

6. Lärmarme Flugverfahren

Hauptarbeitspaket 3: *Dr. Reinhard König, E-Mail: reinhard.koenig@dlr.de
DLR-Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig*

*Raimar Stump, E-Mail: raimar.stump@dlr.de
DLR-Institut für Flugführung, Braunschweig*

6.1. Forschungsziel

Im Rahmen des Hauptarbeitspakets 3 sollten die folgenden Ziele erreicht werden:

- Definition verbesserter Flugverfahren unter Berücksichtigung der Einflüsse auf Sicherheit, Arbeitsbelastung der Piloten, Passagierkomfort und Treibstoffverbrauch.
- Bewertung der verbesserten Verfahren hinsichtlich ihres Lärminderungspotentials gegenüber den Referenzverfahren (Einsatz von Rechnersimulationen und Flugversuchen zur Klärung flugbetrieblicher Probleme). Optimierung für den Nachtflugbetrieb.
- Erstellung von Konzepten zur Integration verbesserter Verfahren in moderne Air Traffic Management Systeme.

Insbesondere beim Anflug sollte im erweiterten Flughafenbereich durch verbesserte Verfahren eine Minderung der Lärmbelastung um 3 dB erreicht werden. Beim Abflug wurden Möglichkeiten zu einer lokalen Optimierung der Lärmbelastung durch geeignete Streckenführung und Navigation untersucht.

Formelzeichen

C_A	Auftriebsbeiwert
C_W	Widerstandsbeiwert
F_{max}	Maximalschub
F_{req}	Erforderlicher Schub
F_{idle}	Leerlaufschub
G	Gewichtskraft
g	Erdbeschleunigung
\dot{H}	Steigrate
V	Fluggeschwindigkeit
\dot{V}	Zeitliche Änderung der Fluggeschwindigkeit
V_X	Geschwindigkeit des steilsten Steigfluges
V_Y	Geschwindigkeit der maximalen Steigrate
W	Widerstand

Abkürzungen

AGL	Above Ground Level
ATA	Air Transport Association
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CDA	Continuous Descent Approach
DLH	Deutsche Lufthansa AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	Direct Operating Costs
FAA	Federal Aviation Administration
FMS	Flight Management System
ft	Fuß (= 0,3048 m)
IAH	Intermediate Acceleration Height
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrument Landing System
INM	Integrated Noise Model
kts	Knoten (= 0,5144 ms ⁻¹)
LAMAX	(A) bewerteter Maximalschallpegel
LDLP	Low Drag Low Power Approach
MONA	Modern Noise Abatement Procedure
nm	Nautische Meile (= 1852 m)
PANS-OPS	Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations
SEL	Sound Exposure Level
SOP	Standard Operating Procedures
SOURDINE	Study of optimisation procedures for decreasing the impact of noise around airports

6.2. Lärmoptimierte Abflugverfahren

6.2.1. Randbedingungen

Der Wunsch nach rascher Entwicklung von verbesserten, lärmgünstigeren Abflugverfahren resultiert aus den hohen Anforderungen für die Zulassung von Hard- und Softwarekomponenten für Luftfahrtanwendungen. Dies gilt sowohl bord- als auch bodenseitig. Hinzu kommen Dienstzeiten von heutigen Verkehrsflugzeugen mit bis zu 30 Jahren und mehr, so dass Verbesserungen erst in Jahrzehnten wirksam werden.

Diese Randbedingung erfordert Flugverfahren, welche mit dem heutigen Ausrüstungsstand auskommen. Derartige Verfahren können als wirklich kurzfristige Alternativen zu den aktuellen Verfahren angesehen werden und innerhalb relativ kurzer Zeit (Größenordnung 5 Jahre ab heute) eingesetzt werden.

Hinzu kommen weitere Anforderungen, welche im folgenden kurz erläutert werden:

6.2.1.1. Sicherheit

Im Gegensatz zur Landung werden beim Start die Triebwerke bis an ihr Maximum belastet. Lang andauernde Flugphasen unter voller Schubbelastung beanspruchen die einzelnen Komponenten der Triebwerke erheblich, reduzieren deren Lebensdauer und, besonders sicherheitsrelevant, erhöhen das Risiko eines Triebwerksausfalls im Fluge. Abflugverfahren mit reduziertem Startschub und/oder baldiger Schubreduktion auf Steigflugtriebwerksleistung sollten daher verstärkt untersucht werden.

Start und Steigflug sind Flugphasen, in welchen 24% aller Unfälle (Takeoff 11%, Initial Climb 5%, Climb with Flaps Up 8%) von kommerziellen Strahlverkehrsflugzeugen vorkommen. [6-1]. Ebenfalls werden 67% aller Totalverluste auf die Cockpitbesetzung als primäre Fehlerquelle zurückgeführt. Neuartige Verfahren dürfen aus diesem Grund keinesfalls die Arbeitsbelastung während dieser Flugphase derart erhöhen, dass die Piloten bis an ihre Leistungsgrenzen beansprucht werden.

Airline Standard Operating Procedures (SOP's) wurden entwickelt, um eine Reduzierung der Arbeitsbelastung (Crew Coordination Concept), Standardisierung der Arbeitsabläufe und Verbesserung der Kommunikation im Cockpit (Crew Resource Management) zu gewährleisten. Die Berücksichtigung dieser sicherheitskritischen Faktoren sollte auch durch zukünftige Verfahren sichergestellt werden.

6.2.1.2. Flugsicherung

Um die angespannte Verkehrssituation an Großflughäfen wie z.B. Frankfurt oder München nicht weiter zu belasten, ist es besonders für den Flugbetrieb am Tage wichtig, dass neuartige Verfahren den Verkehrsfluss fördern und keine weiteren Engpässe generieren, um die mögliche Anzahl an Flugbewegungen pro Stunde nicht weiter einzuschränken.

Verfahren mit hohem zeitlichem Bedarf, bedingt durch verringerte Fluggeschwindigkeiten sollten daher a priori nur für eventuellen Nachtflugbetrieb untersucht und optimiert werden. Der Tagflugbetrieb erfordert einen gangbaren Kompromiss zwischen Lärmeinsparung und Erhaltung der Verkehrskapazitäten.

6.2.1.3. Ökonomische Durchführbarkeit

Bei der Auslegung moderner lärmindernder Abflugverfahren sollten einige Randbedingungen berücksichtigt werden, um eine wirtschaftliche Durchführung des Fluges seitens der Fluggesellschaften zu ermöglichen und keinen weiteren Kostendruck auf die Airlines auszuüben.

Die Kosten für Treibstoff bei großen Fluggesellschaften betragen erfahrungsgemäß je nach Rohölpreis zwischen 18 und 26% der direkten Betriebskosten (Direct Operating Costs DOC's) oder bezogen auf den jährlichen Umsatzerlös z.B. bei Lufthansa im Jahr 2001 ca. 9,7% [6-2]. Eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs während der Startphase wäre sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Sicht wünschenswert, um die Schadstoff-Emissionsbilanz weiter zu verbessern.

Neben den bereits erwähnten sicherheitskritischen Aspekten, ist die Nutzung von Triebwerken bei reduziertem Startschub bzw. kurzen Flugphasen unter Vollschub auch wirtschaftlich sinnvoll, da dies die Lebensdauer der Triebwerke deutlich erhöht und längere Wartungsintervalle ermöglicht.

Im Kurzstreckenflugbetrieb sind bis zu acht Flugabschnitte pro Crew und Einsatztag durchaus üblich. Abflugverfahren mit erhöhtem zeitlichen Mehrbedarf können sich durch die gesetzlichen Regelungen über maximal mögliche Flugdienstzeiten an dieser Stelle auf kumulativer Basis negativ auf die erzielbare Anzahl von Flugabschnitten pro Creweinsatz auswirken.

6.2.1.4. Gesetzliche Randbedingungen

In den kürzlich erweiterten ICAO PANS-OPS [6-3] werden die gesetzlichen Randbedingungen bezüglich der Auslegung und Durchführung von lärmarmen Abflugverfahren detailliert beschrieben. Gegenüber früheren Vorschriften, welche zwei genau definierte Abflugverfahren vorsahen, ermöglichen die neuen Richtlinien ein flexibleres Design und werden lediglich durch folgende Forderungen auf Grund von Sicherheitsbedenken eingeschränkt:

- Die minimal mögliche Flughöhe für Schubreduktionen von Start- auf Steigflugschub ist 800 ft über Grund
- Das Schubniveau nach erfolgter Reduktion darf nicht geringer sein, als jenes Niveau, welches notwendig ist, um die in den Zulassungsbestimmungen geforderte minimale Steigrate bei Ausfall eines Triebwerks zu erreichen.
- Von den Fluggesellschaften wird erwartet, sich auf ein den Richtlinien entsprechendes Abflugverfahren festzulegen und nur dieses lärmarme Verfahren neben ihrem Standardverfahren im Flugbetrieb einzusetzen.

