

Anflüge und Landungen mit Verkehrsflugzeugen

Heute und in Zukunft

Zusammenfassung eines Vortrages von Flugkapitän Dipl.Ing. **Claus Cordes**

Veranstaltung der DGLR, der RAes und des VDI

gehalten an der HAW Hamburg am 08. Dezember 2011



1 Einleitung

Das auch für die Zukunft prognostizierte Wachstum des Luftverkehrs erfordert umfangreiche Veränderungen des Systems Luftverkehr, um das dann zu erwartende Aufkommen bewältigen zu können.

So ist schon seit einiger Zeit ein Anwachsen der durchschnittlichen Flugzeuggröße zu beobachten. Während z.B. die erste Version der Boeing B 737 etwa 100 Passagiere aufnehmen konnte, ist die derzeit gängigste Version, die B 737-800 für 189 Passagiere zugelassen. Auch der Canadair Regional Jet ist in den vergangenen 20 Jahren vom CRJ 200 für etwa 50 Passagiere zum CRJ 900 für etwa 90 Passagiere gewachsen.

So prognostiziert z.B. auch Airbus ein weiteres starkes Wachstum des Luftverkehrs : Der Trend gehe eindeutig zu größeren, treibstoffeffizienten Flugzeugen, heißt es in einer entsprechenden Analyse. Die weltweite Flotte der Passagierflugzeuge werde sich von heute etwa 15.000 auf etwa 31.000 im Jahre 2030 mehr als verdoppeln.

Bei 4 – 5 % jährlichem Wachstum werden im Jahre 2020 allein in Deutschland 300 Millionen Passagiere erwartet. Auch die Luftfracht entwickelt sich weiter stark. Während nur etwa 1% der weltweiten Frachtmengen auf dem Luftweg befördert werden, macht diese Menge 30% des Wertes der Gesamtfrachtmenge aus.

2 Kapazität des Luftraumes

Durch umfangreiche Maßnahmen der Verkehrsflusssteuerung ist die Kapazität des Luftraumes in den letzten zwei Jahrzehnten erheblich gesteigert worden, hilfreich bzw. Voraussetzung dafür waren die allgemeine Einführung der Flächennavigation, die durch Etablierung der Trägheits- und der Satellitennavigation ermöglicht wurde und zunehmend die Funknavigation ersetzt. Auch der mittlerweile fast weltweit eingeführte RVSM (Reduced Vertical Separation Minima) Betrieb, der die vertikale Staffelung oberhalb FL 290 (Flugfläche 290) von 2.000 ft auf 1.000 ft verminderte, hat entscheidend dazu beigetragen.

Nadelöhr des Betriebes werden dadurch zunehmend die Start- und Landebahnssysteme. Eine Erhöhung der "Eckwerte für Bewegungen" kommt damit in der mittleren Zukunft eine erhebliche Bedeutung zu. Schon heute kommt es an den großen Drehscheiben des Luftverkehrs zu den Spitzenzeiten speziell in den Morgen- und späten Nachmittagsstunden zu Verzögerungen im Betriebsablauf, die sich insbesondere für Netzwerkcarrier sehr nachhaltig auswirken, da insbesondere wettbewerbsbedingte kurze Umsteigezeiten u.U. verfehlt werden. Die deshalb notwendig werdenden Eingriffe in den laufenden Betrieb erfordern hohen Steuerungsaufwand komplexer Vorgänge und verursachen erhebliche Kosten für die Luftverkehrsgesellschaften und Flughäfen und verärgern die Passagiere.

3 Abfertigungskapazität bei Landungen

Entscheidend für die Abfertigungskapazität bei Landungen ist der zeitliche Abstand der landenden Maschinen. Durch den unmittelbaren physikalischen Zusammenhang zwischen Zeit, Weg und Geschwindigkeit kann ein zeitlicher Abstand auch als Entfernung zweier Flugzeuge voneinander bestimmt werden.

