

EINFLUSS EINER INDIVIDUELLEN UND DYNAMISCHEN WIRBELSCHLEPPENSTAFFELUNG AUF DIE ANFLUGKAPAZITÄT EINES FLUGHAFENS

K.-U. Hahn, C. Schwarz

Institut für Flugsystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

1. ÜBERSICHT

Wirbelschleppenstaffelungen begrenzen bereits heute zu Spitzenverkehrszeiten die Landekapazitäten von Flughäfen. Angesichts der vorausgesagten hohen Wachstumsraten sind insbesondere in Mitteleuropa aufgrund des sehr knappen Raums für neue Flughäfen Engpässe zu erwarten. Ziel aktueller Untersuchungen ist daher die Erhöhung der Flughafenkapazitäten durch Verringerung der Wirbelschleppenstaffelung bei mindestens gleich bleibendem Sicherheitsniveau.

Mit einfachen Überlegungen lassen sich die Grenzen des Machbaren aufzeigen. Bereits eine individuellere Anwendung der derzeit gültigen Staffelungsstandards könnte zu einer Kapazitätserhöhung führen. In jedem Fall sind die Staffelungsabstände so zu bestimmen, dass der Anflugkorridor bezogen auf Wirbelschleppen gefahrungsfrei ist. Hier sollen Situationen als gefahrungsfrei gelten, wenn die durch eine Wirbelschlepe verursachten Effekte einen sicheren operationellen Flugbetrieb nicht beeinflussen. Eine einfache Bestimmung des Wirkbereiches der zu meidenden Zonen um eine Wirbelschlepe herum ist mit dem **Simplified Hazard Area Prediction (SHAPE)** Verfahren möglich. SHAPE wurde im Rahmen des DLR Projekts „Wirbelschlepe II“ entwickelt. Die Verwendung von SHAPE ermöglicht die Berechnung der Gefährdungsraumabmessungen für beliebige Flugzeugpaarungen (für reale aber auch nicht existierende Flugzeuge). Diese universelle Anwendungsmöglichkeit von SHAPE beruht auf der Parametrisierung aller für eine Wirbelschlepe charakteristischen Kenngrößen von Flugzeugen. SHAPE wird Bestandteil eines beim DLR im Aufbau befindlichen Wirbelschleppenvorhersage- und Beobachtungssystems (WSVBS) sein. Damit lässt sich aber auch der Einfluss verschiedener Parameter auf die Landekapazität von Flughäfen untersuchen. Insbesondere Seitenwind kann zu einer merklichen Kapazitätssteigerung führen.

2. BEZEICHNUNGEN

b	Spannweite
c	Beiwert
H	Höhe, Flugzeuggewichtsklasse HEAVY
l	Drehbewegung um die Längsachse
L	Rollmoment, Flugzeuggewichtsklasse LIGHT
m	Masse
M	Flugzeuggewichtsklasse MEDIUM
n	Lastvielfaches
p	Rollrate
r	radiale Koordinate
t	Zeit

V	Geschwindigkeit
W	Gewicht
x, y, z	Koordinatenrichtungen
W	Gewicht
Δ	Differenz
ε	Dissipationsrate
γ	Bahnneigungswinkel
Γ	Zirkulation
ρ	Luftdichte
ξ	Querruderausschlagwinkel

untere Indizes:

0	Anfangswert
F	nachfolgendes Flugzeug (<i>follower</i>)
g	geodätisch
L	Wirbelerzeugerflugzeug (<i>leader</i>)
nom	nominell
req	(Steuer-) Bedarf (<i>required</i>)
s	Staffelung (<i>separation</i>)
*	normierte Größe

Abkürzungen:

AC	Flugzeug (<i>aircraft</i>)
ATTAS	<i>Advanced Technologies Testing Aircraft System</i>
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
GA	Durchstart (<i>go-around</i>)
GS	(ILS) Gleitpfad (<i>glide slope</i>)
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFS	<i>In-flight</i> Simulation
ILS	Instrumentenlandesystem
IMC	Instrumentenflugbedingungen (<i>instrumental meteorological conditions</i>)
MLW	max. Landegewicht (<i>max. landing weight</i>)
MTOW	max. Startgewicht (<i>max. take-off weight</i>)
P2P	probabilistisches Zwei-Phasen Modell
RCR	Rollsteuerbedarf (<i>roll control ratio</i>)
ROT	Landebahn Belegungszeit (<i>runway occupancy time</i>)
RWY	Start- und Landebahn (<i>runway</i>)
SD	geom. Staffelungsabstand (<i>separation distance</i>)
SHA	vereinfachter Gefährdungsraum (<i>Simplified Hazard Area</i>)
SHAPE	vereinfachte Gefährdungsraumvorhersage (<i>Simplified Hazard Area Prediction</i>)
ST	zeitl. Staffelungsintervall (<i>separation time</i>)
TKE	turbulente kinetische Energie
VIAS	angezeigte Geschwindigkeit (<i>indicated airspeed</i>)
VMC	Sichtflugbedingungen (<i>visual meteorological conditions</i>)
WV	Wirbelschlepe (<i>wake vortex</i>)
WVL	Wirbellinie (<i>wake vortex line</i>)
WVBS	Wirbelschleppenvorhersage- und Beobachtungssystem

3. EINLEITUNG

Die zum Fliegen erforderliche Auftriebserzeugung ist unabdingbar verknüpft mit der Erzeugung von Randwirbeln an den Enden der Tragflächen. Die Stärke dieser Wirbel ist abhängig vom Auftrieb und damit vom Flugzeuggewicht. Die derzeitigen Wirbelschleppenstaffelungen berücksichtigen dies durch die Einteilung der Flugzeuge in verschiedene Gewichts- bzw. Massenkategorien. Diese Staffelungen sind aufgrund der vorhandenen langjährigen Erfahrung als sicher anzusehen. Gleichwohl limitieren sie zu Spitzenverkehrszeiten bereits heute die Durchsatzkapazitäten der Flughäfen. Derzeitige Prognosen gehen von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum des Personenluftverkehrs von ca. 5% [1], d.h. von einer Verdopplung alle 15 Jahre aus (vgl. BILD 1). Angesichts dieser hohen Wachstumsraten sind insbesondere in Mitteleuropa aufgrund des sehr knappen Raums für neue Flughäfen bereits jetzt die damit einhergehenden Probleme aufgrund der begrenzten Start- und Landekapazitäten zu erkennen. Dieser Sachverhalt und der Einsatz immer größerer und schwererer Flugzeuge hat in den letzten Jahren zu einem erneuten Interesse und zu verstärkten Anstrengungen auf dem Gebiet der Wirbelschleppenforschung geführt. Alle Aktivitäten haben letztendlich eine Zielrichtung: die Erhöhung der Flughafenkapazitäten durch Verringerung der Wirbelschleppenstaffelung ohne Sicherheitseinbußen. Hier soll nachfolgend ausschließlich die Anflugsituation behandelt werden.

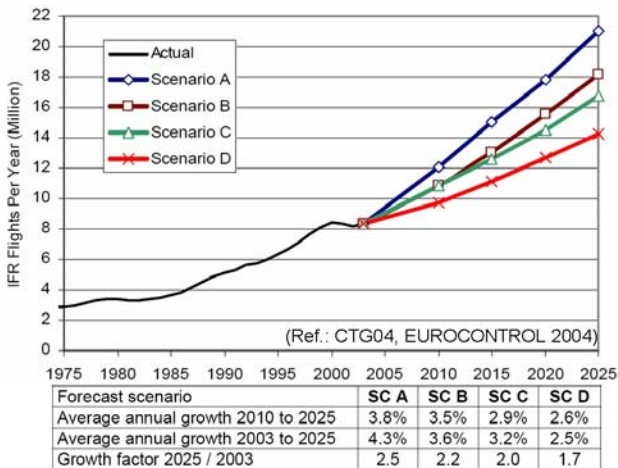


BILD 1. Zuwachsprognosen im Luftverkehr [1]

Mögliche Staffelungskonzepte können auf geometrischen oder zeitlichen Staffelungen basieren. Eine Staffelungsreduktion erscheint möglich, wenn individuellere Flugzeugpaarungen bzw. eine größere Anzahl von Flugzeugkategorien betrachtet werden. Als besonders geeignet werden auch Ansätze betrachtet, die auf einer dynamischen Staffelung unter Berücksichtigung der aktuellen Wetter- und insbesondere Windbedingungen beruhen. Zur Beurteilung des Potenzials einer reduzierten Wirbelschleppenstaffelung ist es wichtig, die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen und die damit einhergehenden Grenzen aufzuzeigen. Damit lässt sich abschätzen, in welchem Maße den zu erwartenden Zuwachsraten im Flugverkehr durch flexiblere Staffelungskonzepte begegnet werden kann.