6.2.2. Grundlagen

Vor der Optimierung von Abflugverfahren sollte eine Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die zu erwartenden Flugleistungen erfolgen. Die erzielbaren Steigleistungen eines Flugzeuges können durch den Steigwinkel und die Steigrate (Steiggeschwindigkeit) wiedergegeben werden [6-4].

$$\sin(\gamma) = \frac{F_{\max} - W}{G} - \frac{\dot{V}}{g} \quad (6-1)$$

$$\dot{H} = V \sin(\gamma) \quad (6-2)$$

Beide Parameter sind von mehreren Größen wie z.B. Fluggeschwindigkeit, Beschleunigung, Flughöhe, Gewicht, Konfiguration, Schub, Wind und Temperatur abhängig.

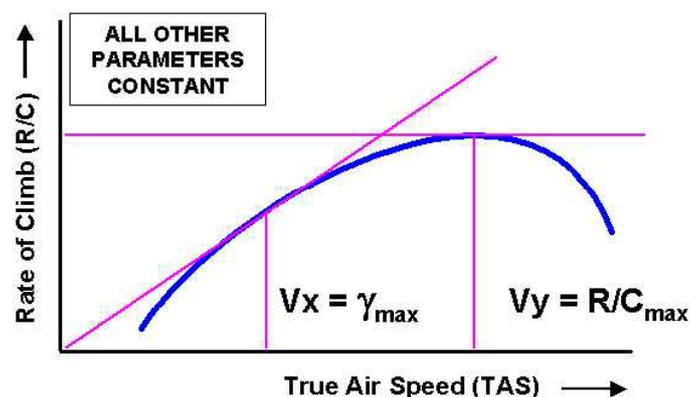


Abbildung 6-1: Steigrate über Geschwindigkeit

Aus Abbildung 6-1 folgt die Abhängigkeit von Steigrate und Fluggeschwindigkeit. Zwei charakteristische Geschwindigkeiten sind gekennzeichnet:

- Geschwindigkeit des maximalen Steigwinkels V_X
- Geschwindigkeit der maximalen Steigrate V_Y

Während V_Y als Geschwindigkeit des schnellsten Steigens zeit- und treibstoffsparend ist und die Kapazitäten an Flugbewegungen pro Stunde erhöht, kann V_X als steilstes Steigen beson-

ders lärmgünstig eingestuft werden, da bei dieser Geschwindigkeit die Distanz zum Beobachter am Boden maximiert und damit die Schallimmission abnimmt.

6.2.3. Optimierungsansatz

Während Start und Steigflug ändern sich beide Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der eingangs beschriebenen Faktoren.

Abbildung 6-2 zeigt den simulierten Höhen- und Geschwindigkeitsverlauf bei Durchführung zweier üblicher Abflugverfahren: der „modified ATA-Procedure“ und der „ICAO-A-Procedure“ (auch als IATA-Procedure bekannt).

Zusätzlich wurde in beiden Simulationen für den jeweiligen Flugzustand V_x und V_y berechnet, um den Verlauf beider Geschwindigkeiten bzw. die Abweichung der tatsächlichen Flugeschwindigkeit von V_x bzw. V_y darzustellen. Aus den Zeitverläufen ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit nicht den sprunghaftigen, wenn auch optimalen, Verläufen von V_x und V_y folgen kann.

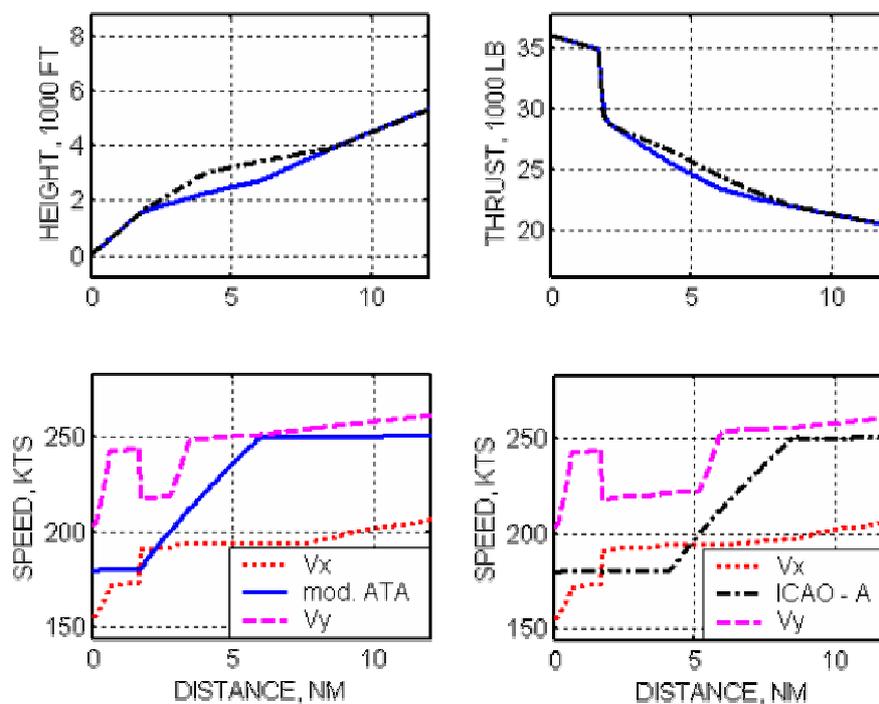


Abbildung 6-2: Analyse von Abflugverfahren bezüglich V_x bzw. V_y

Unter Beachtung der in Kap. 6.2.1 beschriebenen Randbedingungen sollte ein Kompromiss gefunden werden, welcher sowohl Lärmreduzierung und dementsprechende Optimierung nach V_x als auch ökonomische Durchführbarkeit unter Einhaltung der sicherheitskritischen und gesetzlichen Randbedingungen gewährleistet, ohne dabei die Pilotenbelastung stark zu erhöhen.

Bezüglich der Pilotenbelastung ist anzumerken, dass eine Erhöhungen durch Auslegung der Verfahren in Anlehnung an die Standard-Betriebsverfahren der Deutschen Lufthansa (DLH) zu vermeiden versucht wird. Für endgültige Aussagen zu diesem Punkt wären jedoch Simulatorstudien unter der Beteiligung von Linienpiloten notwendig.

6.2.4. Ergebnis

Sowohl die Lärmberechnungen mit dem Integrated Noise Model INM (FAA-Entwicklung) als auch mit SIMUL (DLR-Entwicklung) zeigen die erwartete Dominanz des Triebwerksgeräusches gegenüber dem Umströmungsgeräusch der Flugzeugzelle, was sich beim Landeanflug durchaus umkehren kann. Durch den vernachlässigbaren Anteil des Umströmungsgeräusches ergeben sich zwei Einflussgrößen zur Reduktion der Lärmimmission von Abflugverfahren:

- Reduktion des Schubniveaus
- Maximierung der Distanz zwischen Quelle und Beobachter

Simulationen für Startverfahren mit reduziertem Startschub zeigten nur in unmittelbarer Nähe (kann in den meisten Fällen als Position noch auf dem Flugplatz angenommen werden) zum Abhebepunkt Lärmreduktionen, während, auf Grund der verringerten Steigleistung, die verbleibende Abflugstrecke deutlich höhere Lärmimmissionen aufwies. Die Berechnungen mit reduziertem Startschub sollen jedoch nicht den aus der Praxis bekannten „Flex-Takeoff-Thrust“-Anwendungen verwechselt werden. Diese Startschubreduktion wird angewendet, wenn ein geringeres als das maximal zulässige Startgewicht vorliegt. Durch die Reduktion werden in diesem Fall die Flugleistungsdaten soweit eingeschränkt, bis analoges Verhalten zum Flugbetrieb mit maximaler Abflugmasse und Vollschub vorliegt. Daraus resultieren bei gleicher Distanz zum Beobachter verringerter Triebwerkslärm und verringerte Schadstoffemissionen

Lange Steigphasen mit konstanter Geschwindigkeit in Umgebung von V_x und spätes Beschleunigen bergen großes Lärminderungspotential, welches durch verlängerte Flugzeiten und erhöhten Treibstoffverbrauch erkauft wird.

