

Probleme und Möglichkeiten der Einbindung von Wirbelschleppenbeobachtungs- und Wirbelschleppenerkennungssystemen in die ATC-Umgebung

G. Ringel, W. Gerling, J. Reichmuth
DLR Institut für Flugführung
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ÜBERSICHT

Hinter Flugzeugen entstehen als Reaktion auf den Auftrieb an den Tragflächen zwei gegensinnig rotierende Wirbel. Diese sogenannte Wirbelschlepe kann zur Gefahr für ein nachfolgendes Flugzeug werden. Es sind deshalb zusätzlich zu der allgemein geltenden Radarstaffelung erweiterte Sicherheitsabstände vorgeschrieben, die an großen Verkehrsflughäfen die ohnehin knappe Bahnkapazität für An- und Abflüge beschränken.

Eine sichere Reduktion der Wirbelschleppenstaffelungsabstände im Endanflug erfordert die Beurteilung ob, wann und wie weit ein nachfolgendes Flugzeug in den Anflugkorridor einfliegen darf, ohne von der Wirbelschlepe des Vorgängers gefährdet zu werden. Zu diesem Zweck werden weltweit Systeme zur Wirbelschleppenerkennung bzw. -vorhersage entwickelt. Der Integration der damit verbundenen Verfahren in den betrieblichen Ablauf der Luftverkehrskontrolle (ATC) kommt dabei besondere Bedeutung zu. Eine solche Einbindung gelingt dann, wenn die erforderlichen Änderungen der aktuell existierenden Abläufe von den verantwortlichen Personen (Lotsen, Piloten) akzeptiert werden. Dazu müssen sie auf verlässlichen Informationen basieren, unter vertretbarer Arbeitsbelastung ausführbar sein und den Anforderungen sicherheitskritischer Systeme genügen (Genehmigungsverfahren, Ausrüstung am Flughafen, Ausrüstung im Flugzeug, Schulung des beteiligten Personenkreises).

1. EINLEITUNG

In den zurückliegenden Jahren hat das Thema „Wirbelschlepe“ im Bereich der Luftfahrt zunehmendes Interesse und wachsende Aufmerksamkeit gefunden [1].

Dies zeigt sich in einer Vielzahl internationaler Aktivitäten, die sich in Europa u.a. im thematischen Netzwerk WakeNet2-Europa dokumentieren sowie in der Einrichtung solcher Projekte wie

- C-Wake – Wake Vortex Characterisation and Control [2]
- I-Wake – Wake Vortex Instrumentation [3]
- S-Wake – Assessment of Wake Vortex Safety [4]
- AWIATOR – Advanced Wing with Advanced Technology Operation [5].

Die Arbeiten zielten und zielen insbesondere auf eine Vertiefung der Kenntnisse vom Verhalten der Wirbelschleppen, Möglichkeiten zu deren Beeinflussung und Sicherheitsbetrachtungen.

Unter Sichtflugbedingungen können Piloten nach Absprache mit den Fluglotsen auf Wirbelschleppenstaffelung im Endanflug verzichten [6]. Weltweit wird intensiv daran gearbeitet, durch Einsatz technischer Systeme auch unter IFR-Bedingungen solche reduzierten Staffelungsabstände nutzbar zu machen. Dafür muss entlang des gesamten Flugweges ein wirbelschleppenunkritischer Flugkorridor gewährleistet sein..

Die derzeit nach ICAO [7] geltenden Wirbelschleppenstaffelungsabstände zwischen landenden Flugzeugen sind empirisch gewonnen und richten sich nach Gewichtsklassen, die pauschal aus dem Maximum Take of Weight (MTOW) abgeleitet sind (Tab. 1).

Trailing Aircraft	Leading Aircraft		
	Heavy ≥ 136 t	Medium < 136 t ... > 7 t	Light ≤ 7 t
Heavy	4	3	3
Medium	5	3	3
Light	6	5	3

Tab. 1: ICAO-Staffelungsabstände an der RWY-Schwelle unter IFR-Bedingungen in NM [7]

Weitere Flugzeugparameter, welche bekanntermaßen [8] auf die Wirbelstärke Einfluss haben wie Fluggeschwindigkeit, Spannweite oder das aktuelle Gewicht werden dabei z.Z. nicht berücksichtigt. Ebenso unberücksichtigt bleiben derzeit noch die meteorologischen Bedingungen, die die Lebensdauer der Wirbel beeinflussen wie Windstärke oder Turbulenz. Unterschiede eines Luftfahrzeugs bezüglich seiner Wirbelschleppenerzeugung und seinen Eigenschaften bei Wirbelschleppenkontakt sind im verwendeten Klassifikationsschema ebenfalls nicht ausweisbar. Die Bestimmung derartiger wirbelschleppenrelevanter Parameter und ihre Implementierung in entsprechende Modelle des Wirbelverhaltens, des Wetters und der Flugzeugeigenschaften sollen es ermöglichen, Prognosen der Wahrscheinlichkeit und Auswirkung von Wirbelschleppenbegegnungen zu erarbeiten. Durch die dadurch ermöglichte detailliertere Betrachtung konkreter Wirbelschleppengefährdungsszenarien wird langfristig die Voraussetzung für eine Reduzierung der derzeit gültigen Staffelungsabstände an Flughäfen geschaffen, ohne dass der hohe Sicherheitsstandard im Luftverkehr beeinträchtigt wird. Der Verfügbarkeit von Wirbelschleppenvorhersage- und Wirbelschleppenbeobachtungssystemen und ihrer Integration in die ATC-Umgebung wird dabei besondere Bedeutung beigemessen.