4. FESTE STAFFELUNGSABSTÄNDE

Historisch gesehen beruht die Idee der Wirbelschleppenstaffelung auf der Annahme, dass bei genügend großem Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Flugzeugen, die erzeugten Wirbel ausreichend Zeit haben soweit zu zerfallen, dass sie für das nachfolgende Flugzeug keine Gefahr mehr darstellen. Der durch die Gleichung (1) beschriebene Zusammenhang zwischen Gewicht und Stärke der Zirkulation der Randwirbel

$$(1) \quad \Gamma_0 = \frac{W_L}{\rho V_L b_L \frac{\pi}{4}}$$

führte zu den derzeit angewandten massenabhängigen Flugzeugkategorien. Dabei wird zur Klassifikation das maximale Startgewicht (MTOW) verwendet. BILD 2 zeigt verschiedene Klassifikationen mit unterschiedlichen Unterteilungen von 3 bis 5 Gewichtsklassen. Die hier durchgeführten Untersuchungen stützen sich auf die ICAO Klassifikation (vgl. TABELLE 1) und die zugehörigen Staffelungen, wie sie in [2] definiert sind. Weiter gelten die Annahmen:

a/c class	mass
HEAVY (H)	$m \geq 136\ 000\ \text{kg}$
MEDIUM (M)	$7\ 000\ \text{kg} < m < 136\ 000\ \text{kg}$
LIGHT (L)	$m \leq 7\ 000\ \text{kg}$

TABELLE 1. Gewichtsklassen nach ICAO [2]

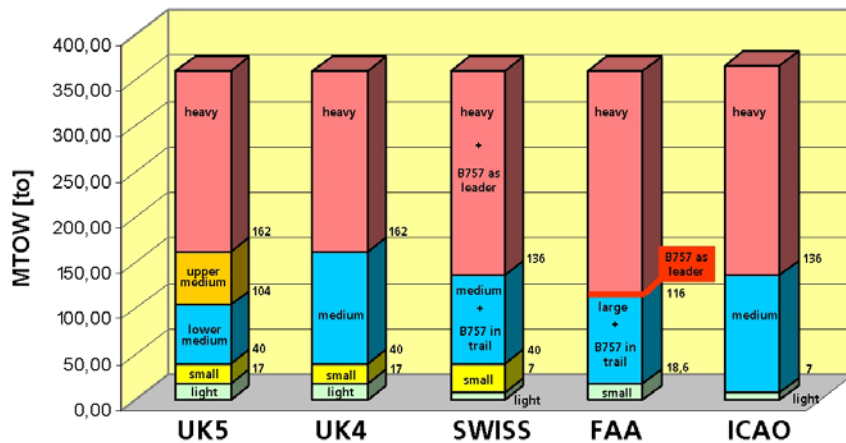


BILD 2. MTOW abhängige Flugzeugkategorien

- nur eine Landebahn wird betrachtet
- die Bahn ist ausschließlich für Landungen verfügbar
- der Verkehrsmix besteht aus HEAVY und MEDIUM
- Anfluggeschwindigkeit und Staffelung sind konstant
- der Bodeneffekt bleibt unberücksichtigt

Diese Annahmen schränken natürlich den Gültigkeitsbereich der Ergebnisse ein. Trotzdem sind grundsätzliche Aussagen und die Diskussion von Parametereinflüssen möglich.

4.1. Wirbelschleppenseparation mit drei Flugzeug-Gewichtsklassen

Nach ICAO sind für den Flugbetrieb ohne Radarunterstützung die in TABELLE 2 angegebenen zeitabhängigen Staffelungszeiten ($ST = separation\ time$) zu verwenden. Die Staffelungszeit für H-M beträgt 2 min. Für den Fall HEAVY als Folgeflugzeug ist keine Wirbelschleppenstaffelung vorgesehen. Als unterste Grenze für die zeitliche Staffelung ist die Landebahnbelegungszeit ROT (*runway occupancy time*) zu sehen die minimal $ROT_{min} = 50s$ beträgt. Unter operationellen Gesichtspunkten erscheint im $ROT = 60s$ im Mittel eine praktisch sinnvolle Größe zu sein.

WS Erzeuger	Folgeflugzeug	zeitl. Staffelung
HEAVY (H)	MEDIUM (M)	2 min
HEAVY (H)	LIGHT (L)	3 min
MEDIUM (M)	LIGHT (L)	3 min

TABELLE 2. ICAO Zeitstaffelung nach [2]

Steht für die Staffelung des anfliegenden Luftverkehrs eine Radarführung zur Verfügung können aufgrund der präziseren Positionsinformation nach [2] die in BILD 3 angegebenen Entfernungsstaffelungen ($SD = separation\ distance$) angewendet werden. Beschränkt man sich auf einen Verkehrsmix aus HEAVY und MEDIUM Flugzeugen, so sind lediglich Kombinationen von Bedeutung, bei denen das voraus fliegende Flugzeug zur Kategorie HEAVY gehört. Es werden also nur H-H und H-M Paarungen betrachtet, da hinter einem Flugzeug der Klasse MEDIUM bereits die minimale Radarstaffelung von 3nm anzuwenden ist. Mit Hilfe der Anfluggeschwindigkeit lassen sich zeit- und abstandsstaffelungen ineinander umrechnen. Damit lässt sich für bestimmte Staffelungen die Kapazität einer Landebahn (Flugzeuge pro Stunde: AC/h) bestimmen. In BILD 4 sind für einige reale Flugzeuge die Anfluggeschwindigkeiten über dem MTOW dargestellt. Der

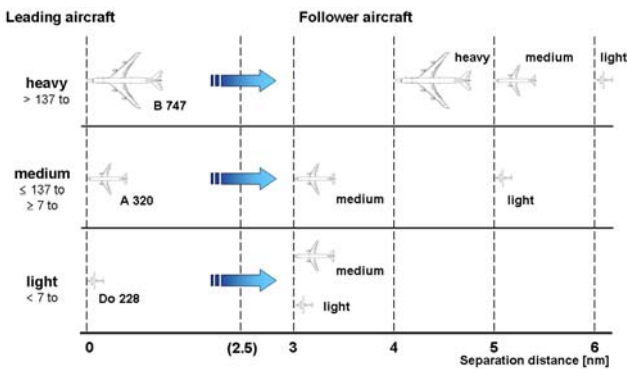


BILD 3. ICAO Standardstaffelungen

mögliche Bereich an Anfluggeschwindigkeitsvariationen lässt sich durch eine obere (rot) und untere (grün) Grenzkurve einhüllen [3]. Damit ergibt sich für Flugzeugpaarungen, bei denen ein HEAVY Flugzeug beteiligt ist, ein Geschwindigkeitsbereich von $62m/s \leq V \leq 75m/s$ (schattierte Fläche). Die dazu gehörenden Landebahnkapazitäten für H-H und H-M Kombinationen sind dem BILD 5 zu entnehmen. Die Landekapazität bei der Abstandsstaffelung ist folgerichtig geschwindigkeitsabhängig während die Kapazität bei der zeitlichen Staffelung natürlich unabhängig von der Anfluggeschwindigkeit ist.

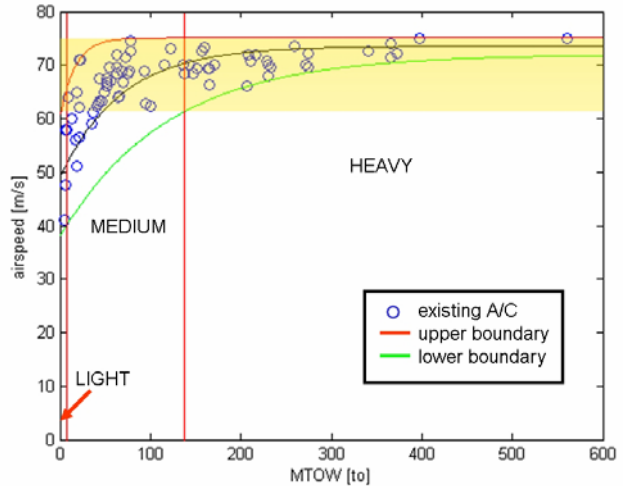


BILD 4. Anfluggeschwindigkeiten von Flugzeugen

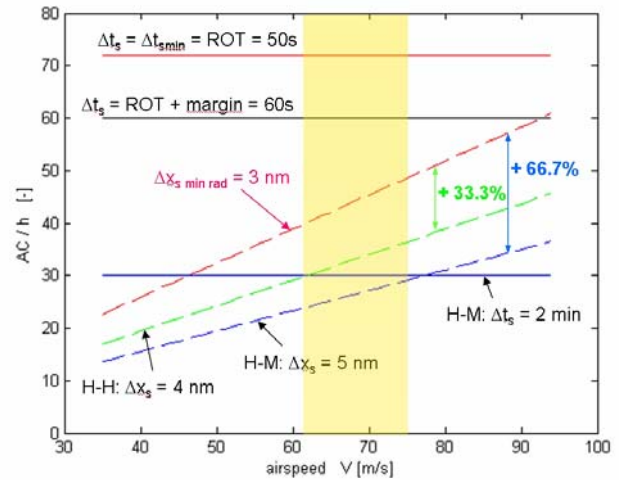


BILD 5. Kapazitäten bei Wirbelschleppenstaffelung

BILD 5 macht deutlich, dass durch ROT_{min} eine absolute Kapazitätsgrenze von 72 AC/h für eine Einzelbahn vorgegeben ist, wobei, wie zuvor bereits erwähnt, für eine machbare ROT eher 60 AC/h realistisch sind. Für die zeitliche (*non-radar*) Staffelung bei H-M beträgt die Kapazität lediglich 30 AC/h. Bei der Abstandsstaffelung lassen sich aus BILD 5 sehr einfach Gradienten $d(AC/h)/dV$ ermitteln. Sie zeigen, dass bei einer Anfluggeschwindigkeitserhöhung um 4kt (für H-H) bzw. 5kt (für H-M) die Landekapazität um jeweils 1 AC/h erhöht werden könnte. Die Vorgehensweise, durch höhere Fluggeschwindigkeiten Kapazitätsgewinne erzielen zu wollen, ist allerdings sehr fragwürdig.