Um den kapazitätsbezogenen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu entsprechen, sollte die Beschleunigungsphase von der anfänglichen Steiggeschwindigkeit (üblicherweise $\sim V_2+10$ kts) in Umgebung von V_x zur Reisesteigfluggeschwindigkeit ($\sim V_Y$) möglichst rasch erfolgen. Aufgrund von gesetzlichen Regelungen sind Geschwindigkeiten größer als 250 kts im unteren Luftraum bis Flugfläche 100 (~ 3000 m) verboten.

Durch die zusätzliche Bedingung ein möglichst rasch, mit heutigen Mitteln, einsetzbares Verfahren zu bekommen, sollte der Abflug sowohl automatisch als auch manuell durchführbar sein. Daher erfolgte die Vorgabe der Beschleunigungswerte, nach Abschluss der Anfangssteigphase mit konstanter Geschwindigkeit, indirekt über verringerte Steigraten, bis zum Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit von 250 kts.

Als neue Variante („**MO**dern **NO**ise **AB**atement **D**eparture **P**rocedure“ **MONA-Departure**) zu bestehenden Verfahren wurde eine „Zwischenbeschleunigungsphase“ eingeführt, welche direkt an die erste Flugphase mit gleich bleibender Geschwindigkeit anschließt und mit mäßig reduzierter Steigrate durchgeführt wird, um eine geringe Beschleunigung zu erzielen.

Nach Erreichen der Zwischenbeschleunigungshöhe (Intermediate Acceleration Height, IAH) wird die Steigrate weiter reduziert, um höhere Beschleunigungswerte zu erreichen.

Abbildungen 6-3 und 6-4 zeigen die Auswirkungen einer Anhebung der Zwischenbeschleunigungshöhe von 3000 ft auf 5000 ft über Grund. Dargestellt sind Höhen- und Geschwindigkeitsverläufe, als auch die Differenzen der Maximalschallpegel (LAMAX) bzw. Dauerschallpegel (Sound Exposure Level SEL) bezogen auf das Referenzverfahren „modified ATA“.

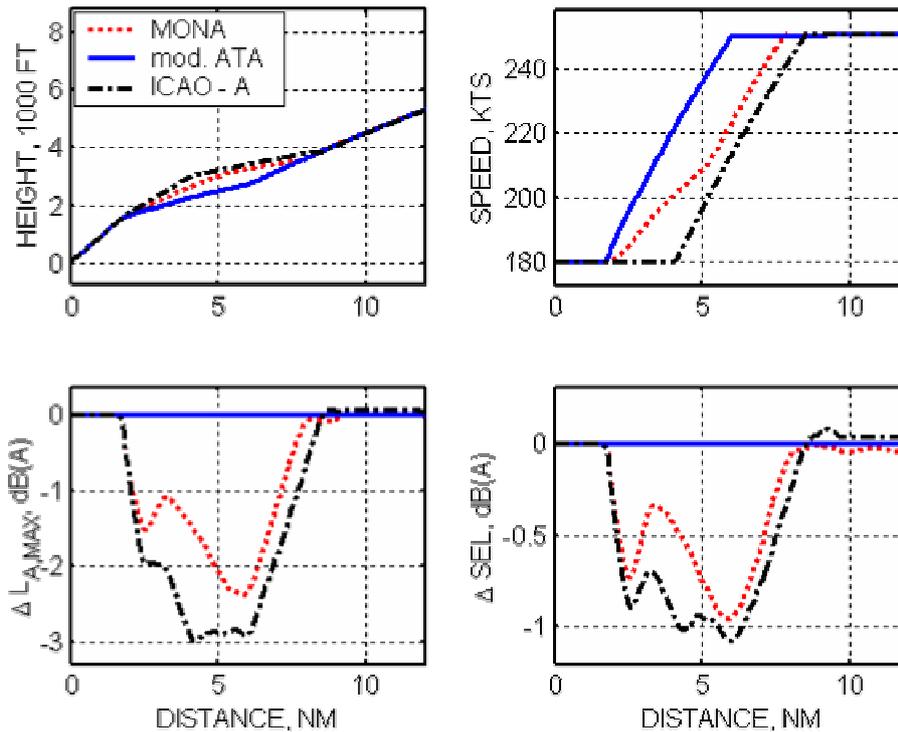


Abbildung 6-3: Vergleich des „MONA-Verfahrens“ (Zwischenbeschleunigungshöhe 3000 ft) mit der „mod. ATA-Procedure“ und „ICAO-A-Procedure“

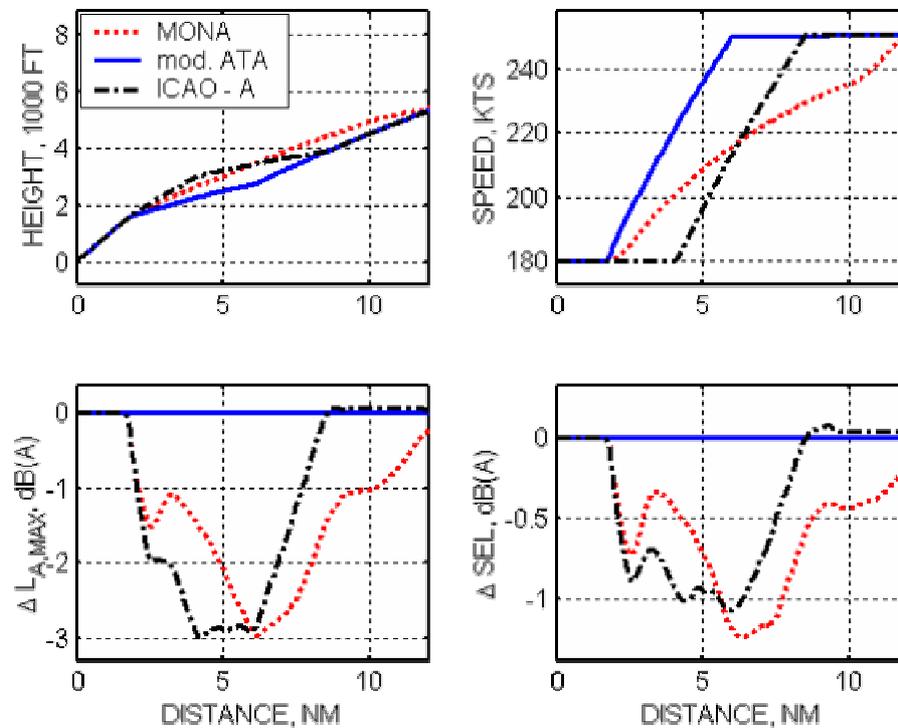


Abbildung 6-4: Vergleich des „MONA-Verfahrens“ (Zwischenbeschleunigungshöhe 5000 ft) mit der „mod. ATA-Procedure“ und „ICAO-A-Procedure“

Die Einführung dieser Zwischenbeschleunigungsphase bringt folgende Vorteile mit sich:

- In einem Bereich von 4 bis 15 km (entsprechen 2 bis 8 nm) nach dem Startpunkt ist die Distanz zwischen Beobachter und Schallquelle höher als bei bisherigen Verfahren wie z.B. dem mod. ATA-Procedure und somit eine geringere Lärmimmission am Boden vorhanden.
- Frühere Beschleunigungsphasen als bei aktuellen lärmgünstigen Verfahren wie z.B. dem ICAO-A-Procedure reduzieren sowohl Treibstoff- als auch zeitlichen Bedarf des Verfahrens.
- Nennenswerte Erhöhungen der Pilotenbelastung finden nicht statt, da lediglich eine weitere Höhe beachtet werden muss, bei welcher die Zwischenbeschleunigungsphase abschließt und die Endbeschleunigung durchgeführt wird. Das Verfahren ist sowohl manuell als auch halbautomatisch über das zeitgerechte Wählen von Steigraten fliegbar.
- Durch flughafenspezifische Wahl der Zwischenbeschleunigungshöhe (je nach lokaler Bevölkerungsverteilung, z.B. in direkter Umgebung zum Flughafen oder in weiterer Entfernung) sind Anpassungen der Lärmimmissionen möglich.
- Weitere Lärmreduktionen sind durch zusätzliche Anhebung der Höhe der Schubreduktion von Start- auf Reisesteigflugschub, bei ähnlichem Treibstoff- und Zeitbedarf möglich.

