

# AUSWIRKUNGEN VON LÄRMREDUZIERUNGSMÄßNAHMEN AUF DIE EXTERNEN KOSTEN FÜR DIE ANWOHNER AM BEISPIEL EINES DEUTSCHEN GROßFLUGHAFENS

S. Schwanke, T. Bähr  
Lehrstuhl für Luftfahrttechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, 85747 Garching

**Schlagwörter:** *Flughafenlärm, Kosten-Nutzen-Analysen, externe Kosten, lärmreduzierende Maßnahmen*

## 1. ÜBERSICHT

Die ständige Präsenz von lärmenden Geräuschen ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend zu einem Problem in modernen Industriegesellschaften geworden. Der Fluglärm wird dabei von vielen Menschen als besonders störend empfunden und steht daher meist an erster Stelle in Lärmbelastigungsuntersuchungen, vor Straßen- und Schienenverkehrslärm. Gerade im Bereich von Großflughäfen ist häufig eine Vielzahl von Menschen betroffen. Für diese Anwohner bedeuten beständig hohe Lärmpegel nicht nur eine Verringerung der Lebens- und Wohnqualität, sondern auch ein erhöhtes Gesundheitsrisiko. Unter anderem hat der deutsche Gesetzgeber auf die Problematik schon vor Jahrzehnten reagiert und deshalb Lärmschutz-zonen für Flughäfen erlassen. Seitdem haben auch technische Entwicklungen vor allem im Bereich der Flugzeugtriebwerke enorm dazu beigetragen, dass trotz verstärktem Luftverkehrsaufkommen die Lärmbelastung insgesamt gleich geblieben oder sogar gesunken ist. Die Einführung von lärmabhängigen Gebührenordnungen und Lärmrestriktionen an vielen Flughäfen, vor allem in Europa, hat ferner dazu geführt, dass die Lärmklassifizierung eines Flugzeuges zu einem wichtigen Kaufkriterium für Fluggesellschaften geworden ist. Mittlerweile geht diese Entwicklung sogar soweit, dass für die Flugzeughersteller die Einhaltung von Immissionsobergrenzen bei der Entwicklung von neuen Flugzeugen obersten Vorrang genießt, um Betriebsbeschränkungen an bestimmten Flughäfen zu vermeiden. Aus diesen Gründen betrifft der Fluglärm heutzutage verschiedenste Bereiche der Luftfahrt: Technik, Wirtschaftlichkeit, gesetzliche Rahmenbedingungen und Akzeptanz bei der Bevölkerung. Am Lehrstuhl für Luftfahrttechnik der TU München wird daher intensive Forschung auf diesen Gebieten betrieben.

Trotz der Krise der letzten Jahre wird von mehreren Luftfahrtexperten erwartet, dass der Luftverkehr sich erholt und in den nächsten Dekaden stark zunimmt. Aufgrund dieser Annahme verstärkt sich die nationale und internationale Forschung auf dem Gebiet der Verminderung der negativen Effekte der Luftfahrt auf die Umwelt (Lärm, lokale und globale Schadstoffemissionen usw.). Um eine nachhaltige Entwicklung der Luftverkehrsindustrie zu un-

terstützen, erscheint es notwendig und sinnvoll, mittel- und langfristige Auswirkungen (insbesondere den wirtschaftlichen Nutzen) von lärmreduzierenden Maßnahmen für die Gesellschaft, Flughäfen, Flugzeugbetreiber und – hersteller monetär zu bestimmen. Selbstverständlich besitzen diese Teilnehmer des Luftverkehrs unterschiedliche Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Fluglärm. Während der Hersteller sich eher auf eine Reduktion an der Quelle konzentriert, wird der Flughafen vermutlich stärker auf die Bereiche Siedlungspolitik und Lärmregularien einwirken. Die Aspekte erhöhter Flugzeugrestwert („residual value“), Steigerung des Flottenumlaufes („utilization“) und die Ersparnisse bei lärmabhängigen Landegebühren sind an dieser Stelle von zentraler Bedeutung und müssen bei der ökonomischen Evaluierung von Fluglärm gemeinsam berücksichtigt werden. Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Bestandteil des Bewertungsprozesses ist die Betrachtung von externen Kosten, gerade im Hinblick auf die Bestrebungen der Behörden der EU und einiger nationaler Regierungen, diese Kosten künftig zu einem gewissen Anteil gemäß dem Schadensverursacherprinzip zu internalisieren. Aus diesem Grund gewinnen detaillierte Aussagen über die monetäre Schadensreduktion, ausgedrückt in totalen und flugzeugspezifischen externen Kosten, durch den Einsatz verschiedener Lärmkontrollmechanismen wie Lärmreduktionstechnologien („chevron nozzle“, „scarfed inlet“ etc.) oder lärmarmen operationellen Verfahren (CDA, LPLDA) immer mehr an Bedeutung. Die quantitative Erfassung dieser in der Zukunft denkbaren Gebühren, die damit mögliche Gewichtung von Lärmreduzierungsmaßnahmen und Identifizierung von Problembereichen um den Flughafen sind deshalb Kernpunkte der vorliegenden Studie. Es gibt nachvollziehbarerweise Schwierigkeiten bei der Bestimmung dieser Beträge, da die Ermittlung des „Preises der Ruhe“ und die Konvertierung von immateriellen Dezibelwerten in vergleichbare Eurozahlen eine ziemliche Herausforderung darstellt.