BILD 5 zeigte weiter, dass in dem für H-M Paarungen zu berücksichtigenden Geschwindigkeitsbereich (schattierte

Fläche) die Abstandsstaffelung grundsätzlich eine geringere Kapazität zur Folge hat als die 2-Minuten-Staffelung. Für H-H Paarungen ist in jedem Fall die Abstandsstaffelung von Vorteil. Könnte der Stafflungsabstand grundsätzlich auf die minimale Radarstaffelung reduziert werden, so ergebe sich ein theoretischer Kapazitätsgewinn von 66,7% für H-M und 33,9% für H-H Paarungen. Damit ist eine Verdopplung der Kapazität auf einer Einzellandebahn durch Stafflungsreduktion ohne Sicherheitseinbußen nur schwer vorstellbar.

4.2. Einfluss der Gewichtsklassenanzahl

Offensichtlich muss der Stafflungsabstand für stärkere Wirbelschleppen (größere Zirkulation) größer gewählt werden, um dem Vorgang des Zerfalls der Wirbel auf ein ungefährliches Niveau mehr Zeit zu geben. Unter diesem Gesichtspunkt ist mit Gl. (1) der ungünstigste Fall der, bei dem der Wirbelerzeuger mit seinem max. zulässigen Landegewicht (*maximum landing weight* = MLW) anfliegt. BILD 6 zeigt die für das MLW berechnete Zirkulation in Abhängigkeit vom MTOW von realen Flugzeugen. Der Bezug zum MTOW wurde gewählt, um kompatibel zur üblichen Gewichtsklassifizierung nach ICAO [2] zu sein. Mit einer einfachen Exponentialfunktion lässt sich eine einhüllende Kurve für die ungünstigste (größte) Zirkulation bestimmen, die den nichtlinearen Zusammenhang in BILD 6 beschreibt. Damit lässt sich bei bekanntem MTOW für beliebige (auch virtuelle) Flugzeuge die maßgebliche Zirkulation im Landeanflug bestimmen.

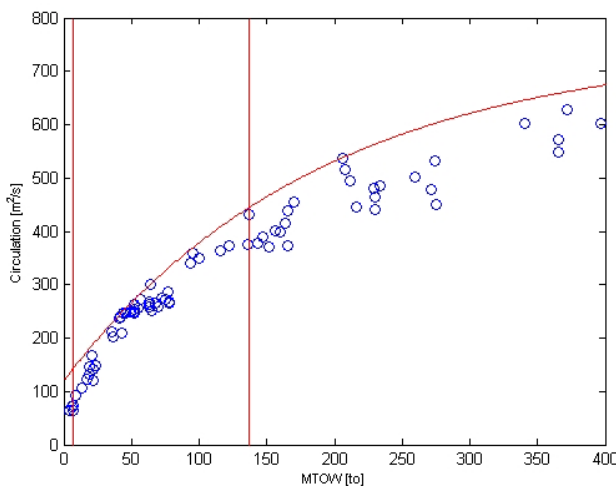


BILD 6. Zirkulationsstärken bei maximalem Landegewicht MLW

Die Annahme, dass die derzeitigen Stafflungsabstände (die in der Vergangenheit auf der Vermutung eines ausreichenden Zerfalls beruhten) als sicher angesehen werden können, lässt sich durch den Verweis ihrer täglichen unbestrittenen Anwendung im nahezu ungestörten operativen Flugbetrieb belegen. Damit ist ein Stafflungsverfahren vorstellbar, das die grobe und diskrete Klassifizierung der Flugzeuge in 3 Gewichtsklassen durch eine kontinuierliche oder aber zumindest durch ein feineres Rasterungsschema ersetzt. Dazu werden die nachfolgenden Überlegungen angestellt.

Der sichere Stafflungsabstand bei einer H-M Paarung beträgt 5nm. Dies schließt Paarungen des z. Zt. schwersten zugelassenen HEAVY Flugzeuges ($m = 396\text{to}$) als

Wirbelerzeuger mit dem nach ICAO leichtesten MEDIUM Flugzeug ($m = 7\text{to}$) als Nachfolger ein. Weiter gilt, dass für alle H-H Paarungen 4nm Stafflungsabstand anzuwenden sind, d.h., dies gilt auch wieder für einen HEAVY Wirbelerzeuger mit $m = 396\text{to}$ und einem HEAVY Nachfolger mit $m = 136\text{to}$. Wird die letztere Kombination als sicher angesehen, dann muss dies auch für das schwerste MEDIUM Flugzeug hinter dem schwersten HEAVY Flugzeug gelten. Eine konsequente Anwendung dieser Überlegungen führt zu den in BILD 7 dargestellten, vom Wirbelerzeuger und Nachfolger gewichtsabhängigen kontinuierlichen Stafflungsabständen. Danach ergäbe sich z.B. für das schwerste HEAVY Flugzeug (396to), das dem leichtesten HEAVY Flugzeug (136to) folgt, ein sicherer Stafflungsabstand von $SD = 1,2\text{nm}$. Selbst wenn der zulässige Stafflungsabstand durch die minimale Radarstaffelung auf 3nm begrenzt wird, sind Kapazitätsgewinne möglich (BILD 8).

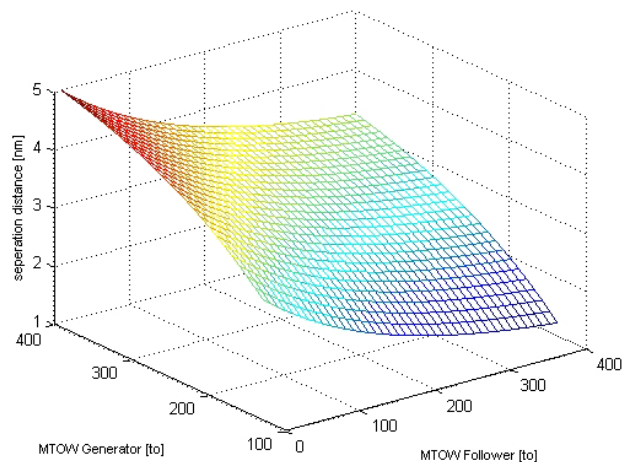


BILD 7. Gewichtsabhängige Stafflungsabstände

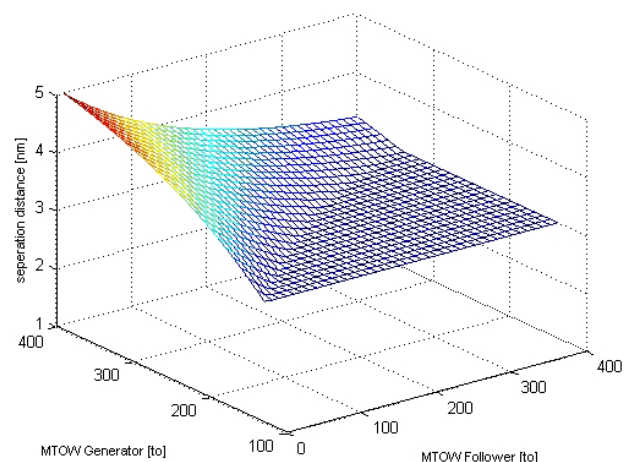


BILD 8. Gewichtsabhängige Stafflungsabstände (limitiert durch minimale Radarstaffelung)

Der tatsächlich mögliche Kapazitätsgewinn ist abhängig von Verkehrsmix des jeweiligen Flughafens. Vernachlässigt man den an internationalen Flughäfen verschwindend geringen Anteil von LEIGHT Flugzeugen, so besteht ein typischer Mix aus ca. 67% MEDIUM und 33% HEAVY Flugzeugen. Für diese Zahlen und eine minimal zulässige Stafflung von 3nm erhält man die in BILD 9 dargestellten Kapazitätsgewinne für die Summe der möglichen Paarungen H-H und H-M in Abhängigkeit von den Ge-

wichtsklassen für MEDIUM und HEAVY. Der Kapazitätsgewinn ist angegeben in Prozent, bezogen auf die Kapazität der Standardstaffelung. Bei jeweils 10 Gewichtsklassen für HEAVY und MEDIUM beträgt der Kapazitätsgewinn nahezu 30%. Bezogen auf den gesamten Anflugverkehr (einschl. der möglichen Paarungen M-H und M-M) fällt der Kapazitätsgewinn natürlich geringer aus (siehe BILD 10). Aber auch hier beträgt er immerhin noch über 10%. In beiden Bildern ist zu erkennen, dass bei mehr als 3 bis 4 zusätzlichen Gewichtsklassenunterteilungen der Zuwachs an Kapazität stark abnimmt. Grundsätzlich bestätigen diese Ergebnisse tendenziell z.B. den Ansatz der UK5 Staffelung (vgl. BILD 1). Betrachtet man allerdings die Gradienten für HEAVY und MEDIUM, so ist deutlich zu erkennen, dass zusätzliche Unterteilungen in der HEAVY Kategorie vorteilhafter sind als eine weitere Untergliederung der MEDIUM Klasse.

