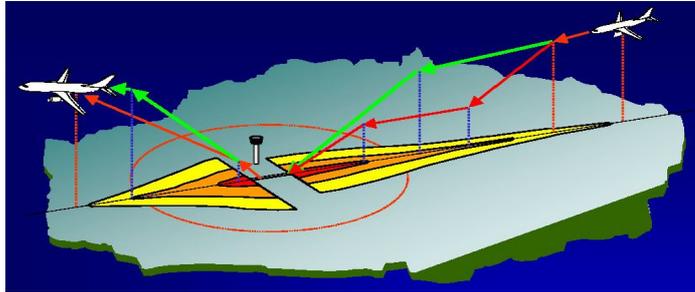


## Lärmarme An- und Abflugverfahren



**Reinhard König, Christos Saliaris, Roman-Georg Huemer**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig

**Raimar Stump**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Flugführung, Braunschweig

Projekt "Leiser Flugverkehr" - Lärmarme An- und Abflugverfahren -  
Abschlusspräsentation am 16. März 2004 in Köln-Porz



### Ansprechpartner:

Dr. Reinhard König  
DLR Institut für Flugsystemtechnik  
Lilienthalplatz 7  
38302 Braunschweig  
Tel. 0531 295 2668  
Fax 0531 295 2845  
E-mail: reinhard.koenig@dlr.de

Raimar Stump  
DLR Institut für Flugführung  
Lilienthalplatz 7  
38302 Braunschweig  
Tel. 0531 295 2542  
Fax 0531 295 2180  
E-mail: raimar.stump@dlr.de

## Problemstellung



Die Lärmquellen am Flugzeug sind:



→ Eine direkte Lärmreduzierung an Triebwerken, Fahrwerken und Hochauftriebshilfen kann nur **mittel- bis langfristig** realisiert werden

### Lärmwirkung:

- Der Triebwerkslärm ist hauptsächlich vom Schubniveau abhängig
- Der Fahrwerks- bzw. Vorflügel- / Landeklappenlärm hängt ungefähr mit der 5. Potenz von der Fluggeschwindigkeit ab
- Die Verdoppelung der Entfernung zur Lärmquelle (Bahn) reduziert den Lärm um 6 bis 10 dB



Die größten Lärmquellen am Flugzeug sind die Triebwerke, die Fahrwerke und die Hochauftriebshilfen (Vorflügel und Klappen). Eine direkte Lärmreduzierung kann hier nur mittel- bis langfristig realisiert werden.

Betrachtet man die Lärmwirkung der einzelnen Lärmquellen, dann können hieraus kurz- bis mittelfristige Maßnahmen zur Lärmreduktion abgeleitet werden.

So ist der Triebwerkslärm hauptsächlich vom Schubniveau abhängig, der Lärm der Flugzeugzelle, der Fahrwerke, der Vorflügel und der Landeklappen nimmt deutlich der Fluggeschwindigkeit zu und eine Verdoppelung der Entfernung zur Lärmquelle reduziert den Lärm um 6 bis 10 dB.

## Problemstellung



- Eine **kurz- bis mittelfristige** Lärminderung am Immissionsort kann deshalb realisiert werden:
- durch Senken des Schubniveaus,
  - durch Anheben der Flugbahn,
  - durch Verringern der Fluggeschwindigkeit,
  - durch Verzögern des Ausfahrens der Vorflügel und Landeklappen,
  - und durch Verzögern des Ausfahrens der Fahrwerke
- Leider heben sich diese Maßnahmen in ihrer Wirkung oft auf, bzw. sie widersprechen sich aus flugphysikalischen Gründen.
- Beispiele:
- beim Start kann die Flugbahn nicht angehoben und gleichzeitig der Schub gesenkt werden
  - bei der Landung kann die Fluggeschwindigkeit nicht verringert werden ohne gleichzeitig die Landeklappen auszufahren



Geeignete kurz- bis mittelfristige Massnahmen zur Lärmreduktion sind ein Senken des Schubniveaus, ein Anheben der Flugbahn, ein Verringern der Fluggeschwindigkeit, ein verzögertes Ausfahren der Vorflügel, Landeklappen und Fahrwerke.

Leider heben sich diese Maßnahmen in ihrer Wirkung oft auf, bzw. widersprechen sich aus flugphysikalischen Gründen.

Beispiele dafür sind:

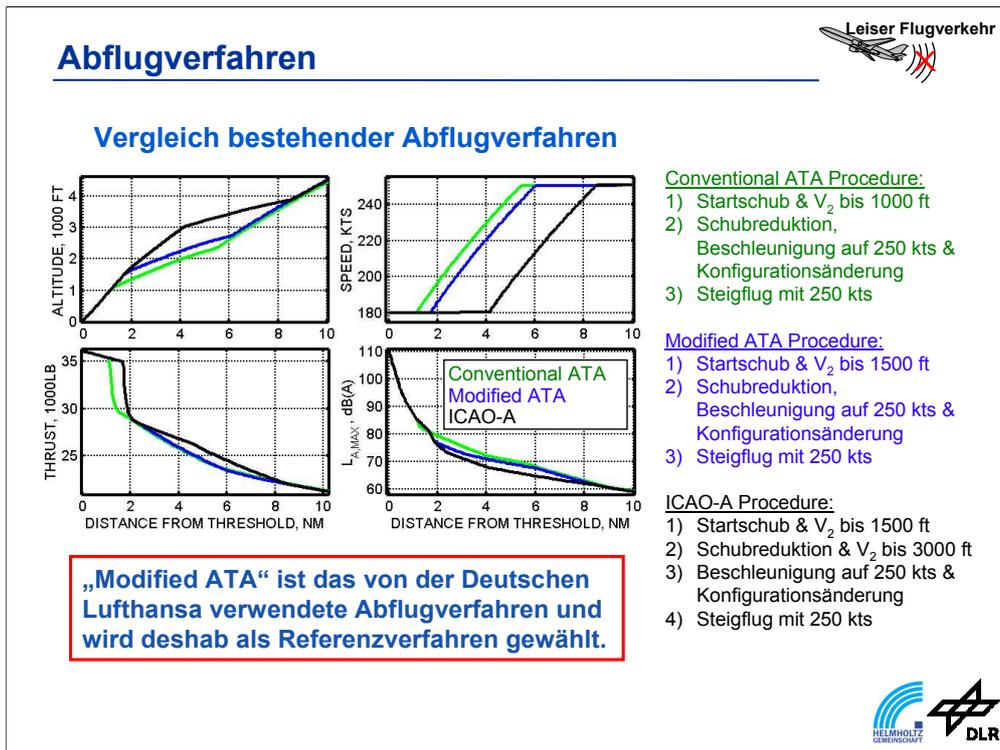
- Beim Start kann die Flugbahn nicht angehoben und gleichzeitig der Schub gesenkt werden.
- Bei der Landung kann die Fluggeschwindigkeit nicht verringert werden ohne gleichzeitig die Landeklappen auszufahren.