2. IST-SITUATION

Die Flugzeuggewichtsklassen und die daraus resultierenden Wirbelschleppenstaffelungsabstände basieren auf dem MTOW der Flugzeuge. Bei dem von der ICAO festgelegten Standard werden die LFZ nach ihrem maximalem Startgewicht (MTOW) den drei Gewichtsklassen Heavy, Medium und Light zugeordnet. Der ICAO-Standard wird nahezu weltweit verwendet. Abweichende Regelungen finden sich jedoch national u.a. in den USA und Großbritannien. In diesen Ländern werden mehr als nur drei Gewichtsklassen unterschieden. Die B757, die vom Gewicht her der Kategorie „Large“ (ICAO: „Medium“) zugehörig ist, wurde in den USA als voranfliegendes Luftfahrzeug der Klasse „Heavy“ zugeordnet, weil vermutet wurde, dass von diesem Typ besonders starke, langlebige Wirbel erzeugt würden.

In Abb.1 sind die entsprechenden Wirbelschleppenklassifizierungen sowie die zugehörigen Staffelungsminima grafisch veranschaulicht. Die horizontale Achse korrespondiert dabei mit dem Flugzeuggewicht (MTOW), während die vertikale Achse die erforderliche Staffelung bezeichnet.

Die Abbildung zeigt für jeden der drei Standards (ICAO, US, UK) die Staffelungsabstände für zwei Fälle:

- (1) führendes LFZ vom Typ „Heavy“
(obere horizontale Linie)
- (2) führendes LFZ vom Typ „Medium“ (ICAO), „Large“ (USA) oder „Lower Medium“ (UK).
(untere horizontale Linie)

Der untere Staffelungswert von 3 NM resultiert aus der generell gültigen Radarstaffelung, die unabhängig von den Wirbelschleppenverhältnissen in der Regel nicht unterschritten werden darf. In einigen wenigen Ausnahmefällen wird eine verminderte Radarstaffelung angewandt (z.B. 2,5 NM am Flughafen Frankfurt/Main).

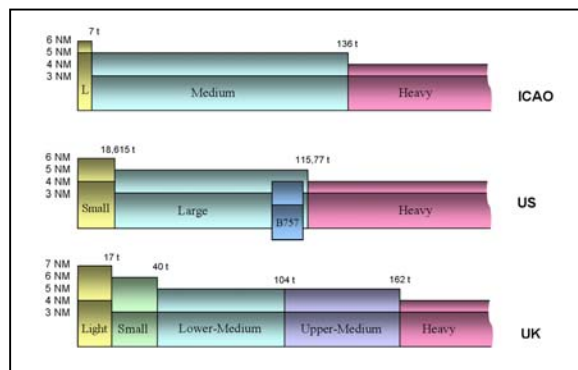


Abb. 1: LFZ- Gewichtsklassen und Staffelungsabstand

Eine Reduzierung der Separationsminima ist nur zu erreichen, wenn es gelingt, die vorhandene Technik weiter zu verbessern (z.B. Navigationsgenauigkeit der LFZ), neue Technologien in und an Flugzeugen zu implementieren (z.B. Low Vorticity Vortex) und/oder die Messtechnik zur Erfassung von Wirbelschleppen zu verbessern. Zu Letzterem gehören auch die Entwicklung von Prognosemodellen und die Herstellung der Echtzeitfähigkeit. Von den genannten Aktivitäten sind unterschiedliche Interessengruppen betroffen:

- nationale/internationale Regulierungsbehörden
- Flughafenbetreiber
- Flugzeughersteller
- Lotsen und Flugsicherungsorganisationen
- Piloten und Luftverkehrsgesellschaften
- Forschungseinrichtungen

Eine Darstellung ausgewählter Aktivitäten und unterschiedlicher Sichtweisen der einzelnen Interessengruppen ist u.a. in [8] enthalten. Das breit gefächerte Spektrum verdeutlicht die Vielschichtigkeit der Problematik. Strategische Lösungsansätze basieren auf einer Vertiefung der Kenntnisse zu Lebensdauer und Zerfall der Wirbelschlepe, die langfristig zur Reduzierung der wirbelschleppenbasierten Staffelung führen können oder aber konstruktive Veränderungen am Flugzeug selbst zur Folge haben.

Aus taktischer Sicht stehen kurz- und mittelfristige Aktivitäten zur Modifikation operationeller Anflugverfahren im Zentrum des Interesses, um z.B. in Verkehrsspitzen weiter über ausreichende Kapazität am Flughafen verfügen zu können. Welcher Beitrag hierzu aus ATC-Sicht geleistet werden kann, soll nachfolgend diskutiert werden.

Unter Kapazität wird im Folgenden die Summe startender und landender Flugzeuge pro Zeiteinheit verstanden.

3. MINIMIERUNG DES KAPAZITÄTSPROBLEMS AUS ATC-SICHT

Die Luftverkehrskontrolle (ATC) steuert und überwacht die Bewegungen des an- und abfliegenden Luftverkehrs. Sie koordiniert die unterschiedlichen Verkehrsströme und vereinigt den anfliegenden Verkehr zum gestaffelten Endanflugstrom auf dem Gleitpfad. In Verkehrsspitzenzeiten wird hier im Final Approach die Kapazität des Flughafens durch die einzuhaltende Wirbelschleppenstaffelung beschränkt.