Dennoch existieren aktuelle und anerkannte sowie zum Teil von den Autoren eigenständig erweiterte ökonomische Evaluierungsansätze für die Bestimmung der totalen jährlichen externen Kosten des Fluglärms wie z.B. die Methode des Hauspreisverlustes („Hedonic Pricing Method HPM“) mit konstantem und variablem NDI, Zahlungsbe-reitschaftsanalyse für eine gewisse Lärmreduktion („Con-

tingent Valuation Method CVM“), erhöhte Krankheitskosten und Siedlungsbeschränkungen ab einem bestimmten Schwellwert. Die Aufteilung auf flugzeugspezifische Kosten erfolgt anschließend über unterschiedliche Gewichtungsmethoden basierend auf den Lärmzulassungswerten nach ICAO Annex 16. Weiterhin können marginale Kosten in Abhängigkeit von Uhrzeit, Flugzeugtyp, Flugroute und Hintergrundbelastung ermittelt werden, die als Grundlage für eine Internalisierung herangezogen werden sollten.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Untersuchungen mit Hilfe des weit verbreiteten Lärmprognosemodells INM der FAA durchgeführt, wobei das Layout, die Bevölkerungsdichte und -verteilung sowie die Flugrouten zunächst auf dem Frankfurter Flughafen basierten. Unterschiedliche generische Flottenzusammensetzungen, Lärmreduktionstechnologien, operationelle Verfahren und Marktdurchdringungsannahmen für die jetzige und zukünftige Situation (Jahre 2002, 2012 und 2022) in Anlehnung an die Airbus Marktvorhersage [1] wurden in die Simulation integriert. Das Flughafenmodell ist somit bezüglich der Flottenzusammensetzung, der Technologieintegration und der vertikalen An- und Abflugverfahren quasigenerisch, weitere Parameter wie Wetter, Bevölkerungsverteilung und Flugrouten bleiben für alle Simulationen aus Gründen der Vergleichbarkeit konstant. Die Ergebnisse wurden, soweit möglich, vorhandenen Daten von Flughafenbetreibern, aktuellen Fluglärmvaluierungsstudien und eigenen Untersuchungen an 14 internationalen Flughäfen gegenübergestellt [2],[3],[4]. Sie sind aber nicht ohne weitere Behandlung und Interpretation schnell auf andere Flughafensituationen übertragbar. Das Ziel dieses ersten Ansatzes ist die Bestimmung der Auswirkungen von lärmreduzierenden Maßnahmen auf die Fläche der Lärmkontur und die Anzahl der betroffenen Bevölkerung im Vergleich zu einem jetzigen und zukünftigen Referenzszenario, da beide Größen direkt in die externe Kostenermittlung eingehen. Die Untersuchung erfolgte für die Flugzeugtypen A320, A330 und A340 sowie für die beiden Bereiche Lärmreduktionstechnologie und operationelle lärmarme An- und Abflugverfahren; die verwendete Einheit war dabei der  $L_{DEN}$  (Day-Evening-Night-Level), welcher auch von der EU als baldige einheitliche Bewertungsgröße vorgeschlagen wird.

## 2. METHODIK DER UNTERSUCHUNGEN

Dieses Kapitel erklärt kurz die Gesamtmethodik der Ermittlung des ökonomischen Nutzens von verschiedenen Lärmreduktionsmaßnahmen gemäß der Einteilung in die vier Kategorien nach ICAO [5]. Der komplette Ansatz ist in Bild 1 zusammengefasst. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind die Bereiche Siedlungsbeschränkung und operationelle Restriktionen am Flughafen, beispielsweise eine Begrenzung von marginalen ICAO Kapitel 3 Flugzeugen, noch nicht umgesetzt. Nach der Definition der zu untersuchenden Kontrollmaßnahmen in den Eingangsdateien für INM (dieser Prozess wird in den nächsten Abschnitten näher beschrieben) wird die Simulation gestartet. Es ist prinzipiell möglich, auch eine Kombination von verschiedenen Verfahren und Technologien zu implementieren. Nach der Berechnung, welche bei dem momentanen Stand des Modells und einem handelsüblichen Computer zwei bis drei Stunden in Anspruch nimmt, werden die Ausgangsdateien, insbesondere solche die Informationen über die Flächen der Lärmkonturen und die darin betroffenen Personen enthalten, in das selbstentworfenen Pro-