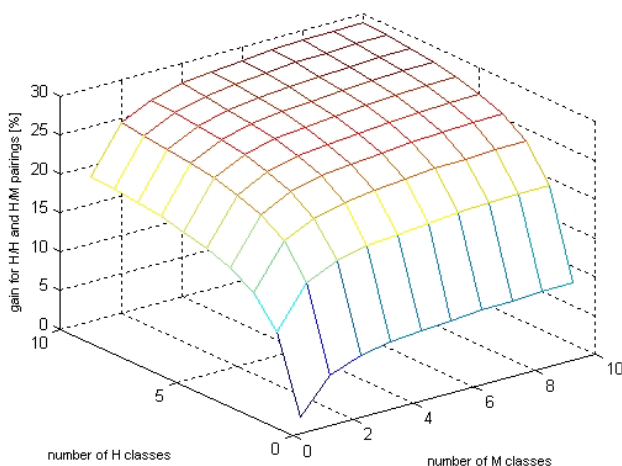


BILD 9. Kapazitätsgewinn durch mehr Gewichtsklassen (Gewinn bei den Paarungen H-H und H-M)

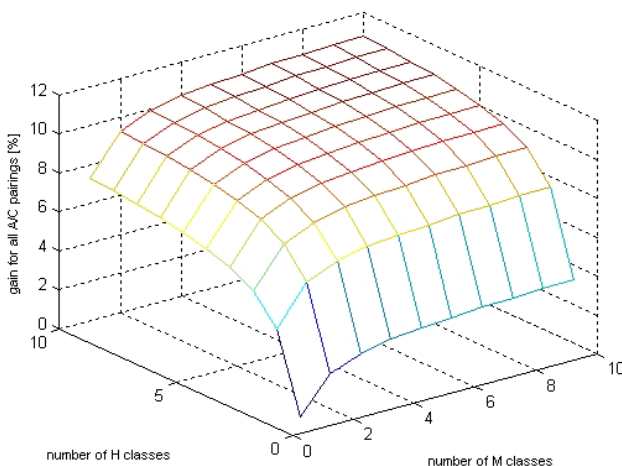


BILD 10. Kapazitätsgewinn durch mehr Gewichtsklassen (Gewinn einschl. der Paarungen M-H und M-M)

Das Konzept zusätzlicher Gewichtsklassen erlaubt zwar eine Erhöhung der Landebahnkapazität, eine Verdoppelung kann aber nicht erreicht werden. Es ist auch zu beachten, dass eine zu große Anzahl von Gewichtsklassen mit den daraus resultierenden unterschiedlichen Staffellungsabständen sicherlich nicht mehr ohne ein entsprechendes Assistenzsystem handhabbar sind. Außerdem sei noch einmal darauf hingewiesen, dass ein solches Konzept darauf beruht, dass die derzeit gültigen Staffellungs-

abstände einen ausreichenden Zerfall einer Wirbelschleppes ermöglichen, der die Gefährdung eines nachfolgenden Flugzeuges ausschließt. Neuere Untersuchungen zeigen aber, dass der Wirbelzerfall nicht immer die Ursache sein kann, der die jetzigen Staffellungsstandards sicher macht [5]. Vielmehr spielt häufig der Transport der Wirbelschleppes durch die selbst induzierte Absinkbewegung und durch Windeinfluss eine entscheidende Rolle [5,6,7]. Für die Berücksichtigung solcher Effekte sind neue Konzepte erforderlich, die dann allerdings auch eine flexiblere, den aktuellen Randbedingungen angepasste Staffellung ermöglichen würden.

5. DYNAMISCHE STAFFELUNGSABSTÄNDE

Die einheitliche Sichtweise zum Thema Wirbelschleppen ist die, dass auf gar keinen Fall absichtliche Einflüge erlaubt sind. Die Frage ist allerdings, wie dicht kann man an einer Wirbelschleppes vorbei fliegen, bevor die Auswirkungen auf das Flugzeug nicht nur spürbar sind, sondern auch unterscheidbar von der normalen atmosphärischen Turbulenz, wie sie im alltäglichen operationellen Flugbetrieb anzutreffen ist. Es gibt verschiedenen Ansätze zur Definition eines Beurteilungskriteriums für Wirbelschleppeneinflüge [8,9,10,11,12,13,14]. In diesem Zusammenhang sind die Termini Sicherheit und Gefährdung häufig verwendete Begriffe, wodurch der Eindruck entsteht, dass es dafür eine eindeutige und klar definierte Grenze zur Unterscheidung gibt. Tatsächlich können aber darunter, je nach Kontext und Anwendung, sehr verschiedene Sachverhalte verstanden werden. So kann z.B. der Begriff „gefährlicher Wirbelschleppeneinflug“ die Bandbreite von einem unerwünschten Durchstart bis hin zum katastrophalen Unfall umfassen. Der Begriff „sicher“ kann den Durchstart (als sichere Standardflugprozedur) bis hin zum ungestörten, von Wirbelschleppeneffekten unbeeinflussten Flugbetrieb (operationell sicher) umfassen [10]. Die Verwendung der letzteren Auslegung für ein Kriterium erlaubt eigentlich nur einen Wirbelvorbeiflug in einer noch zu definierenden Entfernung und schließt einen Durchflug der Wirbelkerne aus. Ein solches Kriterium wird vom DLR favorisiert und wurde auch für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet [3,4,15].

5.1. Gefährdungsraum

Die Auswirkungen einer Wirbelschleppenströmung auf ein Flugzeug werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Eine Beschränkung auf schwache Wirbelschleppen bzw. auf Wirbelschleppenvorbeiflüge erleichtert die Bestimmung eines Sicherheitskriteriums erheblich [16]. Auf dieser Annahme basiert das Konzept des vereinfachten Gefährdungsraumes SHA (*Simplified Hazard Area*), das sich auf eine einzige Kenngröße stützt [15,16,17]. Der vereinfachte Gefährdungsraum SHA beschreibt einen Raum, außerhalb dessen ein sicheres Fliegen möglich ist [18]. Die Verletzung dieses Raumes ist nicht unweigerlich gleichbedeutend mit einer Gefährdung. Die Meinung des Raumes soll aber einen operationell ungestörten Flugbetrieb garantieren.

Die vorherrschende Situation einer Wirbelschleppenbegegnung beim Landeanflug ist die, dass Flugbahn und Wirbelachse nahezu parallel verlaufen. Dadurch wird beim Vorbeiflug an einer Wirbelschleppes von dieser primär ein

Rollmoment beim Flugzeug induziert [19]. Bezieht man dieses Rollmoment auf das von der Rollsteuerung des Flugzeugs erzeugbare Moment, so ist dies ein einfaches Maß für das Gefährdungspotenzial der Situation. Die Quantifizierung kann dabei mit Hilfe des Rollmomentes, des Rollmomentenbeiwertes, der Rollbeschleunigung oder der Rollsteuereingabe erfolgen

$$(2) \quad \xi_{\text{req}}^* = \frac{L_{\text{WV}}}{L(\xi_{\text{max}})} = \frac{c_{l\text{WV}}}{c_{l}(\xi_{\text{max}})} = \frac{\dot{p}_{\text{WV}}}{\dot{p}(\xi_{\text{max}})} = \frac{\xi_{\text{req}}}{\xi_{\text{max}}} = \text{RCR}_{\text{req}}$$

Als Ergebnis erhält man den dimensionslosen Rollsteuerbedarf ξ_{req}^* , der erforderlich ist, um die Störung zu kompensieren. Diese Größe ist ein Synonym für das sogen. Rollsteuerverhältnis (*Roll Control Ratio*) RCR. Für $\xi_{\text{req}}^* = \text{RCR}_{\text{req}} \geq 1$ reicht die Rollsteuerleistung nicht aus, das durch die Wirbelschleppes induzierte Rollmoment zu kompensieren. Für den hier interessierenden Fall eines ungestörten Flugbetriebes muss der Zahlenwert also viel kleiner als 1 sein. Bei diesen schwachen Wirbelein- bzw. Vorbeiflügen reicht die Definition eines akzeptablen Wertes für ξ^* aus, um zu gewährleisten, dass auch alle anderen wichtigen Beurteilungsparameter, wie z.B. Lastvielfaches, Sinkgeschwindigkeit und Bahnabweichungen in akzeptablen Grenzen bleiben. Es genügt also eine einzige Größe, um die Randbedingungen für einen operationell ungestörten Flugbetrieb festzulegen. Das Problem liegt allerdings in der Bestimmung dieser zulässigen nominellen Größe ξ_{nom}^* . Außerhalb des Gefährdungsraumes gilt dann

$$(3) \quad \text{RCR}_{\text{req}} = \xi_{\text{req}}^* < \xi_{\text{nom}}^* = \text{RCR}_{\text{nom}}$$

Gelingt die Ermittlung und Validierung eines solchen zulässigen nominellen Wertes, der eine unakzeptable Flugzeugreaktion verhindert, ist der zu meidende Gefährdungsraum eindeutig definiert. BILD 11 zeigt hinter einer Wirbel erzeugenden Tragfläche Gebiete mit gleichem Rollsteuerbedarf. Da deren komplexe Form nur schwierig zu beschreiben ist, werden sie vereinfachend durch Rechte-

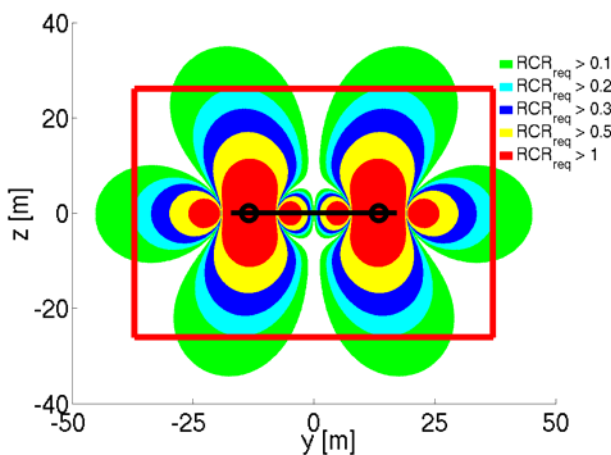


BILD 11. Wirbelschleppeninduzierter Rollsteuerbedarf hinter einem Tragflügel und vereinfachter Gefährdungsraum (SHA)

ecke (Bsp. für $\xi_{\text{nom}}^* \leq 0,2$: roter Rahmen) angenähert. Deutlich ist zu erkennen, dass es sich dabei um eine konservative Näherung handelt.