Aus ATC-Sicht ergeben sich zwei prinzipielle Herangehensweisen zur Steigerung der Kapazität an Flughäfen:

- 1) Konsequente Ausnutzung der konventionellen Staffelung
- 2) Reduzierung der Wirbelschleppenstaffelung

3.1 Ausnutzung der konventionellen Staffelung

Die Ausnutzung der konventionellen Staffelung lässt sich durch folgende Maßnahmen optimieren:

- Optimierung der Anflugsequenz
- Optimierung der Bahnzuweisung
- Optimierung des Mix aus an- und abfliegendem Verkehr
- Homogenisierung des Verkehrs in Verkehrsspitzen

- Optimierung der Anflugsequenz

Das Optimieren der Anflugsequenz kann durch das Abgehen vom Prinzip „first come, first serve“ erreicht werden, indem z.B. Flugzeuge gleicher Gewichtsklasse hintereinander gestaffelt werden. Zur Veranschaulichung sind für je zwei Flugzeuge vom Typ „Heavy“ bzw. „Light“ die möglichen Sequenzfolgen und daraus abzuleitende Staffelungsabstände in Tab. 2 wiedergegeben. Ein möglicher Kapazitätzuwachs

ist gut erkennbar. Bereits dieses kleine Beispiel verdeutlicht, dass mit zunehmender Anzahl zu berücksichtigender Flugzeuge eine solche Optimierung sehr komplex werden kann und für ihre Umsetzung der Einsatz entsprechender Planungstools zur Unterstützung der Lotsen erforderlich wird.

Einschränkend muss zugestanden werden, dass in diesem Beispiel nur eine Gruppe von 4 Flugzeugen betrachtet wurde. Das tatsächliche Einsparpotential kann auch geringer sein und hängt im Einzelfall davon ab, welche Flugzeugkategorie sich vor und nach dieser Gruppe in der Sequenz befindet. Außerdem werden gerade zu den Verkehrsspitzen die Großflughäfen kaum von Flugzeugen des Typs „Light“ angefliegen und der mögliche Optimierungsgewinn für Flugzeuge des Typs „Medium“ ist geringer. Zudem findet auch heute schon eine Teiloptimierung statt, wenn Lotsen kleinere Änderungen in der Reihenfolge vornehmen.

Sequenz	Abstand (NM)	Total (NM)
H – L – H – L	6 – 3 – 6	15
H – H – L – L	4 – 6 – 3	13
H – L – L – H	6 – 3 – 3	12
L – L – H – H	3 – 3 – 4	10

Tab. 2: Beispiel für Optimierung der Anflugsequenz

- Optimierung der Bahnzuweisung

Stehen mehr als eine Landebahn zur Verfügung können über eine geschickte Zuordnung der Luftfahrzeuge zu den Bahnen Wirbelschleppenstaffelungen reduziert werden. So würde sich bei zwei unabhängigen Landebahnen die Sequenz H-L-H-L im ungünstigsten Fall zu jeder Bahn mit insgesamt (6+6) NM erforderliche Staffelung, im günstigsten Fall mit L-L auf der einen und H-H auf der anderen Bahn mit (3+4) NM ergeben.

Schon an diesem Beispiel ist erkennbar, dass mit dem Betreiben von zwei unabhängigen Landebahnen unter bestimmten Voraussetzungen die Kapazität mehr als verdoppelt werden kann im Vergleich zum Einbahnsystem.

- Optimierung des Mix aus an- und abfliegendem Verkehr

Auch wenn zu Verkehrsspitzenzeiten überwiegend Landungen durchgeführt werden, ist die Kapazität einer Start/Lande-Bahn bestimmt durch die Summe landender und startender Flugzeuge. Jedes startende Flugzeug erfordert ein Zeitfenster, das durch eine Lücke im Anflugstrom realisierbar ist. Ein solches Zeitfenster kann durch entsprechende Optimierung in der Anflugfolge erzeugt werden. Derartige Optimierungsprozeduren hinsichtlich der Bahnkapazität erfordern eine koordinierte Planung von An- und Abflügen.

Dies ist im Vergleich zum vorher genannten Vorgehen eine deutlich komplexere Aufgabenstellung. Darüber hinaus sind zusätzliche Besonderheiten am Flughafen wie z.B. Bahntypus, Abflugslots und Rollführungsprozesse zu berücksichtigen [9].

- Homogenisierung des Verkehrs in Verkehrsspitzen

Die Nachfrage am Flughafen nach Starts oder Landungen ist nicht gleichmäßig über den Tag verteilt. Vielmehr treten in der Regel mehrmals am Tag Verkehrsspitzen auf, in denen die Nachfrage die Kapazitätsgrenze des Flughafens übersteigt und folglich die Verspätungen ansteigen. Um dieser Nachfrage besser gerecht werden zu können, ist es anzustreben, dass in diesen Spitzenzeiten nur solche Flugzeugtypen abgefertigt werden, für die vergleichsweise geringe Restriktionen zur erweiterten Wirbelschleppenstaffelung vorliegen, d.h. vorzugsweise Flugzeuge vom Typ „Heavy“ und „Medium“.

Die aufgezeigten Maßnahmen erfordern z.T. nur geringfügige Veränderungen im Bereich der Luftverkehrskontrolle (ATC), stellen aber u.U. erhöhte Anforderungen an eine vorausschauende Planung (ATM). Sie erfordern Verständnis bei Piloten und Airlines (z.B. zusätzliche Warteschleifen) und können zu veränderten Rollkonzepten beim Flughafenbetreiber führen. Deutlich wird, dass die koordinierte und vorausschauende Planung des Verkehrs ein sehr komplexes Gebiet ist und eine betriebliche Einführung einzelner Schritte meist nur mit Hilfe entsprechender Tools zur Unterstützung der Lotsen zu erreichen ist.