## Forschungsziele



- Definition lärmreduzierter Flugverfahren unter Berücksichtigung der Einflüsse auf Sicherheit, Arbeitsbelastung der Piloten, Passagierkomfort und Treibstoffverbrauch
- Bewertung der verbesserten Verfahren hinsichtlich ihres Lärminderungspotentials gegenüber Referenzverfahren
- Erstellung von Konzepten zur Integration lärmreduzierter Verfahren in moderne Air Traffic Management Systeme





Verglichen werden verschiedene Abflugverfahren hinsichtlich ihres Höhenprofils (ALTITUDE), Geschwindigkeitsverlaufes (SPEED), Schubverlaufes (THRUST) und Maximalschallpegels (LAMAX) direkt unterhalb der Flugbahn. Dazu sind die Größen über dem Abstand zum Startpunkt (DISTANCE) aufgetragen.

ICAO-A und CONV-ATA unterscheiden sich zuerst einmal durch die Höhe in der der Schub reduziert wird. Im Anschluß daran wird bei ICAO-A die Energiezufuhr vollständig in Höhe umgesetzt, während bei CONV-ATA sowohl die Höhe als auch die Geschwindigkeit zunimmt. Vergleicht man den Maximalschallpegel, dann zeigt sich für ICAO-A im Vergleich mit CONV-ATA ein geringerer Pegel ab ca. 2 nm vom Flughafen entfernt. Im Bereich zwischen 1 und 2 nm führt dagegen CONV-ATA zu einem geringeren Pegel (Schub wird früher zurückgenommen). Vergleicht man den Zeitbedarf / Treibstoffverbrauch dann ist CONV-ATA deutlich im Vorteil.

Als ein Verfahren, das sowohl ökologisch als auch ökonomisch angesehen werden kann, ist MOD-ATA einzustufen. Gegenüber CONV-ATA ist eine Lärmreduktion im Flughafenfernbereich zu sehen. Gleichzeitig ergibt das Verfahren einen ähnlich niedrigeren Zeitbedarf / Treibstoffverbrauch wie ICAO-A. MOD-ATA ist das von der Deutschen Lufthansa verwendete Abflugverfahren und wird deshalb als Referenz für die Auslegung zukünftiger lärmminimaler Abflugverfahren verwendet.

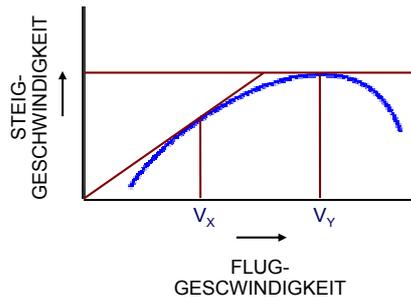
## Abflugverfahren - Stationärer Steigflug



Schnell oder steil Höhe gewinnen?

$$\text{Steigwinkel} = \left( \frac{\text{Schub}}{\text{Gewicht}} - \frac{\text{Widerstand}}{\text{Auftrieb}} \right)$$

$$\text{Steiggeschwindigkeit} = \text{Steigwinkel} * \text{Fluggeschwindigkeit}$$



$V_x$ : Steilstes Steigen  
(lärmoptimal)

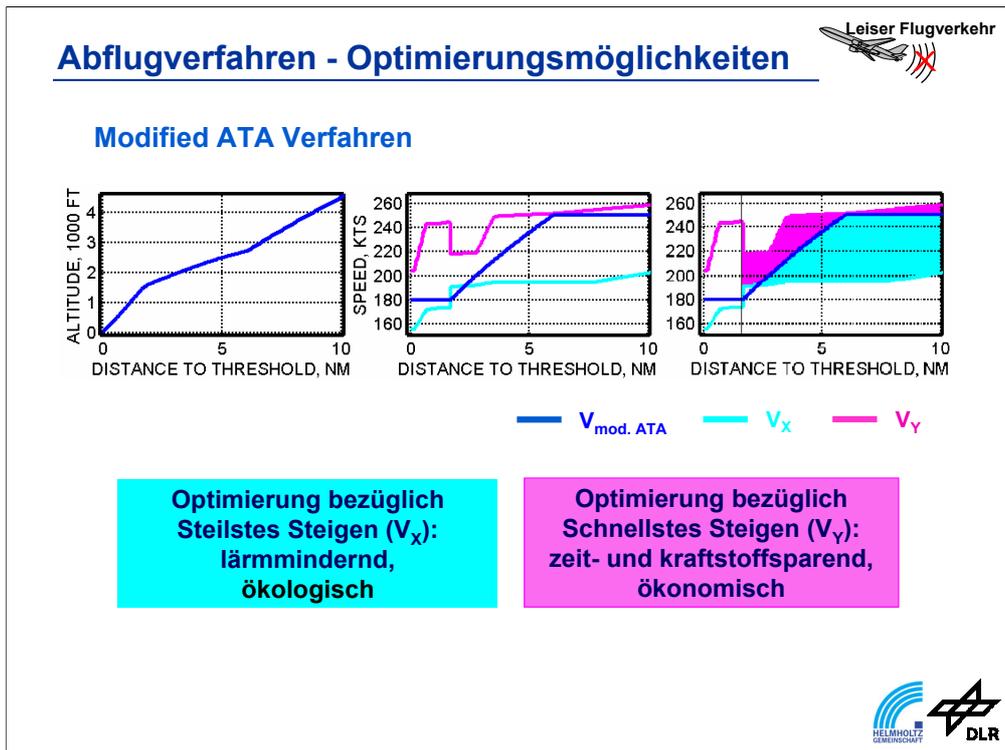
$V_y$ : Schnellstes Steigen  
(wirtschaftlich)



Beim Abflug stellt sich die grundsätzliche Frage, ob eine möglichst steile Bahn eingenommen oder möglichst schnell gestiegen werden soll.