gramm TESCOAN („Tool for the Evaluation of Social Cost of Airport Noise“) eingelesen. Dieses berechnet automatisch und in einer überschaubaren Zeit mit den hinterlegten Kostenbewertungsansätzen die totalen jährlichen, flugzeugspezifischen und marginalen externen Kosten des Fluglärms für das zu untersuchende Szenario, welche anschließend den Werten aus der Referenzkalkulation gegenübergestellt werden können.

Momentan sind vollständige Modelle der Flughäfen München und Frankfurt vorhanden, die überwiegende Anzahl von Untersuchungen fand bisher mit dem Flughafen Frankfurt statt. Die nichtstatische Simulationsumgebung kann aber bei Bedarf jederzeit, zugegebenermaßen in einem längerfristigen Prozess von mehreren Wochen, um weitere Flughäfen erweitert werden, unter der Voraussetzung, dass ausreichen Daten über Bevölkerungsverteilung, Layout, Flugrouten und Flugzeugmix vorhanden sind. Die wesentlichen Aspekte der Methodik werden in den nächsten Abschnitten im Detail betrachtet.

### 2.1. Modellgenerierung eines Flughafens

Die Ansätze der externen Kostenberechnung erfordern ein komplettes Flughafenmodell, welches die Start- und Landebahnkonfiguration, Flugrouten, den Flottenmix sowie exakte Bevölkerungs- und Höhendaten beinhalten sollte. Für die Lärmprognose wurde die Software INM verwendet. Es zeigte sich nämlich in vorhergehenden Studien [6], dass die Berechnung von Dauerschallpegeln im Flughafennahbereich gut mit Messwerten übereinstimmt. Ein deutsches Programm gemäß AzB stand unter anderem aus finanziellen Gründen nicht zur Verfügung, die Lärmprognosen untereinander zeigen große Abweichungen [7], welche auch durch eigene Untersuchungen des Lehrstuhls bestätigt werden konnten. INM enthält eine Datenbank, in der oben genannte Informationen für viele US-amerikanische Flughäfen bereits hinterlegt sind bzw. über Importierfunktionen leicht eingelesen werden können. Unglücklicherweise findet man für Flughäfen anderer Länder diese schnellen Modellierungsmöglichkeiten nicht, so dass die fehlenden Daten zuerst gesammelt, aufbereitet und manuell eingegeben werden müssen.

Die Auswahl fiel auf den Flughafen Frankfurt aufgrund seiner Bedeutung als internationaler Verkehrsknotenpunkt, Heimatbasis einer anerkannten deutschen Linienfluggesellschaft, seiner Nähe zur Technischen Universität München und nicht zuletzt wegen der Bereitschaft notwendiges Datenmaterial zur Verfügung zu stellen. Für das Flughafenmodell dieser Studie wurden deshalb drei Start- und Landebahnen sowie die aktuellen Flugrouten aus dem Luftfahrthandbuch der DFS (Status 2002) integriert. Ergänzt wurde die Simulation anschließend mit einem Höhenmodell des DLR, welches dem Lehrstuhl freundlicherweise überlassen worden ist, und gegenwärtigen Bevölkerungsdaten aus Gemeinden und Landratsämtern in einem Bereich von 70 km x 40 km um den Flughafenbezugs punkt. Insgesamt konnten auf diese Weise 2,7 Mio. Einwohner mit ca. 23000 Bevölkerungspunkten abgebildet werden, deren enthaltene Personenzahl je nach Ort und Stadt von 20 bis 200 schwankte. Das komplette Flughafenmodell Frankfurt ist in Bild 2 dargestellt.

Wie bereits in der Einleitung kurz erwähnt, wurde die Flugzeugzusammensetzung als eine variable und generische Größe definiert, alle anderen Parameter hauptsächlich Layout, Wetter, Bevölkerung und Flugrouten sind über die

drei Zeitscheiben 2002, 2012 und 2022 nicht verändert worden. Ausgangspunkt war der weltweite Flottenmix aus der Airbus Marktvorhersage GMF 2002 [1], welcher für jede Sitzplatzkategorie und typische Blockzeiten prozentual auf die 400000 jährlichen Bewegungen (nur Flugzeuge mit mehr als 100 Sitzplätzen wurden berücksichtigt) von Frankfurt umgerechnet wurde [8] (mit realer Tag-Abend- Nacht- und Flugroutenverteilung). Gemäß der Wachstumsprognose für die Auslastung und für jedes Sitzsegment wurden Flugpläne für die Jahre 2012 und 2022 abgeleitet (das Jahr 2012 wurde interpoliert). Die Zusammenfassung kann in Tabelle 1 eingesehen werden. Insgesamt dauerte die Erstellung des kompletten Modells mehrere Wochen.