5.2. Sichere Gefährdungsraumgrenzen

In der Literatur sind für den manuellen Flug unterschiedliche Angaben für akzeptable Werte für ξ^* zu finden (siehe BILD 12), die aus Simulatorstudien stammen [20,21,22]. Zur Validierung der hier gesuchten Grenze für einen ungestörten Flugbetrieb führt das DLR eigene Untersuchungen durch. Bisherige Studien in einem Bewegungssimulator lassen $\xi_{\text{nom}}^* \leq 0,2$ als geeigneten Wert erscheinen [17,23, 24]. Weitere Studien im Rahmen von Flugversuchen sollen 2005 und 2006 stattfinden. Dabei wird die Möglichkeit der In-Flight Simulation (IFS) auf dem Fly-by-Wire Flugversuchsträger ATTAS (Advanced Technologies Testing Aircraft System) des DLR genutzt. Die IFS erlaubt die Nachahmung von Wirbelschleppenbegegnungen unter realen Flugbedingungen, wobei der Pilot die Flugzeugreaktion wie bei einem tatsächlichen Wirbelschleppeneinflug erfährt.

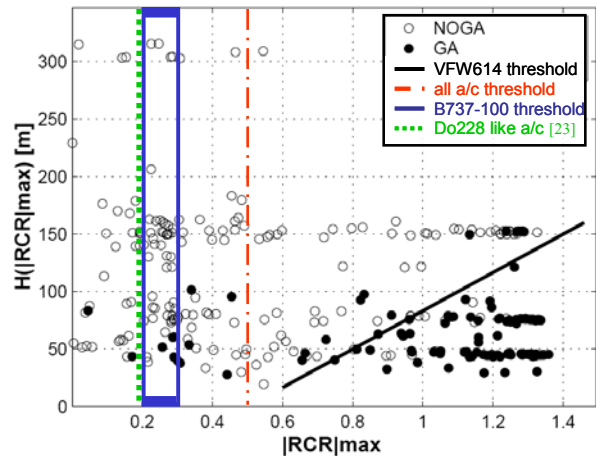


BILD 12. Akzeptable Grenzen des dimensionslosen Rollsteuerbedarfes [22]

Das Prinzip der IFS zeigt BILD 13. Der Experimentalpilot fliegt dabei nicht das Versuchsflugzeug direkt, sondern steuert ein auf dem Bordcomputer simuliertes Flugzeug. Ein Modellfolgeregler sorgt dafür, dass sich der reale Flugversuchsträger exakt so verhält, wie das simulierte Flugzeug. Während eines realen ILS Anfluges wird nun auf dem Bordcomputer der Einflug in einen Wirbel nachgebildet. Die dabei entstehenden Störkräfte- und momente wirken auf das simulierte Flugzeug, dessen verändertes Verhalten auf den ATTAS abgebildet. Die vom Piloten wahrgenommene Flugzeugreaktion veranlasst ihn zu Korrekturmaßnahmen in Form von Steuereingaben, die wieder in das Simulationssystem zurückgeführt werden.

Wenn auch noch nicht abschließend validiert, so soll hier nachfolgend der oben angegebene nominelle Wert von $\xi_{\text{nom}}^* \leq 0,2$ für die Festlegung des vereinfachten Gefährdungsraumes verwendet werden.

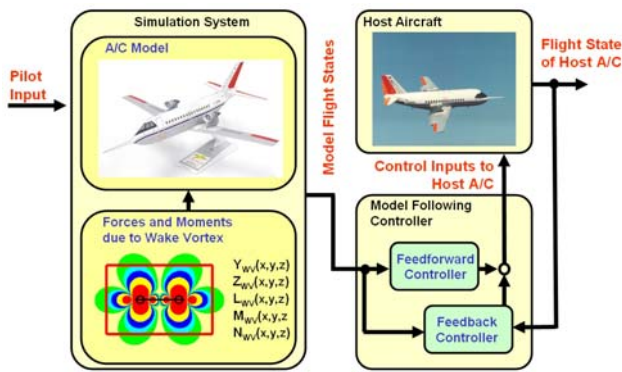


BILD 13. Prinzip der In-Flight Simulation

5.3. Vorhersage der vereinfachten Gefährdungsräume

Liegt ξ_{nom}^* bzw. RCR_{nom} fest, bestimmen flugzeugspezifische Kenngrößen der jeweiligen Flugzeugpaarung die Größe des Gefährdungsräume. Da diese Kenngrößen nicht grundsätzlich für beliebige Flugzeuge verfügbar sind, wird hier ein verallgemeinerter Ansatz verfolgt. Dazu wird basierend auf einer Datenbasis von real existierenden Flugzeugen ein funktionaler Zusammenhang zwischen den benötigten Kenngrößen und dem MTOW der Flugzeuge hergestellt. Die so ermittelten Funktionen werden in dem Programmsystem SHAPe (*Simplified Hazard Area Prediction*) für die Vorhersage der Gefährdungsräume verwendet [3,4]. Um die Streuung und Unsicherheiten in den Daten zu berücksichtigen, wurden einhüllende Kurven bestimmt, die eine obere und untere Grenze der möglichen Parameter darstellen. Bei der Gefährdungsräumbestimmung werden nun die ungünstigsten Parameterkombinationen verwendet. So wird z.B. bei der Ermittlung der Rollsteuerleistung des nachfolgenden Flugzeugs nur die Grenzkurve mit den geringsten Steuerleistungen verwendet. Mit dieser konservativen Vorgehensweise lassen sich für beliebige (reale und/oder virtuelle) konventionelle Transportflugzeuge die Abmessungen der vereinfachten Gefährdungsräume vorhersagen (siehe BILD 14). Für Paarungen fester Flugzeugkategorien (z.B. H-M) können diese Berechnungen sogar vorab erfolgen und die Ergebnisse in Tabellen abgelegt werden. Die Maße der Gefährdungsräume lassen sich dann nur in Abhängigkeit von der aktuellen Stärke der (zeit- und wetterabhängigen) Zirkulation der Wirbel des Erzeugers ermitteln.

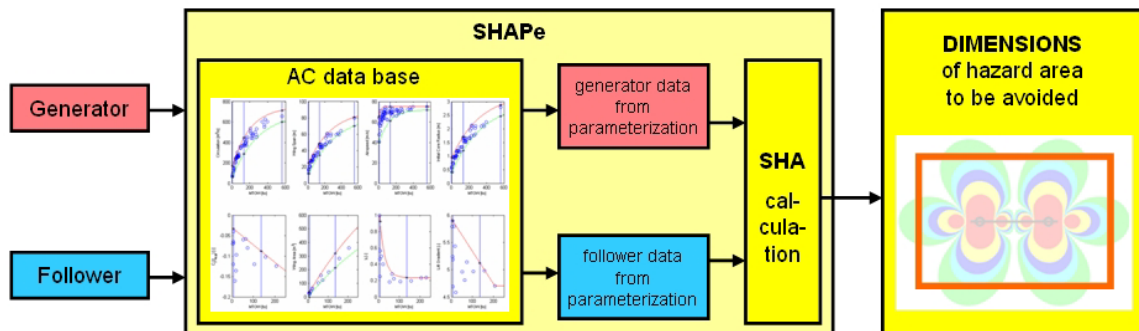


BILD 14. Prinzip der Gefährdungsräumvorhersage mit SHAPe (*Simplified Hazard Area Prediction*)

5.4. Dynamische Wirbelschleppenstaffelung

Die von einer Wirbelschleppe ausgehende Gefährdung für ein nachfolgendes Flugzeug ist abhängig von der Zirkulation der Randwirbel und der Verweildauer des Phänomens im Anflugbereich. Wirbelzerfall und Transport spielen also eine große Rolle bei der Festlegung sicherer Stafflungsabstände. Die Einbeziehung dieser Fakten in ein dynamisches Wirbelschleppen-Stafflungskonzept ist Ziel des Wirbelschleppenvorhersage- und Beobachtungssystems (WSVBS) im Rahmen des DLR Projektes Wirbelschleppe II [25]. Die prinzipielle Idee dieses Ansatzes ist in BILD 15 skizziert. Es zeigt einen Querschnitt durch den Anflugbereich.