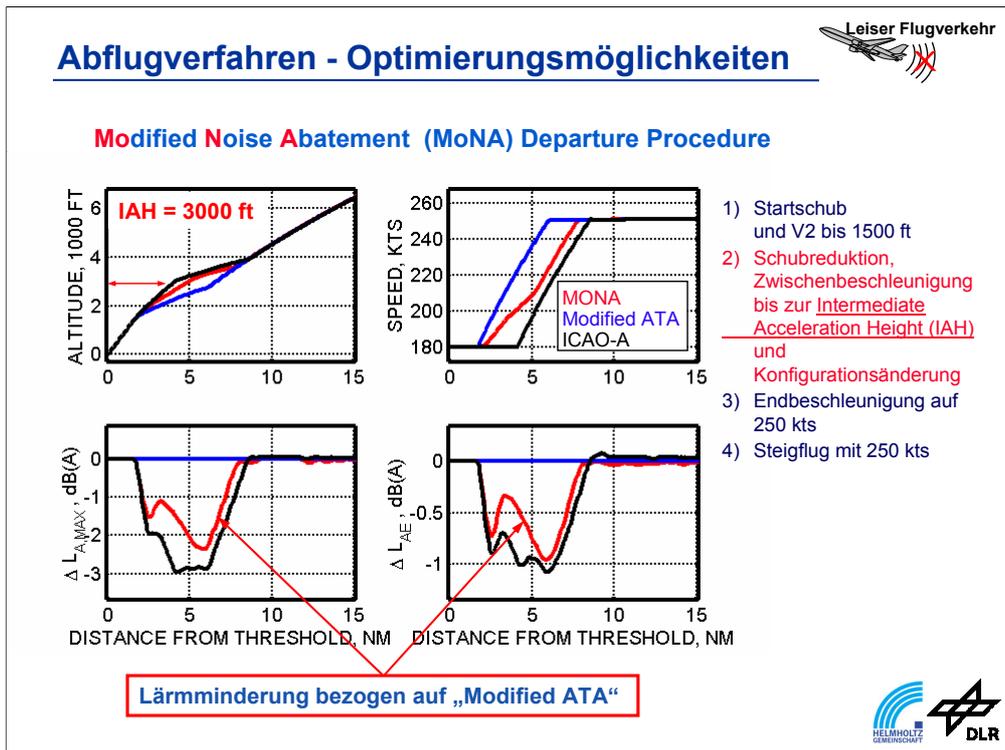
Der Steig- oder Bahnwinkel eines Flugzeugs ergibt sich näherungsweise aus dem Verhältnis von Schub zu Gewicht des Flugzeugs abzüglich Widerstand zu Auftrieb. Multipliziert mit der Fluggeschwindigkeit ergibt sich die Steiggeschwindigkeit.

Trägt man diese Steiggeschwindigkeit über der Fluggeschwindigkeit auf, dann erhält man die im Diagramm dargestellte Kurve, deren Gestalt sich aus den Charakteristiken von Schub und Widerstand ergibt. Es wird deutlich, dass die Kurve zwei ausgezeichnete Punkte enthält, nämlich einen Maximalpunkt, der grösstmögliche Steiggeschwindigkeit (also schnellstes Steigen) bedeutet und einen Tangentialpunkt, der grösstmöglichen Steig-winkel (also steilstes Steigen) bedeutet.



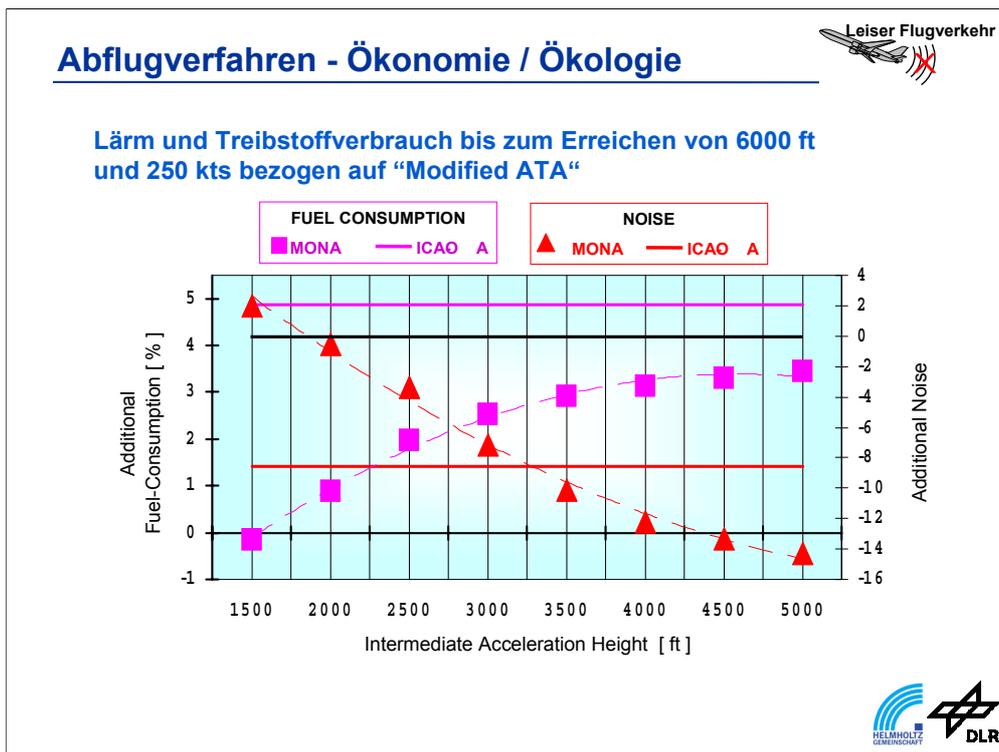
Die Diagramme zeigen Höhenprofil und Geschwindigkeitsprofil für MOD-ATA und die Potentiale hinsichtlich einer Optimierung in Richtung lärmmindernd bzw. zeit- / kraftstoffsparend auf. Während die Geschwindigkeit für steilstes Steigen ohne weiteres eingenommen werden kann (sie ist ja auch deutlich niedriger), muss das Flugzeug um zur Geschwindigkeit des schnellsten Steigen zu kommen erst einmal deutlich beschleunigen.

Die starken Änderungen in den Kurven der optimalen Geschwindigkeiten entstehen durch die Schubreduktion und das Einfahren der Landeklappen.