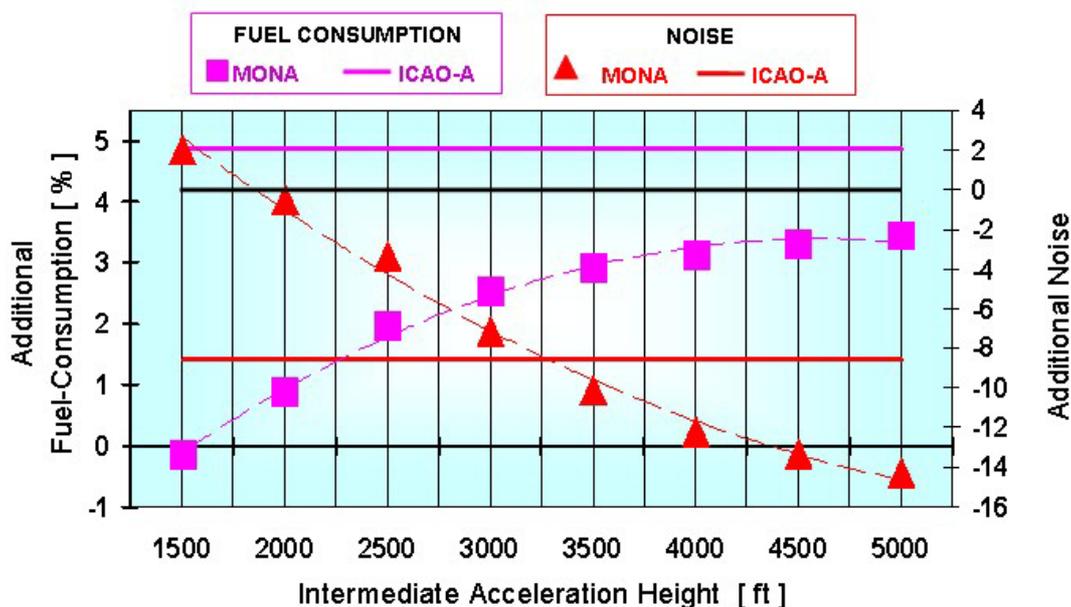


Abbildung 6-5: Lärm und Treibstoffverbrauch bis zum Erreichen von 6000 ft und 250 kts bezogen auf "Modified ATA".

Das Abbildung 6-5 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. Bei ca. 3500 ft IAH wird der konstante Wert von ICAO-A (Rote Linie) erreicht. Es ist also gegenüber ICAO-A gleiches Lärmverhalten möglich, 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.

Als weitere kurzfristig einsetzbare Variante zur Reduktion der Lärmimmission bei Abflugverfahren wird in SOURDINE [6-5] nach anfänglicher Reduktion auf den minimal notwendigen Schub zur Einhaltung der gesetzlich geforderten Mindeststeigraten eine sukzessive Erhöhung des Schubes in 5 Stufen auf maximal zulässigen Steigflugschub vorgeschlagen. Da heutige im Einsatz befindliche Vortriebsregler (Autothrottle) für eine Schuberhöhung auf dieser Basis nicht ausgelegt sind und keine Möglichkeit zur Programmierung dieser Werte in das Flight Management System (FMS) vor dem Start vorgesehen ist, müssen diese Schuberhöhungen von Hand durch die Piloten durchgeführt werden. Im Hinblick auf die Pilotenbelastung in dieser kritischen Flugphase mit allgemein hoher Arbeitsbelastung werden ähnliche Verfahren zur Anpassungen des Schubniveaus in der vorliegenden Untersuchung bewußt nicht vorgeschlagen, um die kurzfristige Einsetzbarkeit und Akzeptanz der Verfahren bezüglich Sicherheitsbedenken seitens der Fluggesellschaften und des Cockpitpersonals nicht zu gefährden.

Ebenfalls wird aus den Erkenntnissen von SOURDINE deutlich, dass es kein allgemein gültiges Verfahren gibt, mit welchem sowohl zweistrahlige Verkehrsflugzeuge mittlerer Größe (z.B. A320) als auch vierstrahlige Großraumflugzeuge (z.B. A340) einen lärmoptimierten Abflug durchführen können. Für Langstreckenflugzeuge werden zwei verschiedene Verfahren vorgestellt, geeignet zur Lärmreduktion jeweils für Gebiete in direkter Umgebung zum Flughafen bzw. in weiterer Entfernung. Als direkte Folge dieser Untersuchungen ergibt sich ein Konflikt mit den Richtlinien ICAO-PANS-OPS, welche fordern, dass Fluggesellschaften möglichst ein einziges optimiertes Verfahren definieren und im täglichen Flugbetrieb anwenden sollten.

6.3. Lärmoptimierte Anflugverfahren

6.3.1. Randbedingungen

Insbesondere kurzfristig einsetzbare, lärmreduzierte Alternativen zu den herkömmlichen Anflugverfahren dürfen, wie auch die entsprechenden Abflugverfahren, keine Erweiterung des heutigen Ausrüstungszustandes im Flugzeug und am Boden erfordern. Die vollständige Nutzung des Leistungsumfanges von Flight Management System und Autopilot wird jedoch zwingend notwendig.

6.3.1.1. Sicherheit

Der Landeanflug zeichnet sich dadurch aus, dass unter Einhaltung eines sicheren Flugzustandes die Schwelle der Landebahn mit einer vorgegebenen Fluggeschwindigkeit erreicht werden muss. Ausgehend vom Reiseflug bedeutet das, dass sowohl potentielle, als auch kinetische Energie abgebaut werden müssen.

Die Flugphasen Anflug und Landung beinhalten 59% aller Unfälle von kommerziellen Strahlverkehrsflugzeugen (Initial Approach 5%, Final 7%, Landing 47%) [6-1]. Die Arbeitsbelastung der Cockpitbesatzung ist während der Annäherung an den Boden und beim anschließenden Aufsetzen und Abbremsen sehr hoch. Zusätzliche Arbeitsbelastungen durch modifizierte Anflugverfahren sind deshalb unter allen Umständen zu vermeiden.

6.3.1.2. Flugsicherung

Die aus Gründen der Kapazitätsauslastung gewünschte enge Staffelung ankommender Flugzeuge erfordert eine möglichst genaue Bestimmung ihrer Ankunftszeit. Wenn bei geänderten Anflugverfahren die Ankunftszeit nur noch mit geringerer Genauigkeit vorhergesagt werden kann, muss aus Sicherheitsgründen die Staffelung heraufgesetzt und damit Kapazitätseinbu-

ßen in Kauf genommen werden. Derartige Verfahren lassen sich jedoch im Nachtflugbetrieb, wenn der Flughafen nicht an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet, einsetzen.

6.3.1.3. Ökonomische Durchführbarkeit

Die auf das Flugzeug bezogene ökonomische Durchführbarkeit spielt beim Anflug im Gegensatz zum Abflug eine untergeordnete Rolle. In der Regel werden lärmreduzierte Anflugverfahren zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauches führen.

6.3.1.4. Gesetzliche Randbedingungen

Die ICAO PANS-OPS [6-3] geben Auskunft über die Randbedingungen zur Auslegung und Durchführung von lärmreduzierten Anflugverfahren. Danach sollte sich das Flugzeug ab "Outer Marker", jedoch mindestens ab 5 nm vor der Schwelle, in Landekonfiguration befinden und darf während des Anflugs keine extremen Sinkgeschwindigkeiten einnehmen. Werden für die Verfahrensauslegung aktuell verfügbare Systeme und Ausrüstungen (Jahr 1982) zugrunde gelegt, dann darf das Verfahren keine Flugbahnwinkel erfordern, die über dem ILS Gleitpfadwinkel liegen. Wenn die Einführung neuer Systeme und Ausrüstungen es jedoch ermöglicht, deutlich abweichende Anflüge durchzuführen, können und sollten die bestehenden Verfahren neu ausgelegt werden.

Des weiteren dürfen lärmreduzierte Anflugverfahren nicht angewandt werden, wenn die Landebahn nicht sauber und trocken ist, die Wolkenuntergrenze bei 500 ft liegt, die Sicht weniger als 1 nm beträgt, die Seitenwindkomponente inkl. Böen mehr als 15 kts ist, die Rückenwindkomponente inkl. Böen mehr als 5 kts beträgt und wenn Windscherungen angekündigt wurden.