3.2 Reduzierung der Wirbelschleppenstaffelung

Eine Änderung der bestehenden Vorschriften hinsichtlich einer Reduzierung der Staffelung bei Wirbelschleppengefährdung kann nur erreicht werden, wenn es gelingt, bord- und bodenseitig neue Technologien, Ausrüstungen und Verfahrensweisen zu entwickeln für

- Wirbelschleppenvermeidung,
- Wirbelschleppenvorhersage und/oder
- Wirbelschleppendetektion.

- Wirbelschleppenvermeidung

Hierunter sind alle die Maßnahmen zu sehen, die Größe, Stärke und Lebensdauer der Wirbelschleppe beeinflussen. Sie sind direkt an das Flugzeug gekoppelt und daher durch den Hersteller bestimmt. Die Stärke einer Wirbelschleppe wird u.a. beeinflusst durch:

- Gewicht des Flugzeuges,
- Flügel- und Klappenform,
- Position von Triebwerken und Klappen,
- Geschwindigkeit des Flugzeuges und
- Beschaffenheit der Oberflächen.

Bei den Vorgehensweisen zur Wirbelschleppenvermeidung lassen sich zwei prinzipielle Ansätze für konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Wirbelschleppen erkennen:

- Low Vorticity Vortex (LVV)
Wirbelschleppen, die sich durch deutlich verringerte maximale Wirbelstärke und großen Kernradius auszeichnen.
Bei der Entwicklung des neuen VLTA (Very Large Transport Aircraft) wird eine solche Strategie verfolgt mit dem Ziel, dass seine Wirbelschleppe nicht stärker ist als die Wirbelschleppe des gegenwärtig größten zivilen Flugzeugs (B 747) [8].

- Quickly Decaying Vortex (QDV) Wirbelschleppen, die durch beschleunigten Zerfall, unabhängig von den Umgebungsbedingungen, gekennzeichnet sind. Erreicht werden kann ein solcher Zerfall durch das gezielte Erzeugen von Instabilitäten [10].

Die beiden genannten Verfahren haben zum Ziel, das Gefährdungspotential, das aus der Wirbelschlepe für das nachfolgende Flugzeug resultiert, zu reduzieren. Ihre konstruktive Umsetzung erfordert im Einzelfall den Einbau neuer Elemente, für die ein entsprechender Nachweis zu erbringen ist, dass tatsächlich die beabsichtigte Wirkung erreicht und die Sicherheit des Flugbetriebs nicht beeinträchtigt wird. Unzureichend geklärt ist in diesem Zusammenhang bis jetzt auch, inwieweit Aussagen und Ergebnisse aus Untersuchungen im Nahfeld auf das Fernfeldverhalten der Wirbelschleppen extrapoliert werden können.

- Wirbelschleppenvorhersage

Hierunter sind alle die Maßnahmen zu verstehen, die darauf zielen, das Verhalten der Wirbelschlepe unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen zu prognostizieren. Sie erfordern die Installation zusätzlicher Meßsysteme am Boden. Das Vorhersagemodell sollte dabei in der Lage sein, Position und Stärke der Wirbelschlepe entlang des Gleitpfades in Abhängigkeit von den aktuellen Witterungsbedingungen so exakt zu ermitteln, dass daraus generierte Staffelungsabstände z.B. in gängige Anflugverfahren ohne Sicherheitsverlust integrierbar sind. Ein solches Modell kann gespeist werden durch das Monitoring der Wirbelschlepe und/oder die Aufzeichnung atmosphärischer Parameter wie

- Wind (Richtung, Stärke),
- Turbulenz,
- Windscherung und
- thermische Schichtung.

Das Monitoring der Wirbelschlepe z.B. mittels Doppler-Lidar-Messungen (Light Detection and Ranging) ist ein nur eingeschränkt nutzbares Verfahren, da es z.B. bei Nebel versagt. Es ist andererseits das am weitesten entwickelte Verfahren und einer operationellen Nutzung somit vergleichsweise schnell zugänglich. Relativ neu und wenig erprobt ist dagegen das System RASS (Radar Acoustic Wake Vortex Sensor System), ein atmosphärischer Profiler, dessen Tests zum Tracken, Detektieren oder/und Messen von Wirbelschleppen erfolgreich waren [11].

Die Erfassung und Verarbeitung atmosphärischer Parameter zur Berücksichtigung in entsprechenden Wirbelschleppen-transport- und Wirbelschleppenzerfallsmodellen ist unumgänglich für Prognosen über das Verhalten der Wirbelschlepe. Ohne sie ist eine Reduktion des wirbelschleppenbasierten Staffelungsabstandes aufeinanderfolgender Flugzeuge kaum möglich [12]. Bei der Erfassung der Atmosphärenparameter ist darauf zu achten, dass entsprechende Messdaten nicht nur in Bodennähe sondern entlang des gesamten Gleitpfades zur Verfügung stehen. Daraus können dann Aussagen zur Wirbelschleppenfreiheit des Flugkorridors generiert werden. Sie sind mit einer Voraussetzung dafür, dass die reduzierten Staffelungsminima Akzeptanz bei den Nutzern finden. Ein solches Vorgehen berücksichtigt in besonderem Maße die Interessenlage der Piloten [13].