Ziel ist es, ein Abflugverfahren zu finden, das einen mit ICAO-A vergleichbaren Schallpegelverlauf hat und dabei nicht deutlich mehr Zeit- / Kraftstoffverbrauch aufweist wie MOD-ATA. Möglich wird dies durch das Einführen einer Zwischenbeschleunigungshöhe (Intermediate Acceleration Height, kurz IAH). Wie bei MOD-ATA wird bei der Modified Noise Abatement (MoNA) Departure Procedure in 1500 ft der Schub reduziert, dann jedoch nicht so stark beschleunigt und dadurch steiler gestiegen. Erst nach Erreichen der IAH wird wie bei MOD-ATA weiter beschleunigt.

Ein Vergleich der Differenzen von Maximal- und Dauerschallpegel zu MOD-ATA ergibt für eine Zwischenbeschleunigungshöhe von 3000 ft für MoNA und ICAO-A ähnliche Verläufe.



Das Diagramm zeigt für verschiedene Zwischenbeschleunigungshöhen den zusätzlichen Treibstoffverbrauch von MoNA (Magenta Quadrate) und ICAO-A (Magenta Linie) gegenüber MOD-ATA. Bei Zunahme der Zwischenbeschleunigungshöhe nimmt der zusätzliche Treibstoffverbrauch bei MoNa zu, erreicht aber nicht den Wert von ICAO-A.

Ebenfalls aufgetragen ist eine Masszahl für den Lärm. Diese nimmt wie zu erwarten mit zunehmender Zwischenbeschleunigungshöhe bei MoNA (Rote Rechtecke) ab. MoNA erreicht dabei bei ca. 3500 ft IAH den konstanten Wert von ICAO-A (Rote Linie).

MoNA hat bei IAH = 3500 ft gezeigt, dass gegenüber ICAO-A gleiches Lärmverhalten möglich ist, wobei die prozentuale Zunahme des Treibstoffverbrauchs nur 50% der von ICAO-A ausmacht! Für grössere Zwischenbeschleunigungshöhen erreicht man mit MoNa sogar weitere Lärmreduktionen, ohne dass der zusätzliche Treibstoffverbrauch den Wert von ICAO-A erreicht.

## Anflugverfahren - Stationärer Sinkflug



**Stationärer Sinkflug auf nicht vorgegebener Bahn  
(Bahn stellt sich ein):**

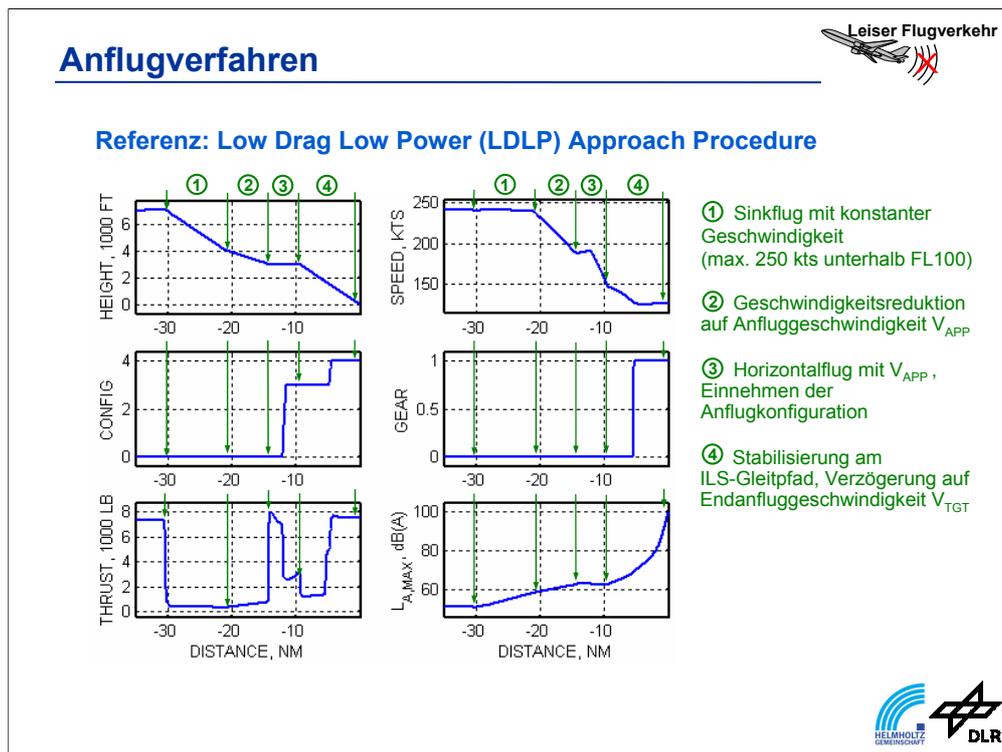
$$\text{Sinkwinkel} = \left( \frac{\text{Leerlaufschub}}{\text{Gewicht}} - \frac{\text{Widers tan } d}{\text{Auftrieb}} \right)$$

**Erforderlicher Schub für vorgegebene Bahn:**

$$\text{Erforderlicher Schub} = \text{Gewicht} * \left( \text{SollSinkwinkel} + \frac{\text{Widers tan } d}{\text{Auftrieb}} \right)$$



Beim Landeanflug ist zu unterscheiden, ob die Bahn sich einstellen soll (sog. Open Descent) oder eine Sollbahn vorliegt (Endanflug auf ILS-Gleitpfad). Entsprechend ergibt sich der Sinkwinkel aus dem Verhältnis von Leerlaufschub zu Gewicht abzüglich Widerstand zu Auftrieb oder ein erforderlicher Schub aus Gewicht multipliziert mit der Summe aus Sollsinkwinkel und dem Verhältnis von Widerstand zu Auftrieb.



Ein übliches Anflugverfahren ist das Low Drag Low Power Verfahren (LDLP), was von der Deutschen Lufthansa verwendet wird und auch den Namen Frankfurter Verfahren trägt.