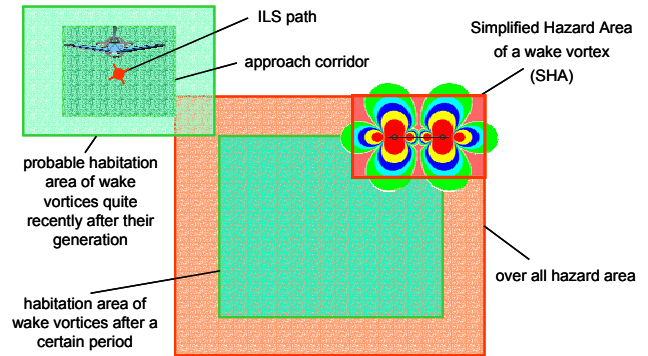


BILD 15. Schnitt durch den Anflugkorridor mit den Gefährdungsräumen

Bei einem ILS Anflug bewegen sich die Flugzeuge im Anflugkorridor um den nominellen Flugweg herum. Näherungsweise kann eine einfache rechteckige Querschnittsfläche bestimmt werden, die von anfliegenden Flugzeugen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit [26] nicht verlassen wird. Innerhalb dieses Gebietes werden auch die Wirbelschleppen erzeugt. Das Gebiet, in dem man mit Wirbelschleppen rechnen muss, ist wegen Unsicherheiten bei der Wirbelpositionsvorhersage größer als der Anflugkorridor. Im weiteren zeitlichen Verlauf bewegt sich dieser Wirbelaufenthaltsraum unter Windeinfluss und infolge der Absinkbewegung der Wirbelschleppe vom ILS-Sollflugweg weg. Mit voranschreitender Zeit nimmt auch die Unsicherheit bei der Positionsvorhersage der Wirbelschleppe zu, so dass die Abmessungen des Wirbelschleppenaufenthaltsraumes ebenfalls größer werden müssen. Entlang der Grenze des Wirbelschleppenaufenthaltsraumes muss zur Berücksichtigung des Wirbelinflussbereiches der zuvor beschriebene vereinfachte Gefährdungsräum überlagert werden. Die dadurch entste-

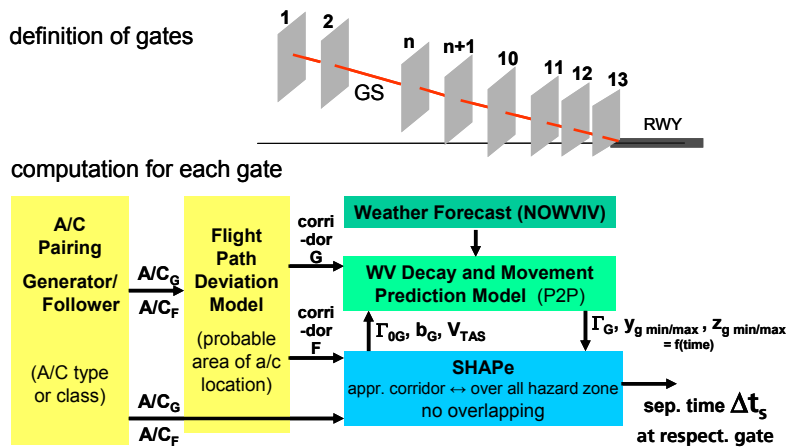


BILD 16. Konzept der dynamischen Wirbelschleppenstaffelung

hende äußere Grenze umfasst den Gesamtgefährdungsraum, in den ein nachfolgendes Flugzeug nicht einfliegen darf. Oder andersherum: Wenn es nach einer bestimmten Zeitspanne Δt_s zwischen dem Gesamtgefährdungsraum und dem Anflugkorridor keine Überlappung mehr gibt, dann kann zu diesem Zeitpunkt das nächste Flugzeug diesen Schnitt im Anflugbereich sicher passieren. Diese Betrachtung kann nun an vielen Schnitten entlang des Anflugkorridors wiederholt werden um die minimal mögliche Staffelungszeit Δt_s zu ermitteln. Dieser in BILD 16 dargestellte Prozess berücksichtigt die aktuelle Flugzeugpaarung und die vorhergesagten Wetterbedingungen, wodurch eine dynamische, den jeweiligen Randbedingungen angepasste Staffelung erreicht wird. Die Überprüfung des Anflugkorridors auf Wirbelschleppenfremtheit wird an 13 Fenstern (*Gates*) entlang der letzten 11nm vor der Schwelle durchgeführt. Die Zuverlässigkeit der Staffelungsvorhersage ist eng mit der Zuverlässigkeit der Vorhersage der Wetterbedingungen sowie der Voraussage des Wirbelzerfalls und des Wirbelschleppentransportes verknüpft [27]. Das hier vorgestellte Konzept verwendet die DLR-Vorhersagetools NOWVIV [28] für das Wetter und das probabilistische 2-Phasen-Wirbelschleppenmodell P2P [5,29]. Zur Sicherstellung, dass die prognostizierten Verhältnisse auch tatsächlich zutreffen, wird das WSVBS des DLR zusätzlich eine Beobachtungskomponente, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

5.5. Windeinfluss

5.5.1. Ruhende Atmosphäre

Das zuvor beschriebene Konzept wird aufgrund der Berücksichtigung von „Worst Case“ Situationen und Unsicherheitszuschlägen als konservativer Ansatz zur Bestimmung von Wirbelschleppenstaffelungen betrachtet. Diese Aussage kann anhand von Referenzrechnungen für den Fall der Windstille gezeigt werden. Ohne mittleren Wind sorgt lediglich die selbst induzierte Absinkbewegung dafür, dass die Wirbelschleppe den Anflugkorridor verlässt. Unabhängig vom mittleren Wind werden zwei unterschiedliche Fälle der atmosphärischen Turbulenz betrachtet.

- met_1: keine atmosphärische Turbulenz
- met_2: leichte Turbulenz
($\epsilon = 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$, $\text{TKE} = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$)

Für diese atmosphärischen Bedingungen wurden die zugehörigen Wirbelschleppenaufenthaltsräume mit Hilfe des P2P Modells berechnet.

Als typische Referenzwerte für die derzeitigen möglichen Staffelungsintervalle auf eine Einzellandebahn wurden $\text{ST}_{\text{H-H}} = 90\text{s}$ und $\text{ST}_{\text{H-M}} = 120\text{s}$ für die betrachteten Flugzeugpaarungen gewählt. Das hier beschriebene dynamische Staffelungskonzept liefert bei Windstille für beide Turbulenzsituationen längere Staffelungsintervalle und damit keinen Kapazitätsgewinn. Die berechneten Ergebnisse sind also konservativer als die derzeit angewandten Standards.

5.5.2. Seitenwind

Verglichen mit der ruhenden Atmosphäre sorgt hier neben der Absinkbewegung zusätzlich der Seitenwind dafür, dass die Wirbelschleppe den Anflugkorridor verlässt. BILD 17 illustriert den prinzipiellen Verlauf der Gefährdungsraum-bewegung bei einem Seitenwind von $v_{\text{Wg}} = 3\text{m/s}$ (von links) für eine H-M Flugzeugpaarung unter met_1 Bedingungen. Die minimale Staffelungszeit ST ergibt sich aus der maximalen Verweildauer der Wirbelschleppe in den betrachteten Fenstern entlang des Anfluges. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Fenster direkt vor der Landbahnschwelle für die minimal mögliche Staffelungszeit maßgeblich sind.

BILD 18 zeigt den Einfluss des Turbulenzniveaus und der Flugzeugpaarung auf den erforderlichen Seitenwind, um eine Staffelungsreduktion und damit eine Kapazitätserhöhung zu ermöglichen. Mit der Annahme, dass unabhängig von der Flugzeugpaarung eine Staffelungszeit von $\text{ST} = 60\text{s}$ eine absolute Untergrenze ist, ist der mögliche Zugewinn an Kapazität für H-M Paarungen größer als für H-H Kombinationen. Weiter erkennt man, dass für H-H der Seitenwind größer sein muss als für H-M Paarungen, bevor sich ein Kapazitätsgewinn einstellt. Obwohl für die met_2 Bedingungen das höhere Turbulenzniveau für einen schnelleren Wirbelzerfall sorgt, ist der minimal erforderliche Seitenwind für eine Kapazitätserhöhung größer als für die met_1 Situation. Die Ursache dafür ist die zunehmende Ungenauigkeit in der Vorhersage des Wirbelschleppenverhaltens bei stärkerer Turbulenz. In allen Fällen ist zu erkennen, dass es nur einen sehr schmalen Bereich des Seitenwindes gibt, in dem der Kapazitätsgewinn von Null auf sein Maximum anwächst.