Für die Bestimmung des notwendigen Abstandes zwischen zwei nacheinander landenden Flugzeuge sind zwei Faktoren maßgebend:

- die *Bahnbelegungszeit* und
- die *Wirbelschleppenintensität* und damit die erforderliche *Staffelung*

3.1 Bahnbelegungszeit, Anfluggeschwindigkeit,

Landeklappenstellung, atmosphärische Bedingungen

Die *Bahnbelegungszeit* hängt von der Aufsetzgeschwindigkeit und der nachfolgenden Verzögerung ab.

Die *Aufsetzgeschwindigkeit* ist praktisch gleich der Anfluggeschwindigkeit. Die *Anfluggeschwindigkeit* des stabilisierten Endanfluges bestimmt sich aus der Landemasse, der gewählten *Landeklappenstellung* und den *atmosphärischen Bedingungen*.

Anfluggeschwindigkeit $v_{TGT} = v_{REF} + 5 \text{ kt}$ (oder andere Zuschläge)

$$v_{REF} = 1,3 v_S$$

v_{TGT} = target speed

v_{REF} = reference speed

v_S = stall speed

Die Masse und die Luftdichte gehen direkt in die Bestimmung der stall speed (Überziehgeschwindigkeit) ein.

$$v_S = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot c_{L \max} \cdot S}}$$

Die Grundgeschwindigkeit auch genannt *Geschwindigkeit über Grund* bestimmt sich aus der wahren Eigengeschwindigkeit, TAS (hier die Anfluggeschwindigkeit) und der wirkenden Windkomponente, WC.

$$GS = TAS \pm WC$$

Für die meisten Verkehrsflugzeuge sind zwei **Stellungen der Landeklappen** für die Landung zugelassen. Damit werden die Forderungen nach kürzest möglicher erforderlicher Landestrecke und nach entsprechender Steigflugeistung im Durchstartfall (approach climb limit) erfüllt.

z.B.	A 320 Fam	Stellungen	3	4
	B 737 Fam		30°	40°
	MD 11		35°	50°
	Ju 52		10°	25° 40°

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Einfluss der Landeklappenstellung auf die v_{REF} (in kt) für das Muster MD 11:

LM [1.000 kg]	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
$\eta_K = 35^\circ$	132	132	134	138	143	147	151	155	158	163
$\eta_K = 50^\circ$	130	130	130	134	138	142	146	150	153	157

Atmosphärische Bedingungen. Andere Dichten als die Normdichte von $1,225 \text{ kg m}^{-3}$ wirken sich auf die Geschwindigkeit wie folgt aus:

$$v = v_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$$

Beispiel für eine Landung in Meereshöhe

bei 0°C : $\rho_0 = 1,293 \text{ kg m}^{-3}$

bei 30°C : $\rho_{30} = 1,165 \text{ kg m}^{-3}$

$v_{30} = 1,05 v_0$

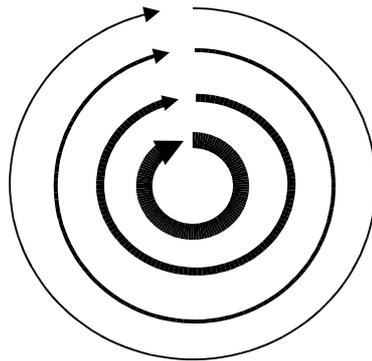
3.2 Wirbelschleppenintensität und Staffelung

Die **Wirbelschleppenintensität** hängt außer von baulichen Besonderheiten des jeweiligen Flugzeugmusters im Wesentlichen vom Auftriebsbeiwert c_L ab, wie in der Formel für den Beiwert des induziertes Widerstandes deutlich wird:

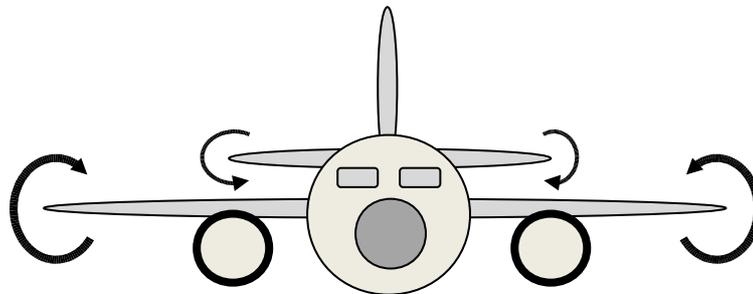
$$c_{Di} = \frac{c_L^2}{e \cdot \pi \cdot \lambda}$$

wobei c_L wiederum maßgeblich von der Geschwindigkeit abhängt, in die die Masse implizit eingeht.