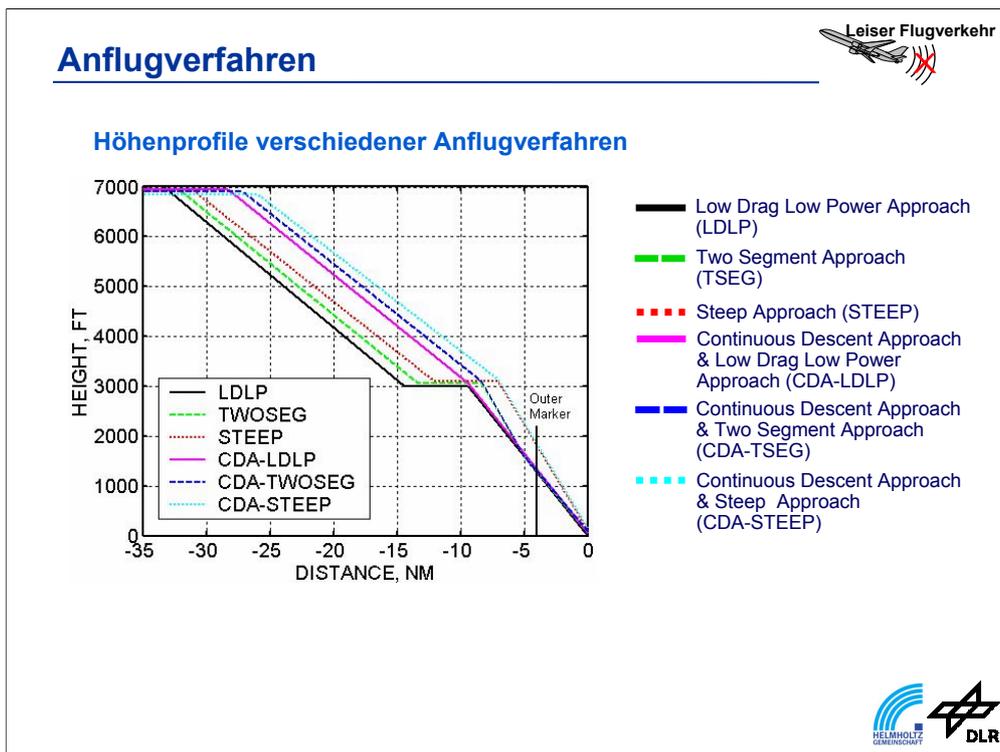
Es beinhaltet 4 Segmente.

Im 1. Segment wird ein Sinkflug mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt. Der Schub ist dabei im Leerlauf und es stellt sich ein maximaler Sinkwinkel ein.

Daran schliesst sich das 2. Segment an, in dem der Bahnwinkel angehoben und somit verzögert wird.

Beim Erreichen der Zwischenanflughöhe geht das Flugzeug in den Horizontalflug über. Dies macht bei Beibehalten der Geschwindigkeit eine Schuberrhöhung notwendig (3. Segment). Kurz vor dem Erreichen des Gleitpfads wird die erste und zweite Stufe der Landeklappen gesetzt und weiter verzögert.

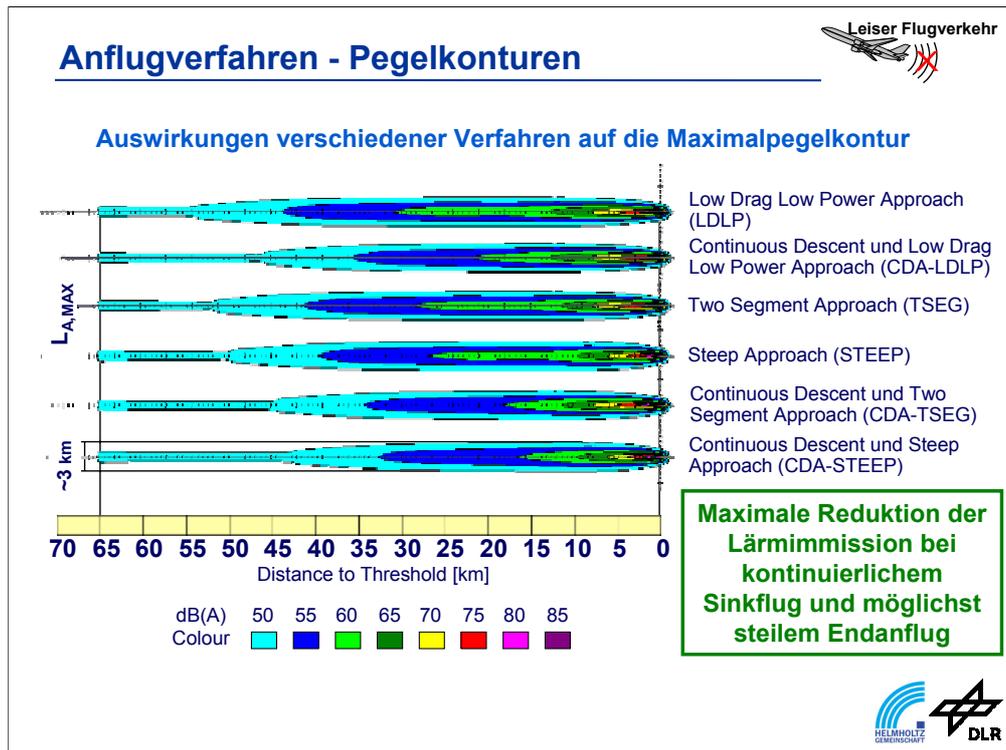
Mit dem Einfliegen in den Gleitpfad beginnt das 4. und letzte Segment. Da hier zuerst noch verzögert wird, bis Fahrwerk ausgefahren und Landekonfiguration eingenommen sind, kann der Schub im Leerlauf bleiben. Zum Stabilisieren auf dem Gleitpfad bei konstanter Geschwindigkeit wird nach Erreichen der Landekonfiguration der Schub erhöht.



Neben dem LDLP sind weitere Verfahren denkbar, die in der Graphik schematisch dargestellt sind.