6.3.2. Grundlagen

Die flugphysikalischen Grundlagen für den Landeanflug lassen sich aus Widerstands- und Auftriebsdifferenzialgleichung der Flugbewegung herleiten. Unter der Annahme, dass näherungsweise der Auftrieb gleich dem Gewicht ist, gibt Gl. (6-3) Auskunft darüber, welcher Bahnwinkel oder welche Beschleunigung / Verzögerung sich bei vorgegebenem Schub (hier Leerlaufschub F_{idle}) einstellt. Im anderen Fall, wenn Bahn und/oder Beschleunigung/Verzögerung vorgegeben werden, erhält man den notwendigen Schub F_{req} aus Gl. (6-4).

$$\sin(\gamma) + \frac{\dot{V}}{g} = \frac{F_{idle}}{G} - \frac{C_W}{C_A} \quad (6-3)$$

$$\frac{F_{req}}{G} = \frac{C_W}{C_A} + \sin(\gamma) + \frac{\dot{V}}{g} \quad (6-4)$$

Wie auch der Startsteigflug beinhaltet der Landeanflug mehrere Phasen. Am Abstiegsunkt wird das Schubniveau auf bzw. nahe Leerlaufschub verringert und damit der Sinkflug eingeleitet. In dieser ersten Phase verhält sich das Flugzeug analog zu einem Segelflugzeug. Bei konstanter Fluggeschwindigkeit und Leerlaufschub ist das Verhältnis von Widerstandsbeiwert zu Auftriebsbeiwert C_W/C_A größer als das Verhältnis von Leerlaufschub zu Gewicht F_{idle}/G , der Bahnwinkel γ wird negativ (Gl. 6-3). Soll gleichzeitig Fluggeschwindigkeit abgebaut werden, was einer Energieverteilung gleichkommen würde ("energy sharing"), folgt daraus ein flacherer Bahnwinkel.

Beim Erreichen der Zwischenanflughöhe und dem Übergang in den Horizontalflug ($\gamma=0$) besteht die Notwendigkeit, den Schub zu erhöhen, es sei denn, es soll weiter Geschwindigkeit abgebaut werden (Gl. 6-4). Im Bereich der Zwischenanflughöhe werden die Landklappen in Anflugkonfiguration gebracht und die Fluggeschwindigkeit weiter abgebaut. Die Länge die-

ses Streckenabschnittes im Horizontalflug wird im wesentlichen durch die Flugsicherung bestimmt. Dies hat zur Folge, dass der Endpunkt eines Geschwindigkeitsabbaues in der Regel nicht mit dem Erreichen des Gleitpfades zusammenfällt, so dass eine Schuberrhöhung so gut wie immer erfolgen muss. Verlassen wird die Zwischenanflughöhe mit dem Erreichen des Gleitpfades.

Nach Einflug auf den Gleitpfad und vor Erreichen des "Outer Markers" wird das Fahrwerk ausgefahren und die Landekonfiguration eingenommen. Damit die Landung durchgeführt werden kann, muss das Flugzeug entsprechend den SOP's in 1000 ft Höhe über Grund einen stabilen Flugzustand, d.h. konstante Fluggeschwindigkeit und Bahn eingenommen haben.

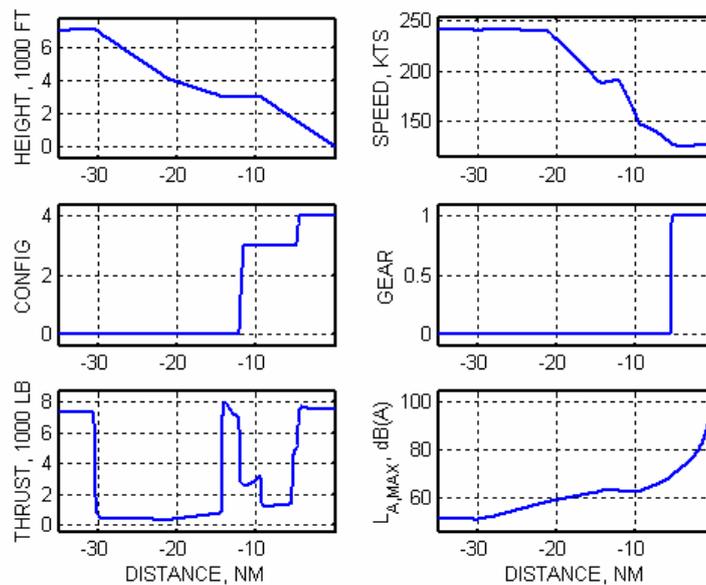


Abbildung 6-6: Low-Drag-Low-Power Anflugverfahren

Das beschriebene Verfahren ist bereits lärmreduzierend und wird als "Low-Drag-Low-Power (LDLP)" oder "Frankfurter" Verfahren bezeichnet und von der DLH schon seit den siebziger Jahren eingesetzt. Fahrwerks- und Klappenfahren erst auf dem Gleitpfad, so spät wie möglich, bedeutet eine widerstandsarme Konfiguration (geringes C_W/C_A), erfordert damit weniger Schub und reduziert somit den Lärmpegel.

Höhen- und Geschwindigkeitsprofil, Stellung von Fahrwerk und Landeklappen, sowie Triebwerksschub und Maximalschallpegel (berechnet mit INM) direkt unterhalb der Flugbahn sind in Abbildung 6-6 für das LDLP-Anflugverfahren über der Entfernung zum Aufsetzpunkt aufgetragen. Besonders deutlich wird die Schuberrhöhung im Bereich der Zwischenanflughöhe. Der Maximalschallpegel steigt mit abnehmender Höhe in der Anfangsphase kontinuierlich an, erhöht sich im Bereich der Zwischenanflughöhe durch die Schuberrhöhung weiter und nimmt im Endbereich des Landeanflugs drastisch zu.

Das Low-Drag-Low-Power Anflugverfahren kann als Stand der Technik angesehen werden und soll im weiteren als Referenz für eine Lärmoptimierung, d.h. Lärmminimierung, dienen.

6.3.3. Optimierungsansatz

Der Lärmpegel direkt unterhalb der Flugbahn hängt vom Abstand zum Flugzeug und dessen Lärmemission ab. Bei heutigen Flugzeugen ist es möglich, dass der Zellenlärm (Triebwerke im Leerlauf) gegenüber dem Triebwerkslärm einen dominierenden Anteil liefert. Der Optimierungsansatz geht also dahin die Anflugbahn höher zu legen, das Schubniveau möglichst

über den gesamten Anflug zu senken und nach wie vor Konfigurationsänderungen so spät wie nur irgend möglich durchzuführen.

6.3.4. Ergebnis

Ein Anheben der Bahn im *Nahbereich* ist grundsätzlich durch steilere Anflüge möglich, die sich entweder über den gesamten Gleitfadbereich erstrecken (Steep Approach) [6-6] oder ausschließlich im Anfangsteil vorliegen (Two Segment Approach). Abbildung 6-7 zeigt die Höhenprofile möglicher Anflugvarianten. Steilere Bahnen können zu einem Erreichen der Leistungsgrenzen moderner Flugzeuge führen, da Bahnwinkel von weniger als -5° aufgrund der heutigen aerodynamischen Güte stationär kaum fliegbar sind. Zum anderen ist ein Anheben des Gleitpfades an vielen Flughäfen nicht ohne weiteres möglich. Auch ein segmentierter Anflug, bestehend aus einem steilen Anfangssegment auf einer geführten Bahn und dem üblichen 3° Endteil kann z.Zt. nicht durchgeführt werden. Es bedarf in beiden Fällen zusätzlicher Ausrüstung sowohl an Bord als auch am Boden. Des Weiteren werden steile Anflüge von Piloten oftmals als "kontrollierte Abstürze" bezeichnet. Eine Einstellung, die sich nur mittels erweiterter Pilotenunterstützung und -schulung ändern lassen wird.

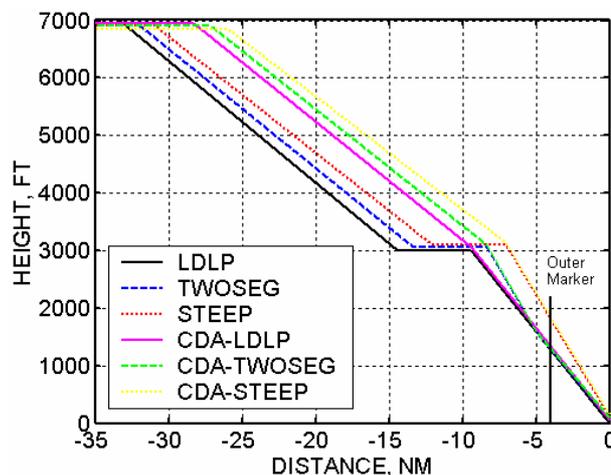


Abbildung 6-7: Höhenprofile verschiedener Anflugverfahren

Im *Fernbereich* kann die Zwischenanflughöhe angehoben und somit der Abstand zur Lärmquelle vergrößert werden. Die Notwendigkeit einer Schuberrhöhung wird damit jedoch nicht umgangen. Sinnvoller ist es, auf die Zwischenanflughöhe zu verzichten und einen Sinkflug mit kontinuierlichem Übergang auf den Gleitpfad durchzuführen. Dieses Verfahren wird als "Continuous Descent Approach (CDA)" bezeichnet. Es hat allerdings Einfluss auf die Planung der Ankunftszeit und somit auf die Landekapazität eines Flughafens und wird deshalb bislang nur bei geringer Verkehrsdichte, d.h. hauptsächlich nachts eingesetzt, da relativ hohe zeitliche Schwankungen auftreten.