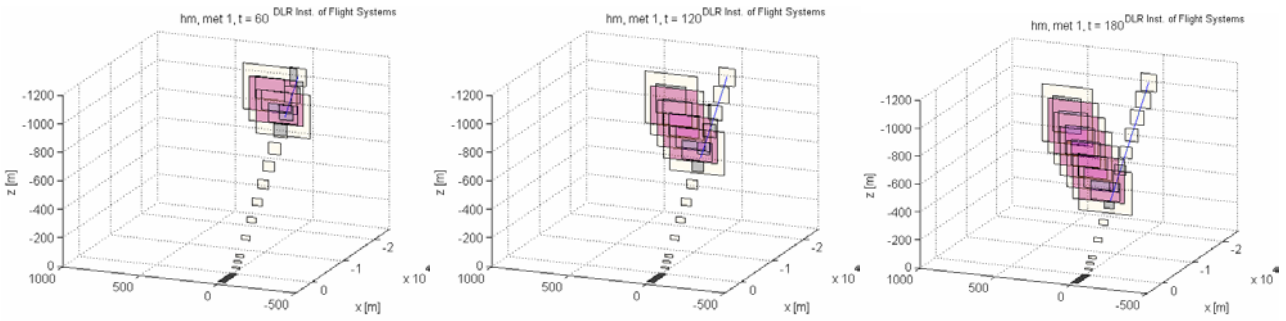


BILD 17. Transport (vertikal und lateral) des Gefährdungsraumes unter Seitenwind einfluss (H-M, $v_{Wg} = 3\text{m/s}$, met_1, $\text{RCR}_{\text{max}} = 0,2$)

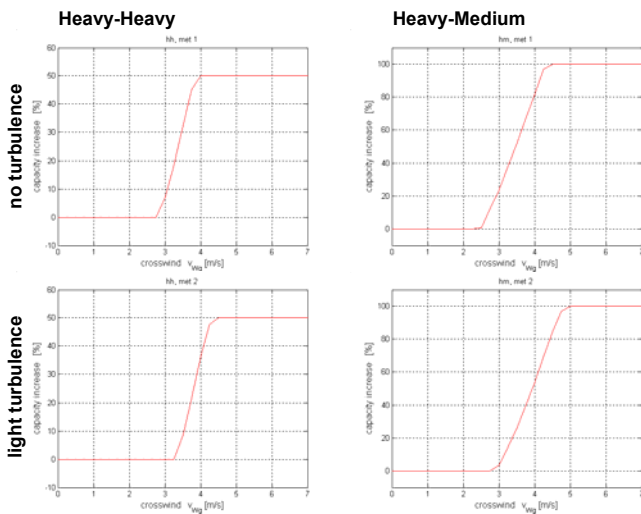


BILD 18. Kapazitätsgewinn bei Seitenwind ($\text{RCR}_{\text{max}} = 0,2$)

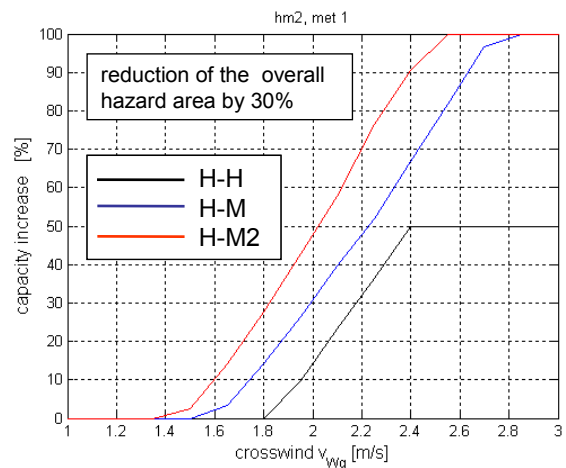


BILD 19. Auswirkungen der Reduktion des Gesamtgefährdungsraumes auf die Kapazität

BILD 19 zeigt den positiven Effekt, wenn es gelingt den Gesamtgefährdungsraum um 30% zu reduzieren. Eine solche Reduktion wäre z.B. durch eine genauere Vorhersage des Wirbeltransportes möglich. Das Bild zeigt außerdem den Vorteil einer zusätzlichen Unterteilung der MEDIUM Klasse. M2 umfasst dabei den Bereich von $64,5\text{to} < \text{MTOW} < 136\text{to}$. Der Bereich möglicher Kapazitätsgewinne verschiebt sich dadurch hin zu kleineren Seitenwindgeschwindigkeiten. Bedingung für die reduzierte Staffellung unter Seitenwind einfluss ist die Voraussetzung, dass die tatsächliche Seitenwindkomponente nie den für die Bestimmung der Wirbelschleppenstaffellung zugrunde gelegten Referenzwert unterschreitet.

5.5.3. Längswind

Den grundsätzlichen Effekt einer Längswindkomponente (Gegen- oder Rückenwind) zeigt BILD 20. Aus flugbetrieblichen Gründen interessieren hier nur Gegenwindsituationen. Gegenüber dem Fall ohne Wind wird die Wirbelschlepe im Längsschnitt vom Sollflugweg weggetragen. D.h. der Abstand einer auf dem ILS erzeugten Wirbelschlepe von einem auf dem ILS nachfolgenden Flugzeug wird verglichen mit dem Abstand bei Windstille größer, was unbestritten von Vorteil ist. Allerdings ist dieser Abstandsgewinn bei dem sehr kleinen Anflugbahnwinkel von $\gamma = -3^\circ$ nur gering, da die Verschiebung der Wirbelschlepe nahezu parallel zum Flugweg erfolgt. Ein merklicher Effekt ist selbst bei unrealistisch großen Gegenwind-

geschwindigkeiten nicht zu beobachten. Die Tatsache, dass durch den Gegenwind die Wirbelschlepe an einer identischen Wegkoordinate auch jünger ist (schwächerer Zerfall) spielt nur eine untergeordnete Rolle.

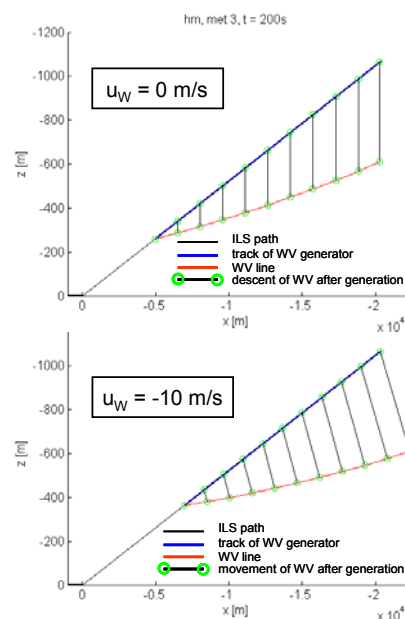


BILD 20. Wirbeltransport bei Gegenwind ($u_{Wg} = -10\text{m/s}$)

6. ZUSAMMENFASSUNG

Angesichts der hohen prognostizierten Wachstumsraten im Luftverkehr und der bereits heute existierenden Durchsatzengpässe zu den Verkehrsstoßzeiten an Flughäfen werden Möglichkeiten untersucht, in welchem Umfang eine Erhöhung der Flughafenkapazitäten durch die Verringerung der derzeitigen Wirbelschleppenstaffelung bei gleich bleibendem Sicherheitsniveau möglich ist. Von besonders großem Interesse sind dabei die Wirbelschleppenstaffelungen der Kombinationen HEAVY-HEAVY und HEAVY-MEDIUM, da überwiegend diese Kombinationen für große und internationale Flughäfen relevant sind. Der vorliegende Beitrag befasst sich ausschließlich mit der Staffelungsproblematik bei der Landung.

Unter Berücksichtigung der Landebahnbelegungszeit nach dem Aufsetzen kann als realistische Kapazitätsgrenze für eine einzelne Landebahn ein maximaler Durchsatz von ca. 60 AC/h angenommen werden. Die derzeitigen Wirbelschleppenstaffelungen lassen dies aber nicht zu. Bei Einhaltung der Standardstaffelungen sind für H-H max. 36 AC/h und für H-M 30 AC/h erreichbar. Ein erheblicher Zuwachs an Kapazität ist theoretisch denkbar, wenn eine Reduktion der Staffelungsabstände auf die Radarmindeststaffelung zulässig wäre.

Die derzeit gültigen gewichtsabhängigen Standardstaffelungsabstände basieren auf der Annahme, dass sie einen ausreichenden Zerfall der Wirbelschleppe auf ein ungefährliches Niveau ermöglichen. Es lässt sich zeigen, dass allein durch die Einführung einer größeren Anzahl von Flugzeuggewichtsklassen (Mehrfachunterteilung der existierenden Gewichtsklassen) ein nicht unerheblicher Zuwachs an Landekapazität erzielt werden kann. Dabei wären zusätzliche Unterteilungen der HEAVY Klasse besonders effektiv. Welcher quantitative Kapazitätswachstum dabei im Einzelnen erzielt werden kann, ist abhängig von der Anzahl der zusätzlichen Gewichtsklassen und vom jeweiligen Verkehrsmix.

Neuere Untersuchungen lassen vermuten, dass der Wirbelzerfall allein nicht immer die Ursache dafür sein kann, dass die aktuellen Standardstaffelungen eine ausreichende und durch den praktischen Einsatz bestätigte Sicherheit gewährleisten. Es kann gezeigt werden, dass der Wirbelschleppentransport aus dem Anflugbereich heraus eine zumindest ebensogroße Rolle für die Sicherheit spielt. Sowohl für den Wirbelzerfall wie auch für deren Transport haben die atmosphärischen Randbedingungen eine große Bedeutung. Es ist daher nur konsequent, diesen Einfluss bei der Festlegung sicherer Staffelungsabstände zu berücksichtigen. Dies führt zu wetterabhängigen dynamischen Staffelungsabständen. Aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit der Vorgänge bei der Wirbelschleppenentwicklung bietet sich hierfür eine zeitliche Staffelung an. Diese hat weiterhin den Vorteil, dass es bei Gegenwind durch die Reduktion der Übergrundgeschwindigkeit nicht zu Kapazitätsverlusten kommt. Im Rahmen des DLR Projektes „Wirbelschleppe II“ befindet sich beim DLR ein solches Wirbelschleppenvorhersage- und Beobachtungssystem (WSVBS) zur Vorhersage sicherer Staffelungen im Aufbau. Eine wesentliche Komponente in diesem System ist SHAPe (*Simplified Hazard Area Prediction*), das vereinfachte, potentielle Gefährdungsräume vorhersagt. SHAPe verwendet auf das maximale Startgewicht (MTOW) bezogene, parametrisierte Flugzeugdaten und ist universell auf verschiedenste Flugzeugpaarungen anwendbar.