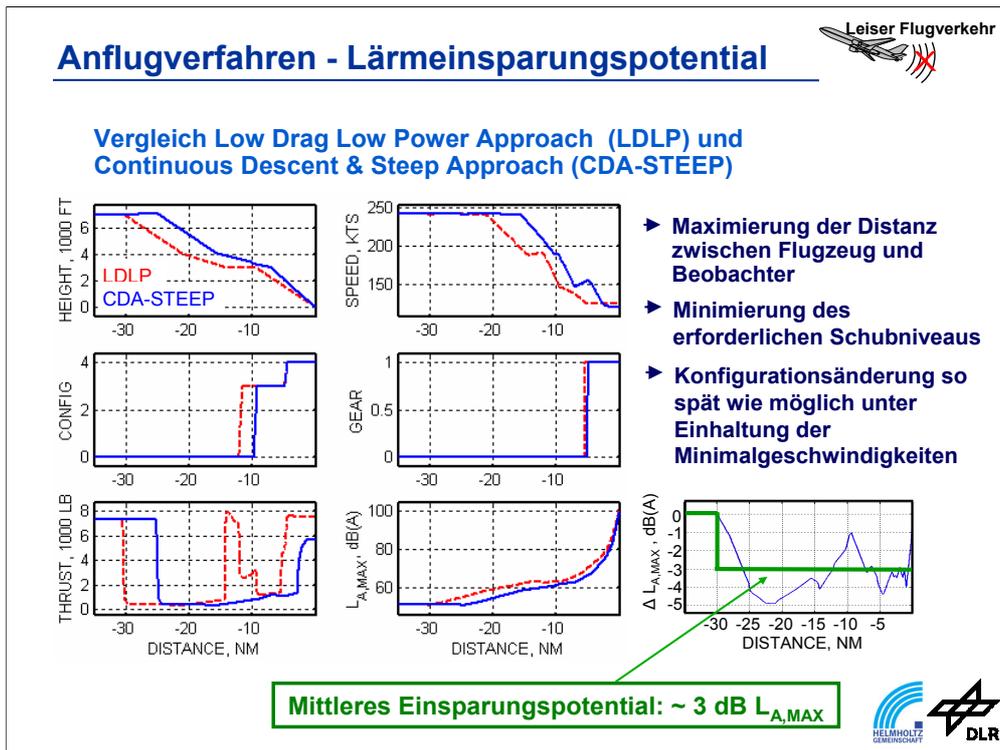
Unter Beibehaltung der Zwischenanflughöhe kann ein Two Segment Approach (TSEG) und ein Steep Approach (STEEP) durchgeführt werden.

Verzichtet man auf die Zwischenanflughöhe (keine Schuberrhöhung notwendig) wird von einem Continuous Descent Approach (CDA) gesprochen. Dieser ist kombinierbar mit einem Two Segment (CDA-TSEG) oder mit einem Steep (CDA-STEEP).



Die Graphik zeigt die Konturen des Maximalschallpegels für die verschiedenen vorgestellten Anflugverfahren. Besonders deutlich wird die Abnahme der 60 dB Kontur bei den CDA-Verfahren. Bei Two Segment und Steep ergibt sich eine Verringerung für die höheren Pegelwerte.

Ergebnis: Eine maximale Reduktion der Lärmimmission erhält man bei kontinuierlichem Sinkflug (CDA) und möglichst steilem Endanflug (STEEP).



Die Graphik zeigt das Lärmeinsparungspotential eines CDA-STEEP Verfahrens gegenüber dem Referenzverfahren LDLP.

Durch

- eine Maximierung der Distanz zwischen Flugzeug und Beobachter,
- eine Minimierung des erforderlichen Schubniveaus,
- und eine Änderung der Konfiguration so spät wie möglich unter Einhaltung der Minimalgeschwindigkeiten,

kann im Mittel über dem gesamten Anflugweg unterhalb der Flugbahn der Maximalschallpegel um 3 dB reduziert werden.

## Anflugverfahren - Fliegbarkeit



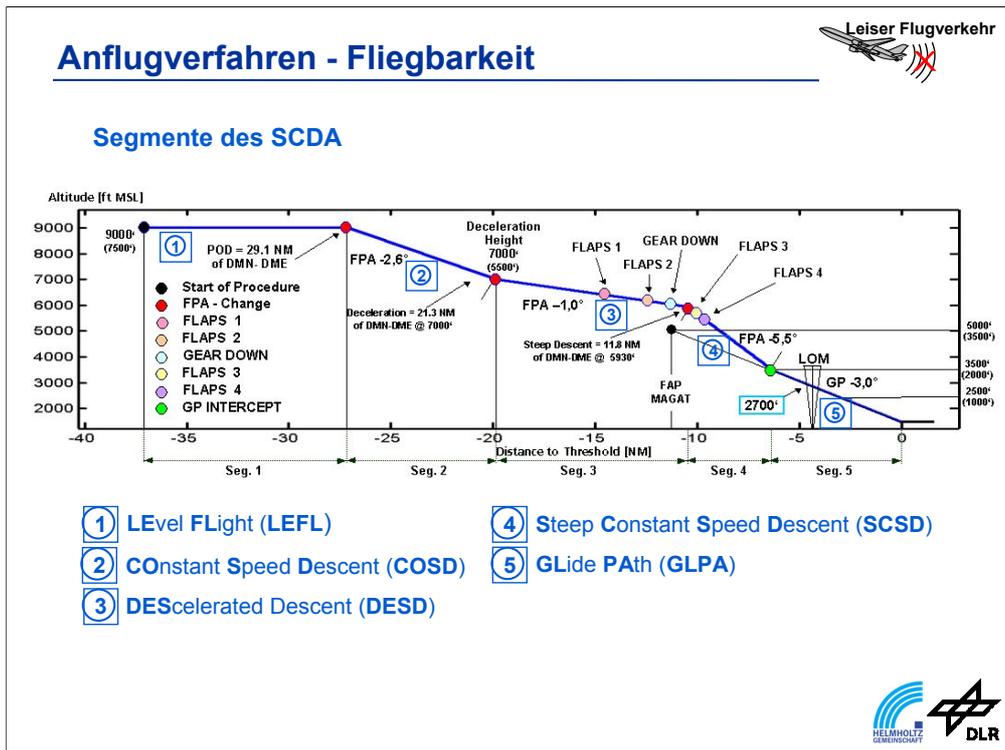
**Umsetzung des Continuous Descent & Steep Approach in eine fliegbare Prozedur unter Beachtung operationeller Randbedingungen**

- Vertikale Bahnführung mit konventioneller Ausrüstung ist nur unter Verwendung eines Instrumenten - Lande - Systems (ILS) möglich
- Geodätische Bahnführung eines Steilanfluges ist nicht möglich - nur Vorgabe eines Sollbahnwinkels -
- Durchführbar ist die Kombination eines Continuous Descent mit einem Two Segment Approach ohne Bahnführung im steilen Segment, jedoch mit Regelung eines Sollbahnwinkels
- Einfliegen des Gleitpfades von „oben“ kann mit modernen Flight Control Systemen durchgeführt werden
- **Segmented Continuous Descent Approach (SCDA)**



Ein CDA-STEEP ist aus verschiedenen Gründen z.Zt. nicht realisierbar. Zu diesen Gründen zählt u.a. eine fehlende geodätische Bahnführung im Endanflug und die Tatsache, dass bei einem Steilanflug bis an den Boden das Flugzeug an seinen Leistungsgrenzen operiert. Es sind also keine Reserven mehr vorhanden, um z.B. nach einer Störung, die das Flugzeug über die Bahn gebracht hat, diese wieder einzunehmen.