## 2.2. Abbildung von Lärmreduktionstechnologien

Vor der eigentlichen Berechnung des Lärmwertes wird in INM der dreidimensionale Flugpfad gemäß den vorgegebenen vertikalen und horizontalen Flugpfaden für jede Flugbewegung ermittelt. Diese Ergebnisse (vorwiegend kürzeste Distanz Flugzeug- Empfänger, korrigierter Schub, Höhe, Geschwindigkeit) dienen der Kalkulation von verschiedenen Lärmpegel an jedem vorgegebenen Immissionspunkt mittels standardisierter NPD- Kurven aus Überflugmessungen von Flugzeugherstellern. Die durch die vereinfachte Betrachtungsweise von Flugzeugen als ungerichtete Punktschallquelle erhaltenen Lärmwerte  $L$  werden nachher unterschiedlichsten Korrekturtermen additiv unterzogen (siehe Gleichung 1), um so den endgültigen, berichtigten Wert  $L_{corr}$  an einem Punkt zu erhalten. Hierbei bedeutet  $L_{dur}$  eine Anpassung an die reale Fluggeschwindigkeit,  $L_{adj}$  und  $L_{dir}$  sind laterale, winkelabhängige Modifikationen,  $L_{nf}$  ist der Ausgleich für die Unterteilung der Flugrouten in Segmente und  $L_{aadj}$  ist der Korrekturterm für die unterschiedlichen Schalldämpfungskoeffizienten zwischen den Vorschriften SAE AIR-1845 and SAE ARP-866 [9].

$$L_{corr} = L + L_{dur} + L_{adj} + L_{dir} + L_{nf} + L_{aadj} (+L_{nrt}) \quad (1)$$

Diesem summativen Konzept folgend, wurde Gleichung 1 um den zusätzlichen Faktor  $L_{nrt}$  erweitert, welcher verschiedene Lärmreduktionstechnologien repräsentieren soll. Ausgehend von den normierten Überflugspektren aus INM 6.1 (24 ungewichtete Terzbänder zum Zeitpunkt LAMAX) an der Schallquelle für verschiedene Flugzeugtypen wurden Technologien in Abhängigkeit des Frequenzbereiches und der Amplitude der Reduktion in diese Originalspektren implementiert (s. Bild 3). Die auf diese Weise modifizierten Schalldruckpegel werden dann frequenzabhängig über geometrische und atmosphärische Absorptionskoeffizienten gemäß SAE AIR-1845 für die 10 INM Standardentfernungen ermittelt. Anschließend werden die Schalldruckpegel der 24 Terzbänder entweder dem A-Filter (für die Lärmwerte LAMAX und SEL) oder dem „empfundene (perceived)“ Bewertungsmaßstab (für die Lärmwerte EPNL und PNLTM) unterzogen und logarithmisch addiert, um auf diese Weise den gesuchten Wert für  $L_{nrt}$  (s. Gleichung 1) zu erhalten. Dieser ist abhängig vom akustischen Ausgangsspektrum (Start, Landung, Flugzeugtyp), vom Ausmaß und der Bandbreite der Reduzierung, von der Entfernung Quelle- Empfänger sowie von

der betrachteten Lärmeinheit. Somit wurde eine nachvollziehbare Methodik entwickelt, mittels der nachträglichen Modifikation von original NPD- Kurven Lärmreduktionstechnologien abzubilden [8]. Dieser Prozess ist prinzipiell übertragbar auf verschiedene Flugzeugtypen und Technologien (Start oder Landung). Selbstverständlich sind dabei einige Annahmen in Kauf genommen worden wie zum Beispiel die Richtungs- und Konfigurationsunabhängigkeit der Technologien, um die wesentlichen zu nennen, an der Verfeinerung und Validierung wird derzeit aber weiter gearbeitet. Zudem ergaben sich Schwierigkeiten aus der nur spärlich vorhandenen Literatur exakte Angaben bezüglich Frequenzbereich, Testbedingungen und Abschätzung der Reduktion abzuleiten. Aus diesem Grund wurden generische, virtuelle Technologien definiert, die in verschiedenen Bereichen (50-250 Hz, 315-1600 Hz, 200-2000 Hz und 2000-10000 Hz) wirken und dabei unterschiedliche Reduktionsausmaße (+1 bis -5 dB) annehmen können, um so diskrete Pegelverringerungen (in EPNdB und LAMAX) an den Zulassungspunkten nach ICAO zu erzeugen. Bild 3 zeigt die Methodik beispielhaft am Spektrum #103 eines A320 mit dem Triebwerk CFM56-5A und einer Reduktion von jeweils -3 dB im Terzbandbereich 50-315 Hz.

