SODAR/RASS) und einem Ultraschallanemometer, erzielt wird. Da man nicht den gesamten Gleitpfad derartig instrumentieren kann, werden dort die meteorologischen Bedingungen mit dem numerischen Wettervorhersagemodell *Consortium for Small-Scale Modelling-Airport* (COSMO-Airport) prognostiziert. COSMO-Airport kann als zeitverzögertes Ensemble betrieben werden, wobei die Anfangsbedingung stündlich unter Assimilation lokaler Messdaten (von zum Beispiel Regenradar, *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR), synoptischer *Observation* (SYNOP) und Radiosondenaufstiegen (TEMPS)) bestimmt werden. Damit prognostiziert das P2P-Modell die Einhüllende der Wirbelposition und Stärke der Wirbelschleppen in 13 ausgewählten Stationen entlang des Gleitpfades. Dazu addiert die *Simplified Hazard Area Prediction Method* (SHAPE) Sicherheitsabstände zur Wirbelschleppe, die einen sicheren und ungestörten Anflug gewährleisten. Diese Prognosen können optional für Gewichtsklassenkombinationen (zum Beispiel heavy/medium) oder individuelle Flugzeugtypenpaare erstellt werden. Der Zeitpunkt, an dem die berechneten Sicherheitsgebiete nicht mehr mit dem Flugkorridor überlappen, bestimmt die empfohlenen zeitlichen Flugzeugseparationen. Diese zeitlichen Abstände können vom Arrival Manager (AMAN) des DLR in räumliche Abstände etablierter Anflugverfahren übersetzt werden. Mit dem Lidar werden die Prognosen des WSVBS überwacht.

Eine Demonstrationskampagne für das Parallelbahnsystem des Frankfurter Flughafens zeigte, dass die Betriebsverfahren zur Optimierung der Wirbelschleppenstaffelung in 75 % der Zeit nutzbar gewesen wären (GERZ et al. 2009). Das WSVBS lief stabil und die vorhergesagten

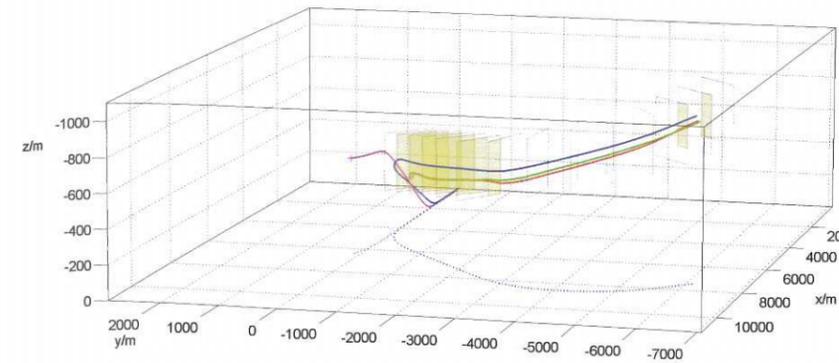


Abb. 13-7: WakeScene-Simulation von Abflügen. Momentaufnahme der Trajektorien des wirbelgenerierenden Flugzeugs (blau) und des nachfolgenden Flugzeugs (lila) mit den erzeugten Wirbelschleppen (Steuerbordwirbel grün, Backbordwirbel rot). Außerdem Projektionen der Trajektorien auf vertikale und horizontale Ebenen sowie gelbe Ebenen, in den die Wirbelschleppen berechnet werden.

Staffelungen wurden zu 100 % durch Lidar-Messungen bestätigt. Schnellzeitsimulationen schätzen den Kapazitätsgewinn unter Berücksichtigung eines realistischen Verkehrsmix und operativer Einschränkungen auf etwa 3 %. Das WSVBS zur Prognose dynamischer paarweiser Separationen wurde am Flughafen München im Sommer 2010 und Frühling 2011 erprobt.

#### 4.2 WEPS

In SESAR wird gemeinsam mit Airbus auch ein flugzeuggestütztes Wirbelschleppenwarnsystem entwickelt - das sogenannte *Wake Encounter Prevention System* (WEPS). Die Vorhersage der Wirbelschleppen benachbarter Flugzeuge ermöglicht die Vermeidung unerwünschter Wirbelbegegnungen durch relativ einfache und kleine Flugmanöver. Die dafür benötigten Flugzeug- und meteorologischen Daten werden über Datenlink (zum Beispiel den *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*, ADS-B) übertragen. Die vorhandenen Messungen verschiedener Flugzeuge von Wind und Temperatur werden mit Kalman-Filtern zu einer optimalen Schätzung der meteorologischen Bedingungen fusioniert.