Mit der Vertiefung des Wissens über die meteorologischen Bedingungen am Flughafen und ihren Einfluss auf das Verhalten der Wirbelschleppen ist auch das Ziel verbunden, Konzepte zu entwickeln, die eine Korrelation zwischen Wirbelschleppenverhalten und aktueller Wetterlage erlauben ein Ansatz, der mit der Definition von sogenannten „Wake Vortex Behaviour Classes“ (WVBC) eine mögliche Umsetzungsstrategie aufzeigt [14].

- Wirbelschleppendetektion

In diesen Bereich fallen alle Maßnahmen zur Erkennung der Wirbelschlepe. Diese kann bord- oder/und bodenseitig erfolgen und setzt entsprechende Ausstattung voraus, die für die Bodenseite weiter oben bereits genannt wurde (z.B. Lidar, RASS).

Die prinzipielle Machbarkeit des bordseitigen Tracking von Wirbelschleppen konnte mittels Lidar im Rahmen des EU-geförderten Projektes MFLAME (Multifunction Future Laser Atmospheric Measurement Equipment) nachgewiesen werden [15]. Jedoch sollten bordseitig operierende Systeme nicht autonom arbeiten sondern durch Bodendaten gestützt werden (z.B. aktuelle Wetterdaten, Wettermodell des Flughafens). Ein solches zu entwickelndes System sollte gezielt in Kooperation mit ATC verwirklicht werden.

Insgesamt ist die für den Einsatz derartiger Systeme zu leistende Arbeit noch sehr umfangreich, einige offene Probleme seien hier kurz genannt:

- (1) Es muss zwischen „gefährlicher“ und „nicht gefährlicher“ Wirbelschlepe unterschieden werden können. Dieses Problem ist nicht nur an die Stärke und Lage der Wirbelschlepe selbst gebunden sondern auch daran, inwieweit ein nachfolgendes Flugzeug die Wirbelschlepe des Vorgängers bewältigen, d.h. das auf es einwirkende Rollmoment gefahrlos ausregeln kann. Dabei spielen flugzeugspezifische Parameter eine Rolle wie z.B. Spannweite und aktuelles Gewicht.
- (2) Welche Sensoren mit welchen Genauigkeiten sind erforderlich zur Erfassung der entscheidenden Messgrößen?
- (3) Die zu nutzenden Sensoren sind auf ihre generelle Wettertauglichkeit hin auszuwählen. Die Notwendigkeit des Einsatzes komplementär arbeitender Sensoren ist zu prüfen (Allwettertauglichkeit des Gesamtsystems).
- (4) Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Schwierigkeit, durch Wirbelschleppen hervorgerufene Turbulenzen von atmosphärischen zu unterscheiden.
- (5) Die bordseitigen Messdaten erfordern eine Harmonisierung mit bodenseitig erfassten Daten. Die zur Auswertung verwendeten Modelle zur Ermittlung des Gefährdungspotentials sind zu verifizieren.
- (6) Geklärt werden muss ferner die Frage nach dem Ziel der Warnung vor einer Wirbelschlepe. Sie kann z.B. zur Vermeidung der Wechselwirkung mit einer Wirbelschlepe erfolgen, aber auch der Vorbereitung auf eine solche dienen. Die Zielsetzung kann die Akzeptanz und die Arbeitsbelastung der Operateure beeinflussen.
- (7) Der Detektionsbereich der Systeme ist genau festzuschreiben (z.B. Reichweite). Ihr konfliktfreier Einsatz im Flughafennahbereich muss sichergestellt sein.

(8) Die Grenzen der betrieblichen Anwendung sind zu spezifizieren. Dies betrifft die Übergänge zu Verfahren ohne reduzierte Wirbelschleppenstaffelung ebenso wie das Verhalten bei Systemfehlern und bei Ausfall von Teilkomponenten.

Eine verlässliche Wirbelschleppenerfassung kann für die Kontrolle der Wechselwirkung eines Flugzeuges mit einer Wirbelschleppe genutzt werden. In Simulationen konnte gezeigt werden, dass Piloten auf das durch eine Wirbelschleppe ausgelöste Rollmoment mit Gegensteuern reagieren, wenn entsprechende Informationen vorab vorliegen [16]. Die Frage ist, ob und wie ein solches Verhalten gezielt in das bordseitige Flugkontrollsystem integriert werden kann, um das Risiko zu minimieren. In [17] wird auf Basis dieses Gedankens ein sogenannter „Vortex Controller“ entwickelt, der auf ein wirbelschleppeninduziertes Moment reagiert, bevor durch dieses Moment signifikante Fluglageänderungen ausgelöst werden. Die Kombination dieses „Vortex Controller“ mit einem Autopiloten könnte ein mögliches Tool sein auf dem Weg zur Reduktion der wirbelschleppenbasierten Staffelung im Approach. Es stellt ein neues Element der „Selbstkontrolle“ des Flugzeuges dar. Offen ist in diesem Zusammenhang eine entsprechende Schnittstelle zu ATC.

4. ATC-PROZEDUREN

Eine Kapazitätssteigerung an Flughäfen lässt sich grundsätzlich durch Erweiterung von Start- und Landebahnssystemen erreichen. Derartige Vorhaben sind auf Grund von Standortproblemen u.U. nicht immer möglich bzw. erfordern viele Jahre für ihre Umsetzung. Daraus ergibt

sich die Notwendigkeit, Verfahren zur Kapazitätssteigerung zu entwickeln, darunter solche, die es erlauben, unter bestimmten Umständen eine reduzierte Wirbelschleppenstaffelung anzuwenden.