Erste Untersuchungen des Einflusses atmosphärischer Randbedingungen zeigen, dass ab Seitenwindkomponenten von ca. 2m/s bis 3m/s Staffelungsreduktionen möglich sind. Seitenwinde oberhalb von 4m/s bis 5m/s bringen keine weiteren Kapazitätserhöhungen, da dann die minimal mögliche Staffelung begrenzt durch die Landebahnbelegungszeit erreicht ist. Ein positiver Einfluss von Gegenwinden auf die Landebahnkapazität nicht einmal bei unrealistischen großen Windgeschwindigkeiten zu beobachten. Ein höherer Turbulenzgrad der Atmosphäre führt zwar zu einem schnelleren Wirbelzerfall aber auch zu einer größeren Unsicherheit bei der Positionsvorhersage der Wirbelschleppe. Da der letztere Effekt überwiegt, wirkt sich eine höhere Turbulenz nicht günstig auf eine Staffelungsreduktion aus. Eine verbesserte Vorhersage des Wirbelschleppenaufenthaltsraumes könnte dies ändern und ist daher wünschenswert.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch eine dynamische Wirbelschleppenstaffelung zumindest theoretisch ein beachtliches Potenzial an Kapazitätswachstum für die nächsten Jahre erkennbar ist. Es ist jedoch sehr optimistisch, wenn nicht fraglich, ob damit eine Verdoppelung der Landekapazität auf einer Einzelbahn zu erreichen ist. Außerdem ist zu prüfen in welchem Umfang die Ansprüche im Luftverkehr hinsichtlich eines operationellen Betriebes mit einem zuverlässig planbaren Verkehrsdurchsatz bei einer stark wetterabhängigen Staffelung erfüllt werden können. Da die großen Flughäfen nicht nur eine Start- und Landebahn besitzen, ist in einem nächsten Schritt zu prüfen, wie sich die hier vorgestellten Ergebnisse auf Mehrbahnsysteme übertragen lassen. Außerdem sind die Betrachtungen auf einen gemischten Flugbetrieb bestehend aus Starts und Landungen zu erweitern. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt, der sich positiv auf eine Landebahnkapazität auswirken kann, ist der Einsatz von „Pilotenassistenzsystemen“. Dies sind z.B. Wirbelschleppenerkennungssysteme, die dem Piloten eine zuverlässige Information über die Situation vor seinem Flugzeug geben. Dies sind aber auch spezielle Regelungssysteme, die im Falle eines unbeabsichtigten Einfliegens in eine Wirbelschleppe deren Einfluss weitestgehend kompensieren und so zur Erhöhung der Sicherheit beitragen.

7. LITERATUR

- [1] EUROCONTOL, European Organization for the Safety of Air Navigation, Challenges to Growth 2004 Report (CTG04), Edition Number 1.0, EATMP Infocentre Reference 041109-01, Brussels, 2004
- [2] International Civil Aviation Organization (ICAO), Doc 4444-RAC/501 Rules of the Air and Traffic Services, 13th Edition, 1996
- [3] Hahn, K.-U., Schwarz, C., The Wake Vortex Encounter Avoidance-Computation of Safe Aircraft Separations using the SHAPe Concept, Presentation at the 1st Workshop WakeNet2-Europe, Heathrow Control Tower, London, United Kingdom, 2003
- [4] Hahn, K.-U., Coping with Wake Vortex, 23rd International Congress of Aeronautical Sciences, Toronto (Canada), 8-13 September 2002, ICAS, 23rd International Congress of Aeronautical Sciences Proceedings, 2002

- [5] Holzäpfel, F., Robins, R. E., Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake Vortex Model: Application and Assessment, *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 5, 2004
- [6] Winckelmans, G., Duquesne, T., Treve, V., Desenfans, O., Bricteux, L., Summary description of the models used in the Vortex Forecast System (VFS) - VFS version with added improvements done after completion of the Transport Canada funded project, Université Catholique de Louvain (UCL), 01/04/2005
- [7] Gerz, T., Holzäpfel, F., Köpp, W., Frech, M., Tafferner, A., Winckelmans, G., Research towards a wake-vortex advisory system for optimal aircraft spacing. *Comptes Rendus Physique, Académie des Sciences, Paris*, 6 No 4-5, 2005
- [8] Luckner, R., Höhne, G., Fuhrmann, M., Hazard Criteria for Wake Vortex Encounters During Approach, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 8, No. 8, 2004
- [9] Elsenaar, B., et al., Wake Vortex Research Needs for Improved Wake Vortex Separation Ruling and Reduced Signatures – Summary, Recommendations and Comments, Part I, Draft Version, WakeNet2-Europe, to be published by NLR, Amsterdam, 2006
- [10] Elsenaar, B., et al., Wake Vortex Research Needs for Improved Wake Vortex Separation Ruling and Reduced Signatures – Specialist's Report, Part II, Draft Version, WakeNet2-Europe, to be published by NLR, Amsterdam, 2006
- [11] Sammonds, R. I., Stinnett Jr, G. W., Hazard Criteria for Wake Vortex Encounters, NASA TM X-62,473, Moffet Field, CA, August 1975
- [12] Sammonds, R. I., Stinnett Jr, G. W., Larsen, W. E., Wake vortex encounter hazard criteria for two aircraft classes, NASA TM X-73,113, (also FAA-RD-75-206, 1976), 1976
- [13] Rossow, V. J., Lift-generated vortex wakes of subsonic transport aircraft, *Progress in Aerospace Sciences* 35 (1999), Pergamon, 1999
- [14] Gerz, T., et al., Aircraft Wake Vortices – A position paper, WakeNet, 2001
- [15] Schwarz, C., Hahn, K.-U., Gefährdung beim Einfliegen in Wirbelschleppen, German Aerospace Congress, DGLR-JT2003-242, DGLR-Jahrestagung, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2003
- [16] Hahn, K.-U., Schwarz, C., Friehmelt, H., A Simplified Hazard Area Prediction Model (SHAPE) for Wake Vortex Encounter Avoidance, 24th International Congress of Aeronautical Sciences, Yokohama (Japan), ICAS, paper 4.6.4, 2004
- [17] Schwarz, C., Hahn, K.-U., Simplified Hazard Area for Wake Vortex Encounter Avoidance, AIAA 5903, AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, San Francisco, CA, August 2005
- [18] Hahn, K.-U., Schwarz, C., Hazard Assessment/Avoidance Criterion, presentation on the WakeNet2-Europe Workshop – WG5, Wake Vortex Encounters in Flight & Flight Simulations, Airbus Deutschland, Hamburg, May 10 -11, 2004
- [19] Bruin, A. de, S-Wake Assessment of Wake Vortex Safety - Publishable Summary Report, NLR-TP-2003-243, 2003
- [20] Rossow V. J., Tinling, B. E., Research on Aircraft/ Vortex-Wake Interactions to Determine Acceptable Level of Wake Intensity; *Journal of Aircraft*, Vol. 25, No. 6, 1988
- [21] Stewart, E. C., A piloted simulation study of wake turbulence on final approach, AIAA Paper 98-4339, 1998
- [22] Hoehne, G., Reinke, A., Verbeek, M., Wake Vortex Encounter Flight Simulation: Metrics, Hazard Criteria, and Influence of Cockpit Motions, SWAKE-TN-320-1, Airbus Deutschland GmbH, 2002
- [23] Hahn, K.-U., Schwarz, C., Kloidt, S., Full-Flight Simulatorstudie zur Verifizierung von Wirbelschleppen-Gefährdungsraumgrenzen, DLR IB 111-2004/42, DLR Institute of Flight Systems, Braunschweig, 2004
- [24] Schwarz, C., Hahn, K.-U., Full-Flight Simulator Study for Wake Vortex Hazard Area Investigation, *Aerospace Science and Technology*, to be published in 2006
- [25] Gerz, T., et al., "Atmospheric Impact on Wake Vortex Development", *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS 2004, Jyväskylä, Finland, 2004
- [26] Maiss, M., FLIP – Flight Performance using Frankfurt ILS, DFS German Air Navigation Services, 2001
- [27] Frech, M., Holzäpfel, F., Skill of an aircraft wake-vortex transport and decay model using short-term weather prediction and observation, 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Atlanta (USA), 2006
- [28] Frech, M.; Tafferner, A., The Performance of the Model System NOWVIV during the Field Campaign WakeOP. In: 10th AMS Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, S. 216 - 219, Portland, OR, USA, 2002
- [29] Holzäpfel, F., Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model, *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 2, 2003

DANKSAGUNG

Die präsentierten Ergebnisse wurden im Rahmen des DLR Projektes „Wirbelschlepe II“ erarbeitet. Die Autoren danken dem gesamten Projektteam für die erfolgreiche Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt unserem DLR Kollege Dr. F. Holzäpfel (DLR Institut für Physik der Atmosphäre) für die aus den P2P Rechnungen bereitgestellten Daten.