## 2.3. Abbildung von lärmarmen vertikalen An- und Abflugverfahren

Als weiterer wesentlicher Punkt bei der Kontrolle von Fluglärm (s. Bild 1), wurden verschiedene CDA und TSA Anflugverfahren überwiegend für den A340 als so genannte „Fix-point profiles“ in INM eingegeben. Bild 4 zeigt beispielhaft den Geschwindigkeits- und Höhenverlauf eines 3°CDA. Weitere Informationen hierzu können der Veröffentlichung [10] entnommen werden.

## 2.4. Berechnung der externen Kosten

Dieser Abschnitt erläutert die in dieser Studie verwendeten Berechnungsmethoden für die Ermittlung der totalen und spezifischen externen Kosten von Fluglärm [2]. Auf die marginalen Kosten soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, das dahinter stehende Konzept wurde bereits in [10] erläutert, zudem liegen derzeit nur für wenig Flugzeugtypen und Flugrouten belastbare Zahlenwerte vor. Die dafür entwickelte Oberfläche TESCOAN erlaubt eine schnelle und nachvollziehbare Monetarisierung der externen Effekte Belästigungen, Siedlungsbeschränkungen und erhöhte Wahrscheinlichkeiten von hauptsächlich Herz- Kreislaufkrankungen durch das Importieren von relevanten INM Ein- und Ausgangsdateien (Bevölkerungs- und Lärmzoneninformationen). In vorherigen Untersuchungen wurde dafür hauptsächlich der Hauspreisverlustansatz für die Abschätzung der totalen jährlichen Kosten verwendet. Eine Umlegung dieser Gebühren auf unterschiedliche Flugzeugtypen fand bisher kaum statt. Es war somit unter anderem auch ein Ziel dieser Studie, bestehende Ansätze zu erfassen und wenn möglich sinnvoll zu erweitern. Dies geschah zum Beispiel mit der Einführung eines nicht-konstanten NDI auf Basis der Belästigungskurven von Miedema [11]. Weiterhin wurde, als Erweiterung bisheriger Analysen, versucht, flugzeugspezifische Kosten als Funktion des zugelassenen Lärmwertes zu bestimmen.

Die implementierten Ansätze werden im Folgenden aufgelistet und bei Bedarf näher erläutert.

#### *Absolute jährliche Kosten*

Normalerweise wird für die Ermittlung der totalen externen Kosten ein Jahr als Bezugsraum gewählt. Es standen dafür folgende Methoden zur Verfügung:

- Hauspreismethode HPM mit einem konstanten NDI [12,13], Eingangswerte: Hypothekenzinsrate, durchschnittlicher Hauspreis, Anzahl der Haushalte in den einzelnen Lärmzonen, Abschreibungszeitraum des Hauses und NDI in %/dB  $L_{DEN}$
- Hauspreismethode HPM mit einem lärmzonenabhängigen nicht-konstantem NDI [2,11], Eingangswerte siehe oben
- Zahlungsbereitschaftsanalyse, „Contingent Valuation Method CVM“, dabei kann vom Benutzer ein sinnvoller Wert z.B. 30 €/dB  $L_{DEN}$ /Haushalt vorgegeben werden [14]. Eigene Fragebogenaktionen für die Bestimmung dieser Größe für den Flughafen Frankfurt wurden nicht durchgeführt. Eingangswerte: CV-Wert, Anzahl der Haushalte in den einzelnen Lärmzonen
- Ansatz gemäß dem Zusatz zur EU- Direktive 2002/49/EC (Experten [4], [15] schlagen hier den gemeinsamen europäischen Wert 38,75 €/dB  $L_{DEN}$ /Haushalt für die Lärmgrenzwerte 50 oder 55 dB  $L_{DEN}$  vor). Eingangswerte: dieser Wert, Anzahl der Haushalte in den einzelnen Lärmzonen
- Externe Kosten aufgrund von Siedlungsbeschränkungen (Verringerung von Landpreisen), in einigen Ländern existieren Einschränkungen, dass in gewissen Zonen um den Flughafen kein Bauland ausgewiesen werden darf, dies führt natürlich in der Konsequenz zu einem Wertverlust des Landes für den Besitzer [4]. Eingangswerte: Preis Bauerwartungsland, Preis Ackerland, nicht genutzte Fläche, Zinsrate
- Kosten aufgrund der Störung des Nachtschlafes [4], [16], Eingangsgrößen: Anzahl der betroffenen erwachsenen Personen in den einzelnen Lärmzonen  $L_{NIGHT}$ , Dosis-Wirkungsbeziehung für Aufwachreaktion, monetäre Zahlungsbereitschaft für Vermeidung dieses Effektes
- Kosten aufgrund der Erhöhung der Anzahl von Herz-Kreislauf- Erkrankungen durch Fluglärm [4], [15], betrachtet werden hier Ausfallkosten, Kosten der Wiederherstellung (Arzt, Krankenhaus, Medikamente) und Erholungskosten. Der Grenzwert beträgt 70 dB  $L_{DEN}$ . In diesem Bereich wohnen in der Regel sehr wenig Leute (um den Frankfurter Flughafen gar keine), so dass dieser externe Kostenanteil oft verschwindend gering gegenüber den anderen Größen ist. Schwerhörigkeit spielt bei den typischen Lärmpegeln um Flughäfen keine Rolle und ist deshalb an dieser Stelle auch nicht berücksichtigt worden. Eingangswerte: Dosis- Wirkungsbeziehungen der einzelnen Krankheiten, monetäre Zahlungsbereitschaft für diese Effekte/Leistungen, Anzahl der erwachsenen Personen in den Lärmzonen  $> 70$  dB  $L_{DEN}$