Die Verteilung der Drehgeschwindigkeit innerhalb eines Wirbels ist zum Zentrum hin stark zunehmend, der Kern mit einem Durchmesser von einigen wenigen Metern kann Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 45°/s erreichen.



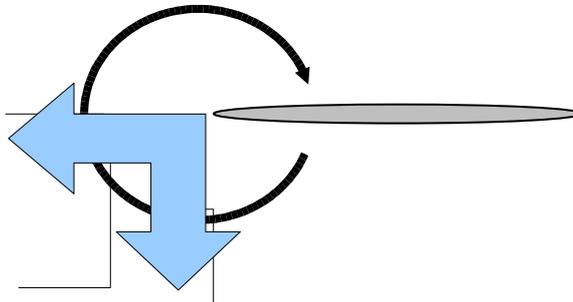
Die vom Flugzeug abgehenden Wirbel drehen einwärts, wie sich aus der Druckverteilung an den Tragflächen leicht ableiten lässt.



Dabei wird der von der Druckverteilung an den Tragflächen induzierte Wirbel durch den vom Höhenleitwerk erzeugten, der wegen der zum Tragwerk inversen Druckverteilung andersherum dreht, gemindert.

Die Lebensdauer eines Wirbels hängt im flugbetrieblichen Alltag wesentlich von den atmosphärischen Dämpfungsbedingungen (Dichte) und vom vorherrschenden Wind ab. Insbesondere starker und böiger Wind vertreibt oder zerreißt die Wirbel recht schnell.

Die laterale und vertikale Ausbreitung eines solchen Wirbels wird überschlägig mit einer Geschwindigkeit von 5 kt nach außen und 500 fpm (feet per minute) nach unten beschrieben, woraus sich ein Winkel von etwa 45° zur Horizontalen entsteht.



Neuere Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass der Wirbel beim Auftreffen auf den Boden sehr stark gebremst wird, und dass sich diese erzwungene Dämpfung "den Gleitweg hinauf" sehr schnell fortpflanzt, was erklären würde, warum sehr wenige Meldungen über Einflüge in Wirbel im letzten Teil des Endanfluges vorliegen.

Staffelung. Aus diesen Grunddaten sind *Staffelungskriterien* für den Landeanflug entwickelt worden. Dazu werden Flugzeuge in die Kategorien

L	light	bis 7 Tonnen maximaler Startmasse	
M	medium	bis 136 Tonnen maximaler Startmasse	
H	heavy	über 136 tonnen maximaler Startmasse	
S	super	für A 380	eingeteilt.

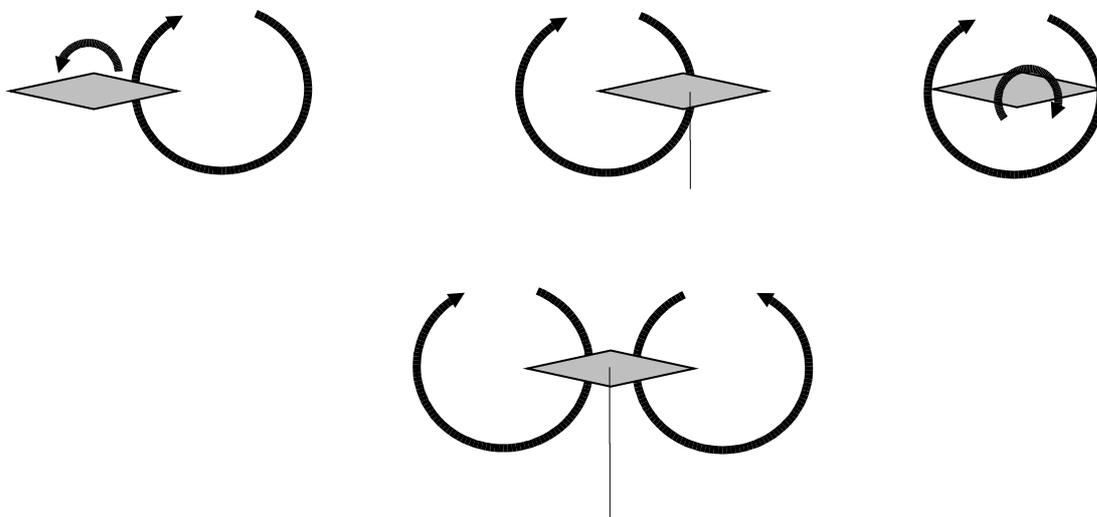
Folgende Staffelungsabstände sind festgelegt