ICAO ist die internationale Regulierungsbehörde, die die existierenden wirbelschleppenbedingten Staffelungsabstände festgelegt hat. Sie sind in folgenden Dokumenten hinterlegt:

- Procedures for Air Navigation Services – Rules of the Air and Air Traffic Services (PANS-RAC),
- Standards and Recommended Practices (SARPSs) und
- Regional Supplementary Procedures (Doc. 7030).

Ihre Umsetzung in nationales Recht liegt in Verantwortung der einzelnen Länder und kann zu unterschiedlichen Regularien führen, wie am Beispiel der Gewichtsklasseneinteilung weiter oben bereits deutlich wurde.

Verschiedene Organisationen entwickeln Systeme, die eine reduzierte Wirbelschleppenstaffelung erlauben. Sie lassen sich charakterisieren durch:

- (1) Verbesserung von Ortung und Navigation
- (2) Fliegen außerhalb der Gefährdungzone
- (3) Erfassung und Verarbeitung von Wetterdaten

System	(1)	(2)	(3)	Stand	Bemerkungen
AILS [18] Airborne Information for Lateral Spacing	x	x		Erprobung am Flughafen Minneapolis unter VFR-Bedingungen	Bordgestütztes Warnsystem basierend auf genauer Flugzeugführung verbunden mit einem System zur Konflikterkennung
ADS-B [19] Automatic Dependant Surveillance - Broadcast	x			Tests	FAA hat mehr als 20 Möglichkeiten zum Einsatz des Systems für sicheres Fliegen identifiziert
ASAS [20] Airborne Separation Assurance System	x				Exakte Abstandshaltung; Bereitstellung von Entscheidungshilfen für situationsgerechtes Verhalten für Piloten und Lotsen
AVOSS [21] Aircraft Vortex Spacing System		x	x	Erprobung am Flughafen Dallas DFW	Freigabe wirbelschleppenunkritischer Landekorridore auf Basis aktueller Wetterdaten (update-Rate: 30 Minuten)
HALS/DTOP [22] High Approach Landing System/Dual Threshold Operation	o	x		Probetrieb am Flughafen Frankfurt	Gezieltes Fliegen oberhalb der wirbelschleppenbedingten Gefährdungzone
SOIA [23] Short Offset Instrument Approach		x	x	Erprobung am Flughafen San Fransisco	Verfahren für Parallelbahnen, Einsatz eines Wake Turbulence Monitoring Systems
WAVIR [24] Wake Vortex Induced Risk Assessment	o		x	Test für single runway approach	Risikoabschätzung der Wirbelschleppengefährdung
WSWS [25] Wirbelschleppenwarnsystem	o		x	Erprobung am Flughafen Frankfurt	Aussage über den Zeitraum der Nichtgefährdung
WVBC [14] Wake Vortex Behaviour Classes			x	S-Wake	Zuordnung von Wirbelschleppen zu Risikogruppen in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen (4 Klassen)

Tab. 3: Zusammenstellung von Systemen zur Reduzierung des Staffelungsabstandes landender Flugzeuge bei Wirbelschleppengefährdung

Die Systeme erfordern spezifische Lösungen für individuelle Flughafenkonfigurationen. Sie sollen dazu beitragen, Lotsen und Piloten bei der Bewältigung des stetig wachsenden Verkehrs unter Beibehaltung des Sicherheitslevels zu unterstützen.

Eine Zusammenstellung derartiger Systeme enthält Tab. 3. Die Systeme sind alphabetisch geordnet aufgelistet. Sie werden den oben genannten drei Gruppen zugeordnet (x), der Bearbeitungsstand kurz skizziert sowie Besonderheiten aufgezeigt. Denkbare Erweiterungen der Systeme sind mit dem Symbol (o) gekennzeichnet. Für die genannten Systeme konnte i.allg. die prinzipielle Machbarkeit gezeigt werden.

Vor dem Einsatz derartiger Verfahren sind folgende grundsätzliche Fragen zu beantworten bzw. Probleme zu lösen:

- Anwendungsbereich, Genauigkeit und Verlässlichkeit der Subsysteme (Wetter- und Wirbelschleppensensoren)
- Auflösung der Messdaten (zeitlich und örtlich)
- Berücksichtigung von zeitlicher und örtlicher Variation relevanter Wetterparameter (z.B. Aufstellort der Sonden, Abdeckungsbereich)
- Modellbildung zum Verhalten der Wirbelschleppe (Predictor)
- Definition des Gefährdungspotentials der Wirbelschleppe
- Zeitraum und Genauigkeit für die Vorhersage von Wetter- und Wirbelschleppenverhalten
- Auslegung des Datenlink (Boden-Bord, Bord-Boden)
- Arbeitsbelastung von Lotsen und Piloten
- Display-Auslegung
- Sicherheitsanalyse Gesamtsystem
- Festlegung von Ausweichverfahren, Fehlanflug
- Auswirkung variabler Staffelung auf Rollführung (z.B. keine Unterschreitung der RWY-Belegungsdauer)

Für das Wirbelschleppenwarnsystem am Flughafen Frankfurt kann eine Vielzahl oben genannter Bedingungen als erfüllt gelten. Es ermöglicht für ein abhängiges Parallelbahnsystem drei verschiedene Verfahrenstrategien der Bahnzuweisung. Die beiden gebräuchlichsten sind in Abb. 2 dargestellt.