Das Bild 6-8 zeigt die Konturen des Maximalschallpegels für die verschiedenen vorgestellten Anflugverfahren (siehe auch [6-7]). 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.

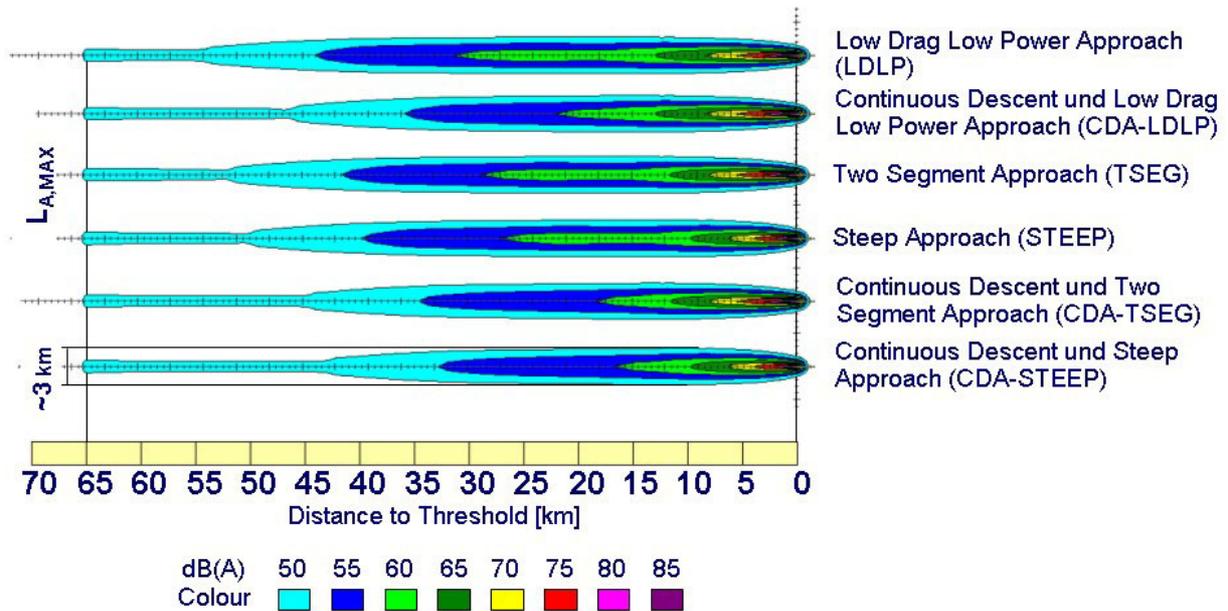


Abbildung 6-8: Konturen konstanten A-bewerteten Maximalschallpegels für verschiedene Anflugverfahren

Die Kombination von CDA und Steep bzw. Two Segment Approach kommt dem Optimierungsansatz am nächsten. Die Bahn liegt gegenüber der Referenzbahn des LDLP signifikant höher, das Schubniveau ist niedriger und die Konfigurationsänderungen erfolgen später. Abbildung 6-9 zeigt charakteristische Werte für einen CDA in Verbindung mit einem -4° Steep Approach.

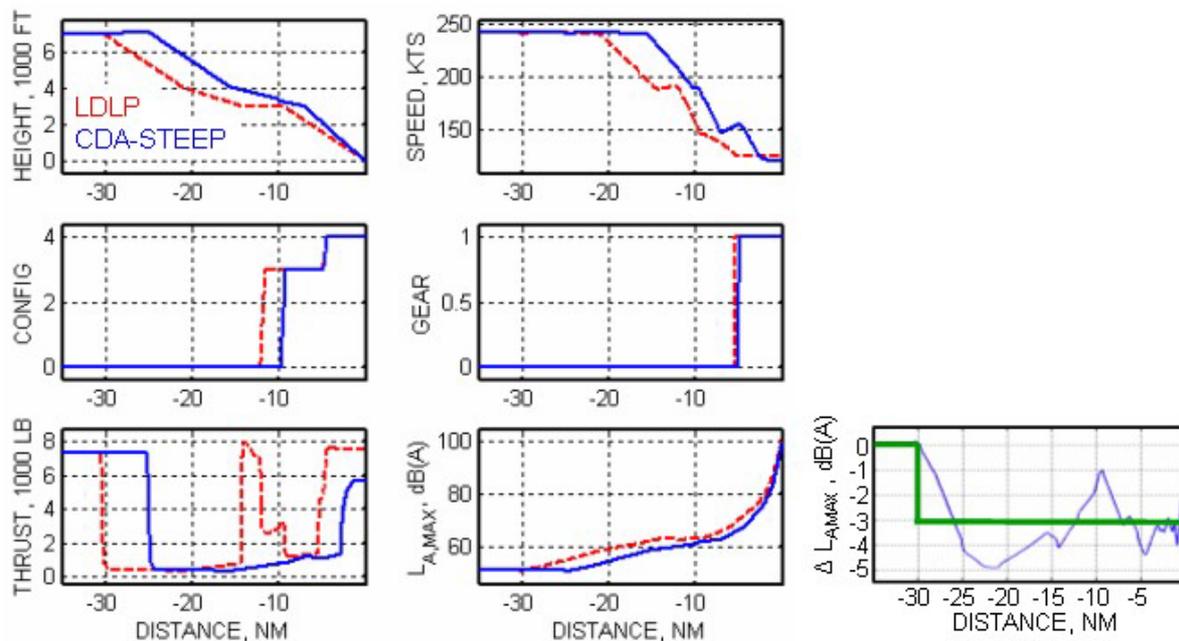


Abbildung 6-9: Continuous Descent Approach / Steep Approach im Vergleich zum Low-Drag-Low-Power Approach

Im Vergleich zum LDLP verringert sich der Maximalschallpegel um bis zu 5 dB(A) bei einer Entfernung von ca. 20 nm und bei einem Grundpegel von 60 dB(A) (siehe Abbildung 6-9). Des weiteren zeigt sich auch im Flughafennahbereich eine Minderung von 3 bis 4 dB(A). Die angestrebte Abminderung von 3 dB(A) kann somit im Mittel erreicht werden.

6.3.5. Umsetzung in operationelle Prozeduren

Ein steiler, bis an den Boden reichender Endanflug ist für eine kurzfristige Umsetzung in eine fliegbare Prozedur nicht geeignet, da der Gleitpfad, wie eingangs erwähnt, an den meisten Flughäfen nicht ohne weiteres angehoben werden kann. Dies gilt auch für Anflüge die geodätisch geführt auf zwei Segmenten durchgeführt werden sollen, denn für das steilere Anfangssegment müsste entweder ein zweiter Gleitpfadsender aufgestellt oder eine andere Art der geodätischen Bahnführung ermöglicht werden, wie z.B. der Einsatz von GPS.

Möglich ist aber auch, das steile Anfangssegment eines Zweisegment-Anfluges über einen bordseitig geregelten Bahnwinkel zu erfliegen (Selected Flight Path Angle). Wenn der Gleitpfad dann in ca. 2000 ft AGL von oben eingenommen wird, sollte eine Stabilisierung innerhalb der nächsten 1000 ft möglich sein, um die Forderungen der SOP's (stabiler Flugzustand in 1000 ft AGL) einzuhalten. Allerdings ist eine Lärmreduktion in gleichem Ausmaß, wie bei durchgängig steilen Anflugverfahren, in diesem Fall nicht zu erzielen.