light	hinter	light	3 NM
		medium	5 NM
		heavy	6 NM
medium	hinter	medium	3 NM
		heavy	5 NM
lighter	vor	heavier	2,5 NM

Daraus ist zu erkennen, dass ausser der von einem vorausfliegenden Flugzeug erzeugten Wirbelstärke auch die "Rezeptionsfähigkeit" des nachfolgenden Flugzeuges eine wichtige Rolle spielt.

Mögliche Auswirkungen eines Einfluges in die Wirbelschleppe eines vorausfliegenden Flugzeuges

Die Auswirkungen ergeben sich aus dem rotierenden Charakter eines Wirbels, seiner Rotationsgeschwindigkeit, seinem Durchmesser, der Spannweite des Rezeptors und dem Ort des Einfluges in den Wirbel. Es kann dabei zu Vertikal- und Rollbewegungen und Kombinationen daraus kommen.



In ruhiger Atmosphäre ist es einem Piloten möglich, die Annäherung an einen Wirbel zu bemerken, jedoch nahezu unmöglich, die Position des Wirbels in Relation zum Flugzeug abzuschätzen.

Unter Sichtflugbedingungen kann die Verantwortung für eine ausreichende Wirbelschleppenstaffelung vom Lotsen auf den Piloten übertragen werden. Voraussetzung für die Akzeptanz einer Übertragung durch die Besatzung ist i.d.R. eine ausreichend große Seitenwindkomponente.

4 Der Standardanflug

Als Standardanflug wird hier ein *ILS – Anflug* genauer betrachtet.

Der Anflug besteht aus dem

- initial approach (vom Anflugfix zur Anfluggrundlinie)
- intermediate approach (Verzögerung und konfigurieren im Horizontalflug)
- final approach (Sinkflug in Landekonfiguration bis zum Aufsetzpunkt)

Dabei beginnt der Endanflug (final approach üblicherweise in 3.000 ft über Grund und in 10 NM Entfernung zum Aufsetzpunkt. Die Schwelle soll in 50 ft überflogen werden, der Aufsetzpunkt liegt 1.000 ft hinter der Schwelle und ist entsprechend markiert.

Im Endanflugpunkt soll die stabile Endanflugkonfiguration (Konfiguration, Geschwindigkeit, Schub) in 1.000 ft über Grund vollständig erreicht sein. Nur so ist es möglich, auf störende äußere Einflüsse angemessen zu reagieren. Veränderungen des Steuerkurses und der Sinkrate sind nur sehr eingeschränkt möglich und sollen unterbleiben, bzw. unmöglich sein.

Bei Einflug in einen kräftigen Wirbel im letzten Teil des Endanfluges bleibt nur die Einleitung eines Fehlanflugverfahrens.

Wenn also die Kapazität der Landebahn erhöht werden soll, so stellt sich die Frage: Wie können die Abstände zwischen anfliegenden Flugzeugen verringert werden, ohne die Sicherheit zu gefährden?