#### 4.3 WakeScene

Das *Wake Vortex Scenarios Simulation* Softwarepaket (WakeScene) ermöglicht es die Wahrscheinlichkeit von Wirbelbegegnungen für verschiedene Szenarien des Luftverkehrs zu bestimmen (HOLZÄPFEL und KLADETZKE 2011). WakeScene unterstützt Sensitivitätsanalysen, Optimierungen und Risikobewertungen neuer Wirbelschleppenwarnsysteme, neuer Verfahren der Luftverkehrskontrolle und auch neuer Flugzeugtypen oder gar die Ausarbeitung einer neuen Staffelungsmatrix (RECAT). Abbildung 13-7 zeigt eine Momentaufnahme einer Simulation von Starts mit divergierenden Flugrouten am Flughafen Frankfurt. Da das nachfolgende Flugzeug (lila Trajektorie) erst spät abhebt und steil steigt, fliegt es bereits in geringer Höhe in die Wirbelschleppe des zuvor gestarteten Flugzeugs (blaue Trajektorie) ein.

WakeScene eignet sich gleichermaßen für Monte-Carlo-Simulationen und definierte Parametervariationen und erstellt statistische Analysen. Das Paket besteht aus Elementen, die den Verkehrsmix, die Flugzeugtrajektorien, die meteorologischen Bedingungen, das Wirbelverhalten und die potentiellen Gefährdungsgebiete modellieren. Die Flugzeugtrajektorien werden mit Punktmassmodellen oder Flugmanagementsystemen simuliert. Die einjährige meteorologische Datenbasis enthält Vertikalprofile der benötigten Parameter entlang der Gleitpfade des Flughafens Frankfurt in zehnminütiger Auflösung, welche mit einem numerischen Wettervor-

hersagemodell produziert wurden. Damit prognostiziert das P2P-Modell die Wirbeltrajektorien und Zirkulationen. Die Schwere potentieller Wirbelbegegnungen kann mit dem Airbus-Modell *Vortex Encounter Severity Assessment* (VESA) im Detail bestimmt werden (KAUERTZ et al. 2012).

Umfassende Sensitivitätsanalysen mit WakeScene wurden im EU-Projekt *Crosswind-Reduced Separations for Departure Operations* (CREDOS) für Starts bei Querwind durchgeführt (HOLZÄPFEL und KLADETZKE 2011). Demnach könnten bei Querwinden über 8 kt in 10 m Höhe die Flugzeugseparationen von 120 s auf 60 s reduziert werden. Divergierende Abflugrouten und die Drehung des Windes mit der Höhe (Ekman-Spirale) verhindern die Nutzung geringerer Querwindsschwellenwerte.

#### 5 Bewertung und Ausblick

Stetige Entwicklungen der Lidar-Messtechnik und der numerischen Grobstruktursimulation haben ein gutes Verständnis der meteorologischen Einflüsse und des Bodens auf den Transport, die Stärke und Topologie der Wirbelschleppe ermöglicht. Inzwischen können sogar spezielle Phänomene wie das Wirbelaufplatzen oder die Entstehung von Wirbeltrichtern simuliert und erklärt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung des schnellen, robusten und inzwischen gut validierten Wirbelschleppenmodells P2P genutzt. Mit weiteren Modellen und Datenbasen für Flugzeugtrajektorien, Flugzeugparameter, meteorologische Bedingungen und Sicherheitsgebiete, wurden Wirbelschleppenwarnsysteme für Landung, Start und Reiseflug, für einzelne und eng benachbarte Landebahnen sowie für Flugzeug Gewichtsklassenkombinationen und paarweise dynamische Separationen konzipiert und entwickelt (WSVBS, WEPS). Demonstrationskampagnen an den Flughäfen Frankfurt und München haben die Funktionalität der Systeme und die potentiellen Kapazitätsgewinne belegt. Softwarepakete zur Optimierung und Risikoanalyse dieser Systeme stehen zur Verfügung (WakeScene).

Nichtsdestotrotz ist weitere Forschung notwendig. Beispielsweise belegen sowohl Simulationen als auch Feldmessungen, dass Flugzeuge kurz vor der Landung häufig in geringem Abstand von oder sogar durch noch nicht vollständig zerfallene Wirbelschleppen fliegen. Um sichere und effiziente Warnsysteme zu entwickeln, muss genau verstanden werden, warum Landungen dennoch sicher sind. Möglicherweise können die vorgeschlagenen Plattenreihen zur Beschleunigung des Wirbelzerfalls in der kritischen Flugphase vor dem Aufsetzen, die Sicherheit und den Kapazitätsgewinn von Wirbelschleppenwarnsystemen signifikant erhöhen. Obgleich diese Systeme prinzipiell bereits verfügbar sind, müssen sie teilweise weiter optimiert werden und Risikoanalysen müssen ihre Sicherheit nachweisen, bevor sie tatsächlich an Flughäfen oder in Flugzeugen eingesetzt werden können. Ein verstärktes Augenmerk wird auch Wirbelschleppenrisiken im zukünftigen liberalisierten SESAR- beziehungsweise NextGen-Luftraum gewidmet werden müssen. Schließlich wird die neue Methode zur integrierten numerischen Simulation des Aufrollvorganges inklusive der Flugzeugumströmung tiefere Einblicke in den Einfluss von Flugzeugkonfiguration und Typ sowie Flugmanövern auf die Eigenschaften der Wirbel und ihren Zerfall gewähren.