Die Verbindung eines derart gestalteten Zweisegment-Anfluges mit einem CDA wird im folgenden als Segmented Continuous Descent Approach, kurz SCDA, bezeichnet. Der SCDA enthält die folgenden 5 Segmente (Abbildung 6-10):

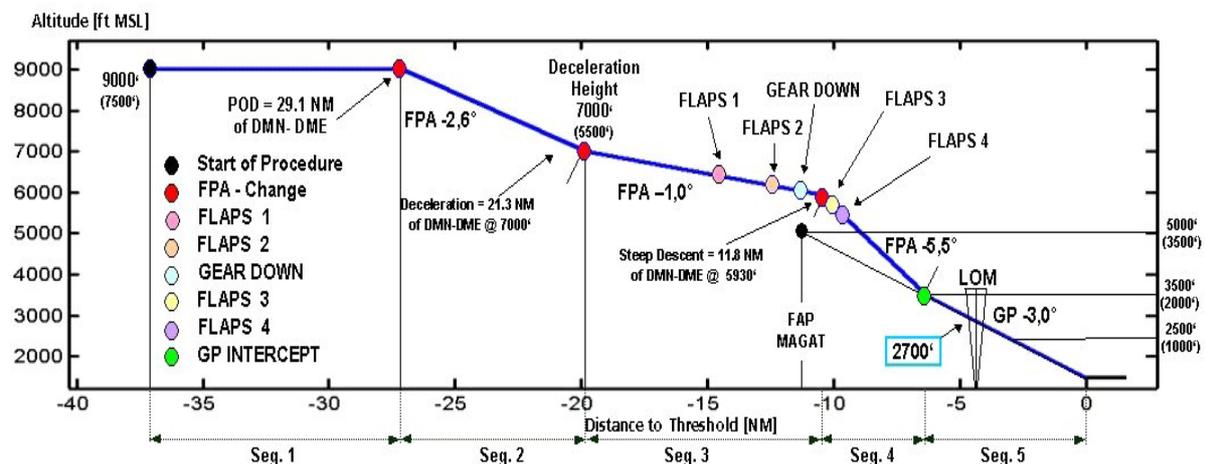


Abbildung 6-10: Segmente eines "Segmented Continuous Descent Approach"

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

Die Bahnwinkel des 1. und 5. Segmentes sind durch den Horizontalflug ($\gamma = 0^\circ$) und den Gleitpfad (in der Regel $\gamma = 3^\circ$) vorgegeben. Die Bahnwinkel- und Verzögerungsvorgaben des 2., 3. und 4. Segmentes ergeben sich aus der Forderung nach Leerlaufschub und den Flugleistungen des betrachteten Flugzeugmusters.

Die Bestimmung des Anfangspunktes des 2. Segmentes (Point oder Top of Descent), das strikte Einhalten der Prozedur und ein über der Höhe veränderlicher Wind beeinflussen den Punkt des Einfliegens in den Gleitpfad entscheidend. Heutige Flight Management Systeme sind nicht in der Lage den POD mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen oder dem Piloten während der Prozedur Korrekturmaßnahmen vorzuschlagen.

6.4. Demonstration der Fliegbarkeit eines SCDA

Das vom DLR betriebene Versuchsflugzeug ATTAS (Advanced Technologies Testing Aircraft System) eignet sich besonders für eine Demonstration der Fliegbarkeit eines SCDA. Entsprechende Flugversuche wurden in einem Festsitzsimulator vorerprobt und am Forschungsflughafen Braunschweig durchgeführt. Der Anflug von Osten auf Braunschweig weist gewisse Besonderheiten auf. So liegt die Zwischenanflughöhe 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 in Abbildung 6-11). Die grüne Kurve im Bild zeigt das Höhenprofil des verwendeten LDLP Referenzfalles dar.

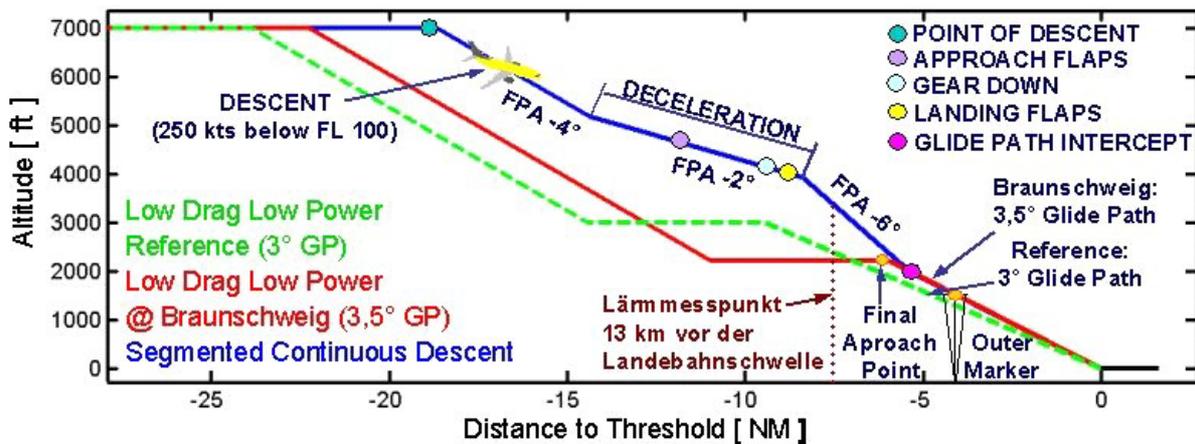


Abbildung 6-11: Gestaltung eines SCDA am Forschungsflughafen Braunschweig

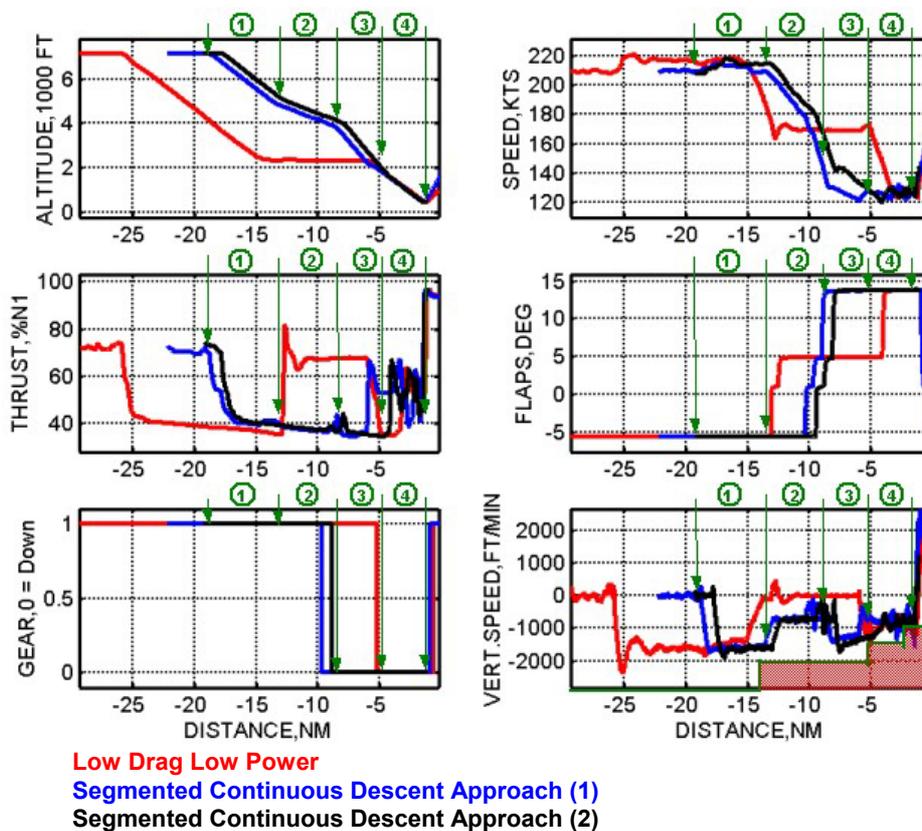


Abbildung 6-12: Verlauf von Flugzustands- und Steuergrößen aus dem Flugversuch

Das Steilflugsegment des SCDA konnte von ATTAS mit einem Bahnwinkel von -6° geflogen werden, was von den heutigen modernen Verkehrsflugzeugen aufgrund ihrer höheren aerodynamischen Güte nicht erreichbar ist.

Fliegbarkeit und Reduktion der Lärmimmission konnten eindrucksvoll demonstriert werden. In Abbildung 6-12 sind Flugzustands- und Steuergrößen über dem Abstand zur Landeschwelle für das Referenzverfahren und für zwei SCDA aufgetragen. Bei zeitgerechter Vorgabe des Flugbahnwinkels und unter Verwendung des "Flight Control Systems" (FCS) wurde die gewünschte Bahn und Geschwindigkeit eingenommen und der Gleitpfad problemlos von oben eingeflogen. Die laut SOP's maximal zulässigen Sinkraten wurden nicht überschritten. Eine Lärmpegelmessung ca. 7 nm vor der Schwelle direkt unterhalb der Flugbahn ergab eine deutliche Reduktion gegenüber dem Referenzverfahren.

6.5. Erstellung von Konzepten zur Integration verbesserter Verfahren in moderne Air Traffic Management Systeme

Die durchgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass durch den operationellen Einsatz lärmindernder Anflugverfahren Verringerungen der am Boden zu erwartenden Lärmbelastung erreicht werden können. Die von den einzelnen Flugzeugen ausgehende Lärmbelastung wird dabei umso geringer sein, je geringer das Schubniveau der Triebwerke und je größer die Anflughöhe sein wird. Aus diesem Grund sollte im Anflugbereich auf Zwischenanflugsegmente in geringer Flughöhe und mit hohem Schubniveau nach Möglichkeit verzichtet werden.