Ein Segmented Continuous Descent Approach (SCDA) stellt dagegen eine mögliche Alternative dar, die zwar im Endteil des Endanflug keine Lärmreduktion beinhaltet, aber fliegbar ist.



Die 5 Segmente eines SCDA ergeben sich wie folgt:

1. Seg.: Horizontalflug mit konstanter Fluggeschwindigkeit
2. Seg.: Sinkflug mit konstanter Fluggeschwindigkeit
3. Seg.: Verzögerung verbunden mit Einnehmen der Anflugkonfiguration, Fahrwerksfahren und Einnehmen der Landekonfiguration
4. Seg.: Steilanflugsegment mit Einfliegen des Gleitpfades von oben
5. Seg.: Nominaler Gleitpfad, Stabilisieren bis 1000 ft Höhe

Probleme liegen u. a. in der Bestimmung des Anfangspunktes des 2. Segmentes (Point of Descent) da ein über der Höhe veränderlicher Wind sich auf den Anfangspunkt des 5. Segmentes (Einfliegen des Gleitpfades von oben) auswirkt.

## Anflugverfahren - Fliegbarkeit



### Demonstration der Fliegbarkeit lärmreduzierter Anflugverfahren



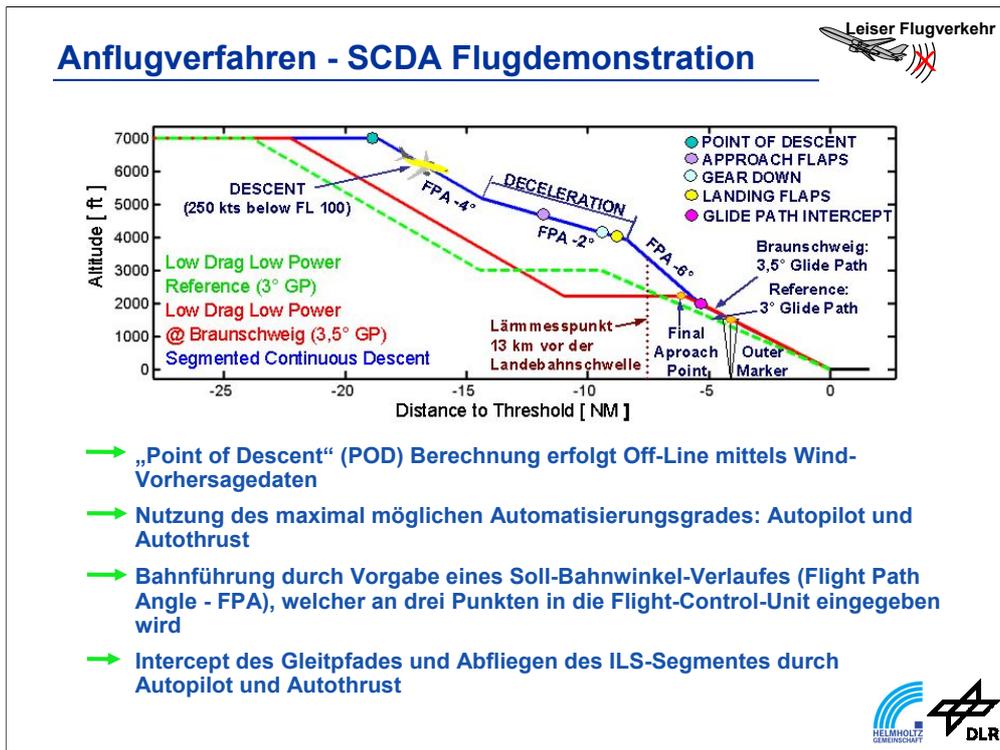
Festsitz-Simulator zur Auslegung  
und Vorerprobung von  
Flugexperimenten



Versuchsflugzeug DLR Braunschweig:  
VFW 614 umgebaut zum  
"Advanced Technologies Testing  
Aircraft System" (ATTAS)



Eine Demonstration der Fliegbarkeit eines SCDA wurde in zwei Versuchsflügen mit dem Versuchsflugzeug "ATTAS" der DLR in Braunschweig durchgeführt. Die Flugversuchsvorbereitungen und die Piloteneinweisung hat im Festsitz-Simulator von ATTAS stattgefunden.



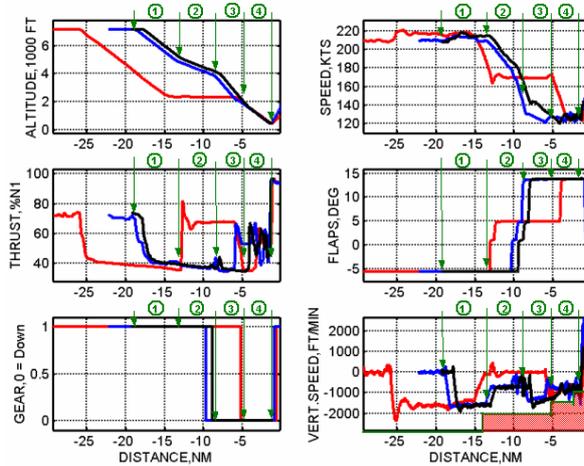
Der Anflug auf Braunschweig weist gewisse Besonderheiten auf. So liegt die Zwischenanflug-höhe bei 2000 ft, d.h. 1000 ft tiefer als im Normalfall, und der Gleitpfad ist mit 3,5° im Vergleich zu den üblichen 3° steiler (rote Kurve im Bild). Die grüne Kurve im Bild stellt das Höhenprofil des verwendeten LDLP Referenzfalles dar.

Das Steilflugsegment des SCDA konnte mit ATTAS mit -6° geflogen werden. Derartig steile Anflugbahnen sind mit heutigen modernen Verkehrsflugzeugen nicht erreichbar, da deren aerodynamische Güte wesentlich besser ist.

## Anflugverfahren - SCDA Flugdemonstration



### ATTAS Flugversuchsergebnisse



Low Drag Low Power  
 Segmented Continuous Descent (1)  
 Segmented Continuous Descent (2)

- ▶ Fliegbarkeit durch Verwendung vorhandener Autopilotenfunktionen (Flight Path Angle Modus) erfüllt
- ▶ Fliegen der Prozedur nur im „Selected Modus“, d.h. durch zeitgerechtes Eindrehen von Sollwerten möglich
- ▶ Maximal zulässige Sinkraten (laut SOP's) werden eingehalten
- ▶ Kompensation von äußeren Störungen, wie Wind, ist nur bedingt möglich
- ▶ Lärmpegelmessung 7 nm vor der Schwelle:  
 Deutliche Reduktion von Maximalschallpegel und Dauerschallpegel



Die grundsätzliche Fliegbarkeit eines SCDA konnte im Flugversuch mit ATTAS erfolgreich nachgewiesen werden.