5 Lösungsansätze zur Verringerung der Staffelung

5.1 Justierung der Abstände

Die vorgenannten lateralen Abstände sollen zu keinem Zeitpunkt während des Anfluges unterschritten werden, auch nicht wenn Flugzeuge unterschiedliche Endanfluggeschwindigkeiten haben. Die Etablierung der Abstände wäre präziser möglich, wenn alle Flugzeuge nach einem Ablaufpunkt mit derselben Geschwindigkeit fliegen. Das ist wegen der unterschiedlichen Flächenbelastungen und Landeklappenstellungen derzeit nicht möglich.

Eine Lösung könnte wie folgt aussehen: Basierend auf den aktuellen Wetterbedingungen wird von der Anflugkontrollstelle eine einheitliche Geschwindigkeit für die jeweiligen Phasen des Anfluges festgelegt. Nach der Maßgabe $v_{REF} = 1,3 v_S$ müssen die Landeklappen (c_L – Werte) stufenlos verstellt werden. Eine automatische Anpassung der Landeklappenstellung an die geflogene Geschwindigkeit wäre dazu sehr hilfreich, wäre aber eine Umkehrung der heute angewandten Philosophie (Geschwindigkeit nach der Klappenstellung). Technisch anspruchsvoll ist dabei die notwendige Dämpfung des Systems, damit die Klappen nicht auch bei kleinen Änderungen der Geschwindigkeit (Böigkeit) permanent hin und her fahren.

Dadurch könnten im Zusammenspiel mit variierendem Schub und den damit verbundenen Lastigkeitsänderungen Nickschwingungen entstehen, die einen stabilisierten Endanflug im o.a. Sinne unmöglich machen. Problematisch wäre auch das sich für jeden Anflug ändernde Bild nach außen für die Flugzeugführer. Außerdem müssen die notwendig werdenden Verfahren bei Systemausfällen und die ergonomische Stellung des Landeklappenhebels untersucht werden.

5.2 Steilere oder kurvige Anflüge

Es kann mit steilen oder kurvigen Anflügen versucht werden, den Wirbeln vertikal oder lateral auszuweichen. Allerdings ist auf ein wenn auch eventuell neu zu definierendes Minimum für einen vollständig stabilisierten, geraden Endanflug nicht zu verzichten.

Steilere Anflüge mindern durch einen größeren Abstand zum Boden den dort empfangenen Schalldruck, bringen aber hohe Sinkraten in Verbindung mit niedrigen Schüben mit sich, was als Ausgangssituation für ein Durchstartmanöver ungünstig ist, da die Motoren eine längere Beschleunigungszeit benötigen und eine höhere Sinkrate gebrochen werden muss. Insbesondere geringe Luftdichten verstärken das Problem hoher Sinkraten.

Bei kurvigen Anflügen würden Gebiete, die bei geraden Anflügen nicht unmittelbar überflogen werden, unter dem Anflugweg liegen. Da kurvige Anflüge je nach Wetterbedingungen und nach Flugzeugmuster sicher unterschiedliche Radien aufwiesen, wäre wegen der "fächerartigen" Anflugschneise mit deutlichen politischen Schwierigkeiten zu rechnen.

5.3 Intensivere Erforschung der Wirbelintensität und Ausbreitung

Die weiter vorne genannten Staffelungswerte sind fix und müssen damit konservativ sein. Wäre mehr über die Ausbildung und Ausbreitung der Wirbel in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen des erzeugenden Flugzeuges und des vorherrschenden Wetters bekannt, könnten die notwendigen Abstände situativ angepasst (kleiner) werden.

5.4 Sichtbarmachung von Wirbeln

Wären die Wirbel für die Flugzeugführer sichtbar zu machen, könnten die Konservatismen der Staffelung ebenfalls gemindert oder aufgegeben werden. Zumindest wären die Flugzeugführer dann in der Lage, unmittelbar vor Einflug in einen Wirbel auszuweichen. Über die Form der geeigneten Darstellung wären intensive Untersuchungen anzustellen