In der operationellen Praxis werden derzeit Continuous Descent Approach (CDA) Verfahren in der Form eingesetzt, dass die Flugzeugführer von der Flugsicherung Freigaben für Anflüge mit diesem Verfahren erhalten und dann die Anflüge ohne weitere Anweisungen der Fluglotsen nach eigenem Ermessen durchführen. Bedingt durch die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Schätzung der Ankunftszeiten kann dieses Verfahren allerdings nur bei geringer Verkehrsdichte und hinreichend großer Separation der Flugzeuge eingesetzt werden. Bei höherer Verkehrsdichte werden die Flugzeuge durch Höhen-, Kurs- und Geschwindigkeitsanweisungen separiert zur Landung geführt, so dass die Anflugverfahren zum Teil durch die Anweisungen der Fluglotsen bestimmt werden. Die Separation der Flugzeuge erfolgt dabei durch Schätzung der zukünftigen Position aller Flugzeuge und entsprechenden taktische Anweisungen der Fluglotsen.

Zukünftige Air Traffic Management (ATM) Konzepte sehen vor, dass die Separation der Flugzeuge durch konfliktfrei geplante Trajektorien und die Überwachung der Einhaltung dieser Trajektorien erfolgt. Dabei sollen auch bord- bodenseitige Abstimmungen der Trajektorien über Datenverbindungen (Data-Link) möglich sein. Grundsätzlich können in derartige "trajektorienbasierte" ATM Systeme beliebige Arten von Anflugverfahren implementiert werden. Voraussetzung für den operationellen Einsatz sind allerdings entsprechende bord- und bodenseitige Unterstützungssysteme zur Planung und Führung des Anflugverkehrs.

Die bodenseitigen Planungsfunktionen im Anflugbereich umfassen im Wesentlichen die

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

Zur Einhaltung der geplanten Trajektorien während der Flugdurchführung sind zudem bordseitige Unterstützungsfunktionen erforderlich:

- Pilotenunterstützung zur 3D-/4D-Navigation entlang der geplanten Trajektorien
 - Flight Director Funktionen
 - Autopilot Funktionen
 - Flight Management System (FMS) Funktionen.

Mit zusätzlichen bodenseitigen Funktionen wird die Einhaltung der geplanten Trajektorien überwacht, um Abweichungen durch entsprechende Anweisungen zu korrigieren oder um Neuplanungen zu initiieren:

- Lotsenunterstützung zur 3D-/4D- Führung des Anflugverkehrs entlang der konfliktfrei geplanten Trajektorien
 - Überwachung der Einhaltung der geplanten Trajektorien
 - Führungsanweisungen bei Abweichungen von den geplanten Trajektorien
 - Durchführung von Neuplanungen.

Durch die Einbeziehung der unter bodenseitigen Vorgaben bordseitig berechneten (FMS) Trajektorien werden zum einen die Planungsgenauigkeiten erhöht und zum anderen die bei der Flugdurchführung zu erwartenden Abweichungen verringert.

Mit der Umsetzung dieser Konzepte kann erreicht werden, dass lärmreduzierende Streckenführungen und Anflugverfahren an Verkehrsflughäfen auch zu Tageszeiten mit hoher Verkehrsdichte ohne unerwünschte Reduktionen der Landebahnkapazitäten eingesetzt werden können.

6.6. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass kurzfristige Reduktionen der Lärmimmission um Flughäfen nur durch die Einführung lärmarmen An- und Abflugverfahren erreicht werden können. Die daraus resultierende Forderung zur Verbesserung bestehender und Einführung neuartiger, auf den heutigen Stand der Technik optimierter Verfahren, bedingt die Entwicklung von geeigneten, validierten Simulationsumgebungen. Durch derartige Modelle, welche eine detaillierte Beschreibung von Schallquellen und –ausbreitung ermöglichen, können belastbare Ergebnisse für zukünftige An- und Abflugverfahren produziert und anschließend in Flugversuchskampagnen verifiziert werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde, neben dem Primärziel der Reduktion der Lärmimmission am Boden, ein großes Augenmerk auf die Randbedingungen Sicherheit, Flugsicherung, ökonomische Durchführbarkeit und gesetzliche Grundlagen gelegt, um wirklich kurzfristige Resultate zu produzieren, welche für allen Beteiligten akzeptabel und mit relativ geringem Aufwand umsetzbar sein sollten:

Das Ziel der unmittelbaren Umsetzbarkeit erfordert die Schaffung von Flugverfahren, welche mit dem heutigen Ausrüstungsstand auskommen. Alle vorgestellten Verfahren versuchen, dieser Randbedingung gerecht zu werden.

Für zweistrahlige Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge, mit der A320 als typischem Vertreter dieser Klasse, konnte die Einführung einer Zwischenbeschleunigungshöhe („Intermediate Acceleration Height“) beim Abflug als positiv für die Reduktion des Lärmimmissionsniveaus identifiziert werden. Dabei werden im Gegensatz zu herkömmlichen lärmarmen Abflugverfahren nennenswerte Zeit- und Treibstoffeinsparungen bei ähnlichem Lärmreduktionspotenzial erzielt. Durch Verschiebung dieser Beschleunigungshöhe kann das Verfahren, mit Einschränkungen, an lokale Bevölkerungsverteilungen bzw. an Tag-/Nachtflugbetrieb angepasst

werden. Zusätzliche Maßnahmen wie z.B. das Erhöhen der Flughöhen zur Schubreduktion von Start- auf Reisesteigflugschub bringen weitere Lärmreduktionen mit sich, bei vergleichbarem zusätzlichem Treibstoff- und zeitlichen Bedarf.

Bei den Anflugverfahren gilt, dass ein CDA in Verbindung mit einem Steilanflug ein gewisses Maximum an Lärmreduktion über den gesamten Anflugbereich liefert. Die Möglichkeit einer kurzfristigen Umsetzung in den Flugbetrieb muss jedoch in Frage gestellt werden. Als gangbarer Weg stellt sich ein CDA dar, der den Gleitpfad von oben in einer Höhe erreicht, von der aus eine Stabilisierung des Flugzustandes bis in 1000 ft AGL noch möglich ist. Dieses Verfahren führt zwar nicht zur gewünschten maximalen Lärmreduktion, ist jedoch nach notwendigen Erweiterungen bzw. Verbesserungen der Funktionalität des FMS (Berücksichtigung von Konfigurations- und Windänderungen) auch relativ kurzfristig einsetzbar.

Abschließend kann gesagt werden, dass die theoretisch gewonnenen Ergebnisse den Nachweis zur kurzfristigen Lärmreduktionen mittels optimierter An- und Abflugverfahren liefern. Diese positiven Erkenntnisse sollten als Anstoß für weiterführende, detaillierte Flugversuchskampagnen genutzt werden, um, nach iterativer Optimierung mit den Erkenntnissen aus den praktischen Versuchen, eine rasche Einführung der Verfahren zu ermöglichen. Ebenfalls empfiehlt es sich, das gewonnene Know-how aus dem Optimierungsprozess direkt in die Auslegung von bord- und bodenseitig benötigter Ausrüstung zu investieren, um mit zukünftigen Flugzeugtypen ein noch deutlicher reduziertes Lärmimmissionsniveau und das Fernziel des „Leisen Luftverkehrs“ zu erreichen.

6.7. Schrifttum

- [6-1] Boeing Commercial Airplanes: *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959-2002. Airplane Safety*. Seattle, Mai 2002
- [6-2] Deutsche Lufthansa AG: *Lufthansa Geschäftsbericht 2001*. Köln, Juni 2002
- [6-3] ICAO: *Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations*. Volume 1 Flight Procedures 4th Edition, Amnd. 11, Part V, Noise Abatement Procedures, Chapter 3.
- [6-4] Brockhaus, R.: *Flugregelung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1994
- [6-5] Perez Diestro, J.: *Sourdine II D3-1.1, Definition of new noise abatement procedures*. Ingenieria y Economia del Transporte, 2003
- [6-6] Hamel, P.: *Noise-abatement flight profiles for CTOL and V/STOL aircraft*. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht 71-10 (1971)
- [6-7] Saliaris, C.: *Untersuchungen von lärmarmen An- und Abflugverfahren für verschiedene Verkehrsflugzeuge*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig, Institutsbericht, IB 111-2004/04