#### *Flugzeugspezifische Kosten*

Unter flugzeugspezifischen Kosten wird die Aufteilung der totalen jährlichen externen Kosten auf die einzelnen Flugzeuge aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung ihrer zugelassenen Lärmpegel (T/O, sideline und APP in EPNdB) verstanden. Es wurden folgende Ansätze umgesetzt:

- Vorschlag der EU für die einheitliche Einführung von lärmabhängigen Landegebühren [17] für An- und Abflug
- Spezifische Kostenverdopplung alle 3 EPNdB (gemäß der Verdopplung der akustischen Energie alle 3 dB) [3]
- Spezifische Kostenverdopplung alle 10 EPNdB (gemäß der Verdopplung der empfundenen Lautstärke alle 10 dB) [3]

### **3. ERGEBNISSE AUSGEWÄHLTER SZENARIEN**

Nach der Beschreibung der Methodik der Berechnung des Nutzens von Lärmreduktionsmaßnahmen über den externen Kostenansatz, werden in diesem Abschnitt auszugswise einige Ergebnisse präsentiert. Zuerst werden die Resultate für die Referenzszenarien der drei Jahre 2002, 2012 und 2022 dargestellt. Anschließend wird der Profit beispielhaft für einen A340 mit Lärmreduktionstechnologie in den Bereichen 315-1600 Hz (jeweils -5dB Reduktion) und für einen A340 CDA Anflug als Vergleich aufgeführt. Es werden dabei zwei Interpretationsmöglichkeiten dargeboten: die Verringerung der totalen externen Kosten durch lärmreduzierende Maßnahmen wird nur den jeweils modifizierten Flugzeugen zugesprochen (Ansatz 1) und die Reduktion kommt allen Flugzeugen über die Verringerung der totalen externen Kosten zugute (Ansatz 2, momentan so auch in TESCOAN implementiert).

#### **3.1. Referenzszenarien**

Die Lärmkonturen der Referenzszenarien für die drei Jahre sind in Bild 5 präsentiert (vgl. auch Tabelle 1). Es wurden dabei nur Flugzeuge mit mehr als 100 Sitzplätzen berücksichtigt. Logischerweise wachsen die Flächen der Lärmkonturen auch mit den steigenden Flugbewegungszahlen (durchschnittlich 4,8% jährlich) über die Jahre an. Aufgrund des langen Lebenszyklus und der bereits erfolgten Ausmusterung von altem Kapitel 2 Gerät, bringt die Außerdienststellung von weiteren Flugzeugen keine wesentliche Erleichterung mehr. Die zugrunde liegenden ökonomischen Daten für die Beispielrechnungen mit der HPM mit konstantem NDI und der Ergänzung zur EU-Direktive (s. Kapitel 2.3) waren folgende:

<i>Zinsrate:</i>	3%
<i>Hauspreis:</i>	250000 €
<i>Abschreibungszeitraum:</i>	25 Jahre
<i>NDI:</i>	0,61%/dB $L_{DEN}$

Basierend auf diesen Zahlen werden in Tabelle 2 die Ergebnisse für die drei Jahre und für die zwei Grenzwerte 50 dB  $L_{DEN}$  und 55 dB  $L_{DEN}$  für diese beiden Methoden dargestellt. Erwartungsgemäß steigen auch die totalen externen Kosten über die Jahre an und sie sind zudem stark vom gewählten Grenzwert und der hinterlegten Methode abhängig.