5.5 Durchflug durch Wirbel

In Verbindung mit einem bordeigenen Detektionssystem für Wirbel könnten Wirbelintensitäten und relative Positionen bestimmt werden, die einen Durchflug gestatten, wenn Piloten oder Flugführungssysteme in der Lage sind, die vom Wirbel auf das Flugzeug ausgeübten Einflüsse zu kompensieren, ähnlich der Wirkungsweise eines "gust load alleviation" Systems. Diese Lösung wäre aber sicher mit erheblichen Akzeptanz- und Zulassungsproblemen verbunden. Da Einflüge in Wirbel auch zu schlagartigen Veränderungen der gemessenen Stau- und Statikdrücke führen sind die Auswirkungen auf die Flight Control Laws erheblich und komplex. Inwiefern die Einströmung in die Triebwerke nachhaltig gestört wird, wäre ebenfalls intensiv zu untersuchen. Gerade im Bereich niedriger Drehzahlen und in niedrigen Höhen wäre die Gefahr eines Strömungsabrisses im Verdichter relativ hoch. Ein Triebwerksausfall im kurzen Endanflug wäre sehr problematisch.

6 Laufende Forschung

S E S A R Single European Sky Air Traffic Management Research program

"The objective of SESAR is to eliminate the fragmented approach to ATM, transform the European ATM system, synchronize the plans and actions of the different partners and federate resources."

6.1 Beschreibung des WVDSS - Wake Vortex Decision Support System

Ein wesentliches Element in Bezug auf die bisher dargestellte Problematik ist WVDSS

"Wake Vortex Decision Support System"

"Wake turbulence separation minima between aircraft are fixed, expressed in time for departures and in distance for arrivals. The used separation minima are considered as being sometimes over conservative. In particular, the impact of meteorological conditions on wake vortex decay and transport is not taken into account due to the lack of information about the actual position and strength of the wake vortices and details of local weather. Additionally the existing aircraft categories regarding wake turbulence separation could be improved with knowledge about the actually generated wake vortices of the leading aircraft and the severity of those wake vortices to the trailing aircraft for each aircraft type pair."

Das System soll also

- Position und Stärke von Wirbeln in Echtzeit aufzeigen
- ihr Verhalten und ihren potenziellen Einfluss auf die Flugsicherheit und die Kapazität vorhersagen

und dabei berücksichtigen

- das aktuelle Wetter im "Kontrollraum"
- typische klimatologische Eigenheiten des Kontrollraums
- die aktiven und passiven Charakteristika der Flugzeuge

Als Ergebnis soll eine "time based separation" die fixen Abstände ersetzen.

"WVDSS will be able to optimize runway throughput and reduce delays for different airports and runway configurations in all weather conditions."

Dazu ein Auszug aus

PROCEDURE FOR AIR NAVIGATION SERVICES

DOC 4444 – RAC/501

- 12.2.1.a A suitable point on the approach path, which shall be capable of being accurately determined by the pilot, shall be specified, to serve as a check point in timing successive approaches.*
- 12.2.1.b Aircraft shall be given a time at which to pass the specified point inbound, which shall be determined with the aim of achieving the desired interval between successive landings on the runway while respecting the applicable separation minima at all times, including the period of runway occupancy.*
- 12.2.2 The time at which the aircraft should pass the specified point shall be determined by the unit providing approach control service and notified to the aircraft sufficiently in advance to permit the pilot to arrange the flight path accordingly*

6.2 Voraussetzungen für die Umsetzung des WVDSS

Zunächst mal müssen die Navigationseinrichtungen an Bord der Luftfahrzeuge in der Lage sein, die laterale und vertikale Position mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen und definierte Punkte anzufliegen. Der Zeitpunkt, zu dem eine bestimmte Position erreicht wird ist von der Grundgeschwindigkeit des Flugzeuges abhängig. Maßgeblich wird also anders als heute die Grundgeschwindigkeit, aus der dann quasi in einem inversen Algorithmus die angezeigte (kalibrierte) Geschwindigkeit bestimmt werden muss. Dazu sind eine Reihe von Luftdaten erforderlich.