#### Literatur

- BREITSAMTER, C., 2011: Wake vortex characteristics of transport aircraft. *Progr. Aerosp. Sci.* **47**, 89-134, DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.09.002.
- DE VISSCHER, I., BRICTEUX, L., WINCKELMANS, G., 2013: Aircraft Vortices in Stably Stratified and Weakly Turbulent Atmospheres: Simulation and Modeling. *AIAA J.* **51**, 551-566.
- GERZ, T., HOLZÄPFEL, F., DARRACQ, D., 2002: Commercial aircraft wake vortices. *Progr. Aerosp. Sci.* **38**, 181-208, DOI: 10.1016/S0376-0421(02)00004-0.
- GERZ, T., F. HOLZÄPFEL, W. GERLING, A. SCHARNWEBER, M. FRECH, K. KOBER, K. DENGLER, S. RAHM, 2009: The Wake Vortex Prediction and Monitoring System WSVBS, Part II: Performance and ATC Integration at Frankfurt Airport. *Air Traffic Control Quart.* **17**, 323-346.
- GURKE, T., LAFFERTON, H., 1997: The development of the wake vortex warning system for Frankfurt Airport: Theory and implementation. *Air Traffic Control Quart.* **5**, 3-29.
- HALLOCK, J.N., GREENE, G.C., BURNHAM, D.C., 1998: Wake Vortex Research – A Restrospective Look. *Air Traffic Control Quart.* **6**, 161-178.
- HINTON, D.A., CHARNOCK, J.K., BAGWELL, D.R., 2000: Design of an Aircraft Vortex Spacing System for Airport Capacity Improvement. *AIAA Paper* 2000-0622, 1-18.
- HOLZÄPFEL, F., 2003: Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* **40**, 323-331, DOI: 10.2514/2.3096.
- HOLZÄPFEL, F., HOFBAUER, T., DARRACQ, D., MOET, H., GARNIER, F., FERREIRA GAGO, C., 2003: Analysis of wake vortex decay mechanisms in the atmosphere. *Aerosp. Sci. Technol.* **7**, 263-275, DOI: 10.1016/S1270-9638(03)00026-9.
- HOLZÄPFEL, F., T. GERZ, M. FRECH, A. TAFFERNER, F. KÖPP, I. SMALIKHO, S. RAHM, K.-U. HAHN, C. SCHWARZ, 2009: The Wake Vortex Prediction and Monitoring System WSVBS - Part I: Design. *Air Traffic Control Quart.* **17**, 301-322.
- HOLZÄPFEL, F., KLADETZKE, J., 2011: Assessment of Wake Vortex Encounter Probabilities for Crosswind Departure Scenarios. *J. Aircraft* **48**, 812-822. DOI: 10.2514/1.C000236
- KAUERTZ, S., HOLZÄPFEL, F., KLADETZKE, J., 2012: Wake Vortex Encounter Risk Assessment for Crosswind Departures. *J. Aircraft* **49**, 281-291, DOI: 10.2514/1.C031522.
- KÖPP, F., RAHM, S., SMALIKHO, I., 2004: Characterization of Aircraft Wake Vortices by 2-µm Pulsed Doppler Lidar. *J. Atmosph. Ocean. Techn.* **21**, 194-206, DOI: 10.1175/1520-0426(2004)021<0194:COAWVB>2.0.CO;2.
- LANCHESTER, F.W., 1907: Aerodynamics. Constable, London.
- MISAKA, T., HOLZÄPFEL, F., GERZ, T., MANHART, M., SCHWERTFIRM, F., 2012: Vortex bursting and tracer transport of a counter-rotating vortex pair. *Phys. Fluids* **24**, 25104-1 – 25104-21, DOI: 10.1063/1.3684990.
- PRANDTL, L., 1918: Tragflügeltheorie. I. *Mitteilung, Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Mathematisch-physikalische Klasse, 451-477.
- PROCTOR, F.H., SWITZER, G.F., 2000: Numerical Simulation of Aircraft Trailing Vortices, Proc. 9th Conf. Aviation, Range Aerosp. Meteor., Paper 7.12, 511-516.
- ROSSOW, V.J., 1999: Lift-generated vortex wakes of subsonic transport aircraft. *Progr. Aerosp. Sci.* **35**, 507-660.
- SPALART, P.R., 1998: Airplane Trailing Vortices. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **30**, 107-138.
- SAFO 12007, 2012, Safety Alert for Operators, Federal Aviation Administration, [http://www.faa.gov/other\\_visit/aviation\\_industry/airline\\_operators/airline\\_safety/safo](http://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/safo).
- STEPHAN, A., HOLZÄPFEL, F., MISAKA, T., 2013: Aircraft Wake-Vortex Decay in Ground Proximity - Physical Mechanisms and Artificial Enhancement. *J. Aircraft* **50**, 1250-1260, DOI:10.2514/1.C032179.