### 3.2. Szenarien mit Lärmreduktionstechnologie

Das gewählte Beispiel (dargestellt in Tabelle 3), repräsentiert eine Lärmreduktionstechnologie für die Landung aller A340 (100% Marktdurchdringung, Reduktion jeweils -5dB in den Terzbandbereichen 315-1600 Hz) mit 6 täglichen Landungen 2002, 13 Landungen 2012 und 24 Landungen 2022. Es ist erkennbar, dass Reduktionen der totalen Kosten bis zu 3% im Jahre 2022 möglich sind, wenn man den Grenzwert 55 dB  $L_{DEN}$  heranzieht, sind es sogar 4%. Dies wirkt sich natürlich auch auf die spezifischen Kosten und den Nutzen für den A340 aus. Es fällt auf, dass Ansatz 1 (die gesamte Kostenreduktion wird auf den A340 umgelegt) zu wesentlich höheren Geldbeträgen führt als der Vorschlag der EU mit den lärmabhängigen Landebühren (Kostenreduktion kommt indirekt allen Flugzeugen zu gute) [17].

### 3.3. Szenarien mit lärmarmen vertikalen Anflugverfahren

Tabelle 4 stellt die totalen und die spezifischen externen Kosten für einen lärmarmen A340 Anflug (s. Bild 4) für den Ansatz 1 dar (s. auch Abschnitt 3.2). Alle anderen Profile und Flugzeuge blieben unverändert. Auch hier fällt auf, dass die direkte Umlegung des Nutzens nur auf alle A340 zu wesentlich höheren Geldbeträgen führt wie Ansatz 2 (als Vergleichswert soll hier der Wert für 2012 und 55 dB  $L_{DEN}$  Grenzwert von 3,05 € herangezogen werden). Weiterhin lässt sich im Gegensatz zu dem Beispiel mit der Technologie feststellen, dass insgesamt weniger monetärer Nutzen für den beispielhaften CDA zu erwarten ist.

## 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie in Bild 1 aufgezeigt, konnte eine komplette Methodik zur Unterstützung von Kosten- Nutzen- Analysen (neben den direkten Preisen von zum Beispiel Schallschutzfenstern, Technologieentwicklung) über den externen Kostenansatz bis hin zu flugzeugspezifischen Gebühren entworfen und realisiert werden. Hiermit wird ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches es Flugzeugherstellern und Flughäfen erlaubt, lärmreduzierende Maßnahmen zu evaluieren und zu gewichten sowie Problemfelder aufzuzeigen bzw. auf welche Weise definierte Umweltziele kostengünstig erreicht werden können. Die Resultate der Tabellen 2 bis 4 bestätigen diese Aussage. Bisher wurden Methodiken für die Implementierung von Technologien über die Anpassung von NPD- Kurven und von lärmarmen Anflugverfahren mittels der direkten Profileingabe in ein Lärmprognosemodell entwickelt. Dazu war es notwendig eine komplette Flughafensimulation inklusive Höhen- und Bevölkerungsmodell in INM aufzubauen. Dies geschah für die beiden deutschen Flughäfen Frankfurt und München für die Jahre 2002, 2012 und 2022 basierend auf der Airbus Marktvorhersage. Derzeit finden Überlegungen statt, die Methodik auf weitere Flughäfen auszudehnen und zusätzlich Lärmregularien und Restriktion für die Landnutzung um Flughäfen zu integrieren, um belastbare Aussagen auch für andere Flughafenkonstellation zu erhalten.

Auch an der Darstellung weiterer generischer Parameter wie Bevölkerungsdichte, Flughafenlayout wird derzeit gearbeitet. Selbstverständlich müssen die abgeleiteten monetären Vorteile auch den Nachteilen wie erhöhter Spritverbrauch, längere Flugzeit etc. gegenübergestellt werden. Aber mit der hier vorgestellten Methodik ist es zumindest möglich auch einmal die ökonomischen Vorteile von Lärmkontrollmaßnahmen quantitativ für realistische Flughafenszenarien und Annahmen auszudrücken.

## 5. DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte sich der Autor für die Kooperation mit den betreffenden Abteilungen des Flughafens Frankfurt für die unkomplizierte und schnelle Bereitstellung der benötigten Daten bedanken. Danksagen will ich auch den zahlreich beteiligten Studenten vor allem aus Ostdeutschland, ohne deren unermüdlichen Einsatz und Fleiß, die Studie in dieser Form nicht zustande gekommen wäre. Nicht zuletzt geht mein Dank an die Herren Fer und Eckardt von Airbus Deutschland.