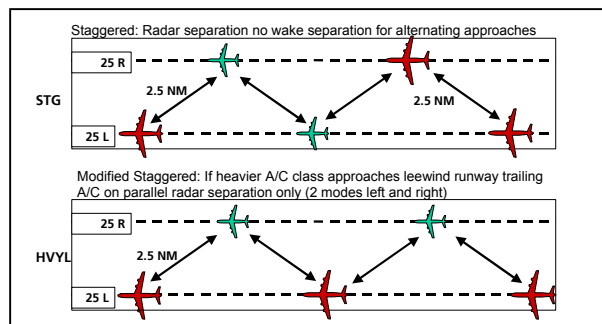


Abb. 2: WSWS-basierte Anflugsequenz für staggered (STG) bzw. modified staggered approach (HVYY)

Das WSWS wurde entwickelt auf der Basis von Analysen, welche die Erkenntnisse zur Wirbelschleppenausbreitung mit dem Einfluss des Windes zusammenführen. Das System am Flughafen Frankfurt deckt den Bereich der Aufsetzzone

bis 80 m über Grund ab [25]. Das ist ein Bereich, der z.B. von der Vereinigung Cockpit als zu gering eingeschätzt wird, um wirbelschleppenkritische Zustände für den Endanflug auszuschließen [13]. Sie erwartet für eine ausreichende Sicherheit die messtechnische Abdeckung des gesamten Gleitpfades, umzusetzen z.B. mittels Messung der Winddaten und deren Verarbeitung in entsprechenden Modellen für die Erstellung einer Prognose.

Ein weitere kritische Anforderung besteht darin, die Prognosen für die Dauer der verschiedenen Verfahren so stabil wie möglich zu erstellen.

In diesen Kontext greift das Projekt „Wirbelschleppe 2“ des DLR ein. Ziel dieser Arbeiten ist es, auf Basis einer umfassenderen Datenbasis als beim WSWS, verbesserter Modellbildung und erweiterter Messtechnik ein „Wirbelschleppenvorhersage- und -beobachtungssystem“ (WSVBS) zu entwickeln. Dieses wird in die Steuerungsverfahren der Flugverkehrskontrolle (ATC) mit entsprechenden Anzeigen für Lotsen implementiert. Das Gesamtsystem wird in Echtzeit getestet. Die geplante Einbindung gelingt nur, wenn die erforderlichen Änderungen der aktuell existierenden Abläufe von den beteiligten Lotsen akzeptiert werden (Arbeitsbelastung), umsetzbar sind und sich als sicher erweisen.

Weiter zu verfolgen ist auch der Gedanke, beim Flugzeug zwischen „Erzeuger“ und „Konsumer“ einer Wirbelschleppe zu unterscheiden. Für eine solche Unterscheidung sollten neben dem MTOW auch geometrische Parameter (z.B. Spannweite) oder ein „Low Vortex Design“ des Flugzeuges berücksichtigt werden. Das Beispiel der B 757 zeigt bereits heute, dass das MTOW nicht immer ein ausreichendes Kriterium zur Bewertung von Flugzeugen bezüglich Wirbelschleppengefährdung ist. Die Überarbeitung der bisherigen Klassifizierung kann zu einer Erhöhung der Anzahl der Klassen führen (vgl. auch Tab. 1). Generell ist zu beachten, dass nicht zu viele Klassen definiert werden, da dann die Akzeptanz derartiger Verfahren bei den Nutzern (z.B. Lotsen, Flugsicherungsbehörden) wegen der damit verbundenen erhöhten Arbeitsbelastung nicht gegeben ist.

Einer möglichen Gefährdung eines Flugzeuges durch die Wirbelschleppe des Vorgängers kann auch durch geeignete bordseitige Messtechnik begegnet werden. Das Flugzeug könnte mit einem TCAS-ähnlichen „Vortex Collision Avoidance System (VCAS) zur Erfassung gefährlicher wirbelschleppenbasierter Turbulenzen ausgestattet werden, das ein akustisches Signal bei Gefährdung auslöst oder aber eine Visualisierung des Gefahrenstatus ermöglicht. Ein solches Vorgehen stellt eine weitgehend bordautonome Lösung dar, die im Landeanflug bei Lotsen auf Akzeptanzprobleme stoßen kann, wenn es z.B. nicht gelingt, die Bord- und Bodeninformationen abzugleichen. Ein solcher Abgleich ist nicht trivial, da Bord- und Bodenseite nicht wie selbstverständlich auf gleiche Modelle, Messsysteme und Datenbanken zurückgreifen werden.

Andererseits könnten verkehrsreiche Flughäfen die Ausstattung von Flugzeugen mit einem derartigen System zur Bedingung machen (ähnlich IFR-Ausstattung), um z.B. in Verkehrsspitzen soweit als möglich reduzierte Wirbelschleppenstaffelung auch unter IFR im Landeanflug zu ermöglichen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeiten haben gezeigt, dass es für eine sichere Reduktion der Wirbelschleppenstaffelungsabstände im Endanflug erforderlich ist zu beurteilen, ob, wann und wie weit ein nachfolgendes Flugzeug in den Anflugkorridor einfliegen darf, ohne durch die Wirbelschlepe des Vorgängers gefährdet zu werden. Es sind eine Reihe von Systemen entwickelt worden, die über die Erfassung von Wetterdaten eine Gefährdung ausschließen (WSWS, WAVIR), ein gezieltes Umgehen der Gefahrenzone erlauben (HALS/DTOP, SOIA) oder einen Sicherheitskorridor bestimmen (AVOSS).