# 14 Vorhersage fluggefährdender Turbulenz und ihre Registrierung

M. RASCHENDORFER, A. BARLEBEN

Forecast of hazardous turbulence for aviation and its registration

#### Zusammenfassung

Bislang gründen die benutzten Methoden zur Turbulenzvorhersage für die Luftfahrt noch zu häufig auf subjektiven und damit recht unzuverlässigen Einschätzungen, die den steigenden Kundenanforderungen nicht mehr genügen. Weil sich bislang auch durch die Nutzung verschiedenster aus NWV-Modellen abgeleiteter Turbulenzindizes (etwa des Ellrod-Indexes) kein wesentlicher Fortschritt erreichen ließ, fordert die ICAO die Entwicklung neuer Methoden, durch welche die Vorhersage der „Eddy Dissipation Rate“ (EDR), also der Dissipationssenk von Turbulenter Kinetischer Energie (TKE), ermöglicht wird. Diese Größe ist ein tatsächliches atmosphärisches Turbulenzmaß und zeichnet sich dadurch aus, dass sie eindeutig sowohl aus NWV-Modellen als auch aus Flugzeugmessungen abgeleitet werden kann. Beim DWD wird seit Kurzem ein Vorhersageverfahren eingesetzt, das auf der EDR-Berechnung durch das Turbulenzschema des COSMO-Modells basiert und durch Berücksichtigung bislang fehlender Quellterme der TKE aber auch durch Anpassung an EDR-Messungen US-amerikanischer Flugzeuge deutlich verbessert werden konnte.

#### Summary

Rather often, methods of forecasting the danger to aviation by turbulence are still based on subjective estimates, which can't meet the increasing requirements of customers any longer. As even the use of various turbulence indices (like the Ellrod-index) derived from NWV models could not establish a substantial improvement, ICAO requirements suggest the development of new methods facilitating the forecast of Eddy Dissipation Rate (EDR). This real property of atmospheric turbulence is the main sink term of Turbulent Kinetic Energy (TKE) and can uniquely be derived from both, NWV models and aircraft measurements. For a short time DWD has been applying a method based on EDR calculated by the turbulence scheme of the COSMO-model. The implementation of so far missing source terms of TKE as well as adaptations to EDR-measurements taken from US aircrafts caused a considerable improvement.

#### 1 Einleitung

Zum Teil erhebliche Beeinträchtigungen des Flugverkehrs gehen von „Turbulenzgebieten“ aus, womit atmosphärische Bereiche mit kräftigen Windfluktuationen gemeint sind. Wenn auch Turbulenz häufig nur im Zusammenhang mit vermindertem Passagierkomfort, schnellerer Materialermüdung oder erhöhtem Treibstoffverbrauch genannt wird, so können darüber hinaus immer wieder folgenschwere Flugvorkommnisse bis hin zu Abstürzen auf das Phänomen „Turbulenz“ zurückgeführt werden. Daher legen internationale Regularien der ICAO (Annex 3) fest, dass der gesamte Luftraum zwischen Boden und einer Höhe von in

der Regel 15 km darüber auch bezüglich des Auftretens von Turbulenz zu überwachen ist.

Weil bislang zuverlässige Vorhersagemethoden fehlen, und Überwarnungen zu unnötigen Störungen des Luftverkehrs führen würden, geben *Meteorological Watch Offices* häufig erst dann eine Warnung vor einem Turbulenzgebiet aus, wenn dies bereits durch Pilotenmeldungen, den so genannten „Pilot Reports“ (PIREPs), als Gebiet mit zumindest mäßiger Turbulenz gemeldet wurde. Dies führt aber dazu, dass von den etwa 400 Flugvorkommnissen durch Turbulenz, die durchschnittlich innerhalb von drei Jahren über den USA bekannt werden, nur etwa 30 % durch Warnungen