Aufgrund der besonderen Verhältnisse am Flughafen Braunschweig (2000 ft Zwischenanflughöhe für den Referenzfall), der Möglichkeit mit ATTAS  $-6^\circ$  Bahnwinkel zu erfiegen und der Wahl des Lärmmesspunktes, hat sich eine weitaus deutlichere Lärminderung als die bisher angesprochenen  $-3$  dB ergeben.

## Anflugverfahren - Flugführungskonzepte



Konzepte zur Integration lärmindernder Anflugverfahren  
in moderne ATM Systeme

**Ziel:** Reduktion der Fluglärmbelastung im Anflugbereich von  
Verkehrsflughäfen ohne Einschränkungen der Sicherheit  
und der Kapazität

**Konzepte:**

- Berücksichtigung lärmindernder Anflugverfahren bei der  
Planung des Anflugverkehrs
- Führungsunterstützung zur Einhaltung der geplanten  
Trajektorien



## Anflugverfahren - Flugführungskonzepte



Konzepte zur Integration lärmindernder Anflugverfahren  
in moderne ATM Systeme

### Planung des Anflugverkehrs:

- Bestimmung der zu erwartenden Ankunftszeiten auf der Basis von vorausberechneten Trajektorien für Standardanflugrouten und lärmarme Anflugverfahren
- Reihenfolgeplanung zur bestmöglichen Ausnutzung der Landebahnkapazität unter Berücksichtigung der einzuhaltenden Wirbelschleppenstaffelung
- Konfliktfreie Planung der Anflugtrajektorien zur Einhaltung der Zielankunftszeiten auf der Basis lärmgünstiger Anflugrouten und lärmarmen Anflugverfahren



## Anflugverfahren - Flugführungskonzepte



Konzepte zur Integration lärmindernder Anflugverfahren  
in moderne ATM Systeme

### Führungsunterstützung:

- Pilotenunterstützung zur 3D-/4D-Navigation entsprechend  
vorausberechneter Trajektorien
  - Flight Director Funktionen
  - Autopilot Funktionen
  - Flight Management System (FMS) Funktionen
  
- Lotsenunterstützung zur 3D-/4D- Führung des Anflugverkehrs  
entsprechend konfliktfrei geplanter Trajektorien
  - Überwachung der Einhaltung der geplanten Trajektorien
  - Generierung von Führungsanweisungen bei Abweichungen  
von der geplanten Trajektorie
  - Durchführung von Neuplanungen



## Anflugverfahren - Zusammenfassung



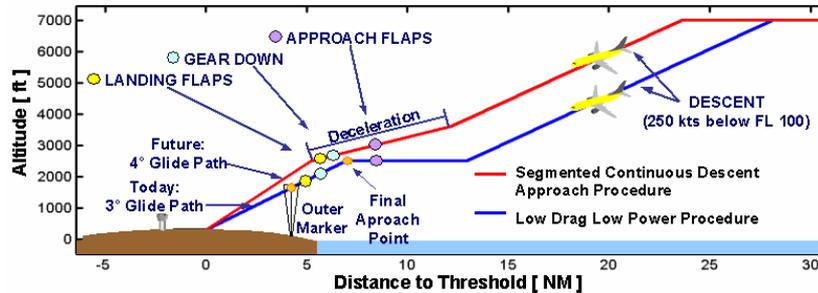
- Lärminderungspotential veränderter An- und Abflugverfahren nachgewiesen
- Ökologische und ökonomische Randbedingungen, wie z.B. Treibstoffverbrauch und Zeitbedarf beachtet
- Fliegbarkeit der Verfahren mit heutigem Ausrüstungsstand nachgewiesen
- Genauere und sicherere Bahnführung nur durch verbesserte bord- und bodenseitige Ausrüstung möglich
- Weiterentwicklung von Flight Management Systemen und Autopilotenfunktionen notwendig, d.h.:
  - Bordseitige Berechnung und automatisiertes Abfliegen der lärmimmissions-optimalen Trajektorien
  - Weitergabe der modifizierten An- und Abflugdaten an moderne Lotsen - Unterstützung - Tools zur konfliktfreien Reihenfolgenplanung



## Anflugverfahren - Ausblick



### Vertikale Bahnführung



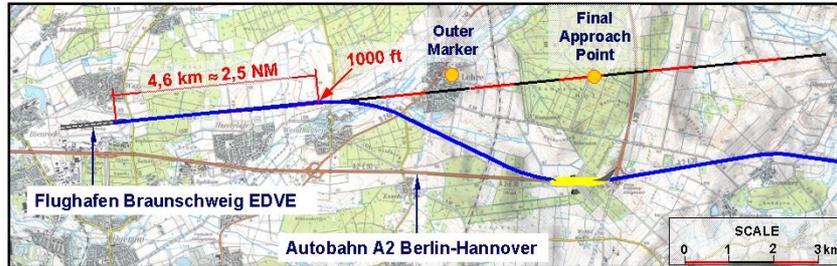
- ➔ Abschätzung des vertikalen Windprofils aufgrund von Boden-, INS/GPS-Messdaten und verbesserten Windmodellen
- ➔ Bordseitige Vorausberechnung der lärmimmisions optimalen Trajektorie und der Ankunftszeit
- ➔ Übergabe der berechneten Bahndaten und Zeiten an ATM/ATC mittels Datalink
- ➔ Permanente Aktualisierung der Vorausberechnung und Durchführung notwendiger Korrekturen
- ➔ Durchführung der Konfigurationsänderungen durch das Flight Management System



## Anflugverfahren - Ausblick



### Laterale Bahnführung



- Festlegung lärmimmisions-optimaler Trajektorien mittels RNAV-Wegpunkten durch Bündelung mit Hauptverkehrswegen, wie z.B. Autobahnen und/oder Bahntrassen im Anflugbereich eines Flughafens
- Speicherung der RNAV-Noise Abatement Procedure in die FMS-Database
- Vollautomatisches Abfliegen des Verfahrens mittels eines verbesserten Flight Guidance and Enveloppe System (FGES)