Grundgeschwindigkeit - Wind nach Position und Höhe → wahre Eigengeschwindigkeit
w. Eigengeschwindigkeit - Dichteabweichung → Equivalentgeschwindigkeit
Equivalentgeschwindigkeit - Kompressibilität → kalibrierte Geschwindigkeit
kalibrierte Geschwindigkeit - Einbaufehler → angezeigte Geschwindigkeit

Die angezeigte, bzw. kalibrierte Geschwindigkeit ist die am Fahrtmesser dargestellte und auch Grundlage der Eingaben in das Autoflight System entweder als "managed" oder "pilot selected".

Um eine sinnvolle Annäherung an den vorbestimmten Ablaufpunkt zu ermöglichen, muss der Überflugzeitpunkt sehr rechtzeitig bestimmt werden, um längere Flugzeiten mit einer deutlich von der optimalen Geschwindigkeit abweichenden zu vermeiden, um so ansteigende "operating costs" zu vermeiden. Dabei ist die Durchmischung von Kurz- und Langstreckenflugzeugen, die ja gerade wegen ihrer unterschiedlichen Größen die Wirbelschleppenproblematik entscheidend prägen, problematisch. Langstreckenmaschinen starten ja schon zu einem Ziel, wenn die Kurzstreckenmaschine, die im selben Hub die Gäste übernehmen soll, z.B. noch die letzten Abendflüge des Vortages absolviert.

Es sind also eine Langfrist- (12h) und eine Kurzfristplanung der Sequenz erforderlich, die eine kapazitätsmaximierende Sequenz erstellt, was auch dazu führen kann, dass einzelne Maschinen ihre Geschwindigkeit deutlich anpassen müssen.

Außerdem müssen die aktuellen atmosphärischen Parameter wie Wind nach Richtung und Stärke, Temperatur und lokaler Luftdruck erfasst und verbreitet werden, wozu sich die Flight Management Systeme und Transponder Modus S verwenden lassen.

Sollte ein anfliegender Flugzeug aufgrund einer Verkehrskonfliktsituation sein vertikales oder laterales Flugprofil kurzzeitig variieren müssen, sind Neuberechnungen der Geschwindigkeit vorzunehmen, da diese in den Algorithmus eingehenden Parameter Änderungen unterliegen, die das Ergebnis beeinflussen.

Im Idealfall würden Maschinen zu dem Augenblick starten, der ihnen unter Einhaltung des individuell optimalen Profiles nach Weg, Höhe und Geschwindigkeit einen verzögerungsfreien Anflug innerhalb einer auf Kapazität optimierten Sequenz am Zielflughafen gestattet.

Der Definition von Toleranzen, deren Überschreiten dann Korrekturen des Profiles auslösen muss, kommt eine erhebliche Bedeutung zu, um die potenziellen Vorteile nicht zu mindern oder aufzuheben.

Es ist geplant, WVDSS Systeme zu Versuchszwecken im Jahre 2014 in CDG (Paris Charles-de-Gaulle) und 2016 in Frankfurt in Betrieb zu nehmen.

Erst mit diesen Erfahrungen werden sich belastbare Prognosen über die Steigerung der Kapazität erstellen lassen.

7 Zusammenfassung

Aufgrund der erwarteten weiteren Zunahme des Luftverkehrs bei begrenzten Kapazitäten muss die Effizienz des Luftverkehrssystems weiter gesteigert werden. Insbesondere die begrenzte Verfügbarkeit von Landebahnen ist ein Nadelöhr. Die Notwendigkeit der Staffelung anfliegender Flugzeuge wegen der unvermeidbaren Wirbelschleppen wurde als maßgeblicher kapazitätsbegrenzender Faktor identifiziert. Die bisher angewandten starren und konservativen Staffelungskriterien sollen durch geeignete Maßnahmen an den tatsächlich notwendigen Rahmen angepasst werden. Dazu wird eine entscheidungsunterstützendes System entwickelt (das WVDSS - Wake Vortex Decision Support System), dessen Empfehlungen in die die Sequenz ermittelnden Algorithmen eingehen müssen. Die daraus resultierenden Anforderungen an die zu fliegenden Profile verändern bis zu einem gewissen Grad dann auch die Auslegungsparameter künftiger Flugzeugentwürfe.