Für die Systeme SOIA und AVOSS ist die Integration in den betrieblichen Ablauf der Luftverkehrskontrolle (ATC) teilweise gelungen, d.h. die prinzipielle Machbarkeit wurde gezeigt. Das System HALS/DTOP ist im Probetrieb. Die mit der Einbindung von HALS/DTOP erforderlichen Änderungen in die existierenden Abläufe fanden die Akzeptanz der verantwortlichen Operateure (Lotsen, Piloten). Alle sicherheitskritischen Anforderungen wurden erfüllt (Genehmigungsverfahren, Ausrüstung am Flughafen, Schulung des beteiligten Personenkreises [22]).

Ziel der weiteren Arbeit ist es, diesen Weg mit neuen Systemen wie dem WSVBS erfolgreich fortzusetzen.

6. LITERATUR

- [1] J.N. Hallock, G.C. Greene, D.C. Burnham, „Wake Vortex Research – A Retrospective Look”, Air Traffic Control Quarterly, Vol. 6, No.3, pp. 161-178
- [2] J. Kompenhans, L. Dieterle, M. Raffel, J.-C. Monnier, A. Gilliot, F. De Gregorio, K. Pengel, “Particle Image Velocity: Status of development and Examples of application in industrial Test Facilities”, Proceedings 3rd ONERA-DLR Aerospace Symposium, Paris, France, June 2001, pp. S4-1/1-12.
- [3] <http://www.eurocontrol.int/eatmp/ardep-arda/servlets/SVLT014?Proj=CEC129>
- [4] A.C. de Bruin, L.J.P. Speijker, H. Moet, B. Krag, R. Luckner, S. Mason “S-Wake - Assessment of Wake Vortex Safety”, Mai 2003
- [5] P. Sparaco, „Test Facilities Inaugurated,” Aviation Week & Space Technology, Vol. 158, No. 3, January 2003, p. 53
- [6] DSF, „Betriebsanweisung für die Flugverkehrskontrolle“, 2002, p. 44-1
- [7] ICAO, Air Traffic Service Planning Manual, p.II-5-3-2 (1992)
- [8] T. Gerz, F. Holtzäpfel, D. Darracq, „Aircraft Wake Vortices – A Position Paper“, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 38, 2002, pp. 181-208
- [9] C. Meier, B. Stieler, „Multi Sensor Data Fusion for a A-SMGCS-Concept and Results from Simulation and Field Tests”, Advanced Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS), DGON, Stuttgart, 21.-24. June 1999
- [10] J.D. Crouch, P.R. Spalart, „Active System for early Destruction of Trailing Vortices“, Boeing patent – Int. Publ. No. WO99/00297
- [11] D.C. Burnham, R.P. Rudis, and S. Abramson, „Performance of RASS Vortex Detection/Measurement System“, DOT-VNTSC-FAA-99-10, June 1999, DOT Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA.
- [12] G.G. Soudakov, A.V. Voyevodin, A.V. Zubtsov, „Allevation of the Vortex Wake behind an Aircraft“, Trudy TsAGI, Vol. 2641, 1999, pp. 183-190
- [13] IFALPA „Wake Vortex Policy“, 1998
- [14] M. Frech „Wake Vortex Behaviour Classes and their Initial Validation”, EUROMECH Colloquium No 433: Dynamics of Trailing Vortices, RWTH Aachen, 20-22 March, 2002
- [15] H. Combe, F. Köpp, M.Keane, „On-board wake vortex detection“, 3rd Wake-Net Workshop 22.-23.02.2000
- [16] V.E. Gryazin, „Research on Aircraft Flight Safety in Wake Turbulence Conditions through Pilot-in-the-Loop Simulation“, Trudy TsAGI, Vol. 2627, 1997, pp. 225-228
- [17] K.U. Hahn, „Coping with Wake Vortex“, ICAS-2002-7.3.2, Toronto, Canada
- [18] E.H. Phillips, „NASA Flights Demonstrate New Approach Technologies“, Aviation Week, Dec.6 (1999), p. 58
- [19] The Avion Newspaper Online (Summer 2003, Issue 2, May 2003)
- [20] „Principles of Operation for the Use of Airborne Separation Assurance Systems“, FAA/EUROCONTROL Cooperative R&D, 19.7.2001
- [21] D.A. Hinton, C.J. O’Conner, „Development of a Wake Vortex Spacing System for Airport Capacity Enhancement and Delay Reduction“, Paper 3E6, 19th Digital Avionics Systems Conference, PA 7-13.10.2000
- [22] AIC IFR 7/99 vom 6. Mai 1999
- [23] G.C. Greene, R.P. Rudis, D.C. Burnham, „Wake Turbulence Monitoring at San Francisco“, 5th Wake Net Workshop, DFS Academy, Langen, 2.-3.4.2001
- [24] G.B. van Baren, L.J.P. Speijker, A.C. de Bruin, „Wake Vortex Evaluation of Single Runway Approaches under Different Weather and Operational Conditions“, NLR-TP-2002-077, February 2002, National Aerospace Laboratory, Amsterdam, The Netherlands
- [25] T. Gurke, H. Lafferton, „The Development of the Wake Vortices Warning System for Frankfurt Airport: Theory and Implementation“, Air Traffic Control Quarterly 5, No.1 (1997), pp. 3-32