## 6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Airbus S.A.S., "Global Market Forecast 2003-2022", Toulouse, Frankreich, 2003

[2] T. Bähr, „Bestimmung ausgewählter externer Kosten des Fluglärms bei Flughafenwohnern an einem generischen Flughafen“, Diplomarbeit TU München/TU Dresden, 2005

[3] R. Schlenker, "The Social Cost of Aircraft Noise – An Analysis of the Situation at Fourteen Airports Worldwide", Diplomarbeit TU München, 2004

[4] S.A. Schmid, P. Preiss, A. Gressmann, R.Friedrich, „Ermittlung externer Kosten des Flugverkehrs am Flughafen Frankfurt/Main – Gutachten zur Ermittlung der externen Kosten des Flugverkehrs am Flughafen Frankfurt/Main“, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2003

[5] ICAO, "Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management", DOC 9829, Montreal, Kanada, 2004

[6] S. Schwanke, „Vergleich von gemessenen und berechneten Fluglärmwerten am Flughafen München“, DGLR Jahrestagung Dresden, 2004

[7] Isermann, U.; Schmid, R.: „Bewertung und Berechnung von Fluglärm“ Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, DLR FE- Bericht Nr. L-2/96-50144/96, Göttingen, 2000

[8] S. Herold, „Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur Integration lärmreduzierender Technologien in das Lärmprognosemodell INM am Beispiel verschiedener Szenarien eines generischen Flughafens“, Diplomarbeit TU München, 2004

[9] J.M. Gulding et al., "Integrated Noise Model 6.0 User Guide", Report No. FAA-AEE-99-03, Washington D.C, USA, 2002

[10] S. Schwanke, "Effect of noise reduction technologies and operational procedures on external cost around a generic airport", INTERNOISE 2005, 07.-10.08.05, Rio de Janeiro, Brazil IN05-1841

[11] H.M.E. Miedema, C.G.M. Oudshoorn, "Annoyance from Transportation Noise: Relations with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals", Environmental Health Perspectives, Volume 109, Number 4, April 2001

[12] P. Morell, C.H.-Y., "Aircraft noise social cost and charge mechanism – A case study of Amsterdam Airport Schiphol", Air Transport Group, College of Aeronautics, Cranfield University, Cranfield, England, 2000

[13] B. Pearce, D. Pearce, "Setting environmental taxes for aircraft: a case study of the UK", CSERGE working paper GEC 2000-26, 2000

[14] S. Navrud, "The State-of-The-Art on Economic Valuation of Noise", Final Report to the European Commission DG Environment, [http://europa.eu.int/comm/environment/noise/020414noise\\_report.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/noise/020414noise_report.pdf)

[15] WG HSEA, "Valuation of Noise", Draft Position Paper of the WORKING GROUP on HEALTH and SOCIO-ECONOMIC ASPECTS. Brüssel, 2003

[16] Y.de Kluzenaar, W. Paschier-Vermeer, H.M.E. Miedema, "Adverse effects of noise exposure on health – a state of the art summary", TNO report 2001.171, Leiden, Niederlande, 2001

[17] EU COM(2002) 683 final, EU Directive on establishment of a community framework for noise classification of civil subsonic aircraft for the purposes of calculating noise charges, Brüssel, Belgien, 2002

FAA	Federal Aviation Administration
FRA	Flughafen Frankfurt Rhein- Main
GMF	Global market forecast
HPM	Hedonic Pricing Method
ICAO	International Civil Aviation Organization
INM	Integrated Noise Model
LAMAX	Maximaler A- bewerteter Schalldruckpegel
LDEN	Kumulierter Tag- Abend- Nacht Lärmpegel
LPLDA	Low Power Low Drag Approach
LTO	Landing and Take-Off cycle
MUC	Flughafen München
NAAP	Noise Abatement Approach Procedure
NADP	Noise Abatement Departure Procedure
ND(S)I	Noise Depreciation (Sensitivity) Index
NPD	Noise Power Distance curve
NRT	Noise Reduction Technology
PNLTM	Maximum Tone-corrected Perceived Noise Level
SEL	Sound Exposure Level
TESCOAN	Tool for the Evaluation of Social Cost of Aircraft Noise
T/O	Take-off
TSA	Two-segment approach

## 7. NOMENKLATUR UND ABKÜRZUNGEN

A/C	Aircraft
APP	Approach
ATC	Air Traffic Control
AzB	Anleitung zur Berechnung von Fluglärm
CDA	Continuous Descent Approach
CVM	Contingent Valuation Method
DFS	Deutsche Flugsicherung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EPNdB	Decibels of Effective Perceived Noise Level
EPNL	Effective perceived noise level
EU	Europäische Union

Bild 1: Struktur der Berechnungsmethodik für die Ermittlung der externen Kosten des Fluglärms

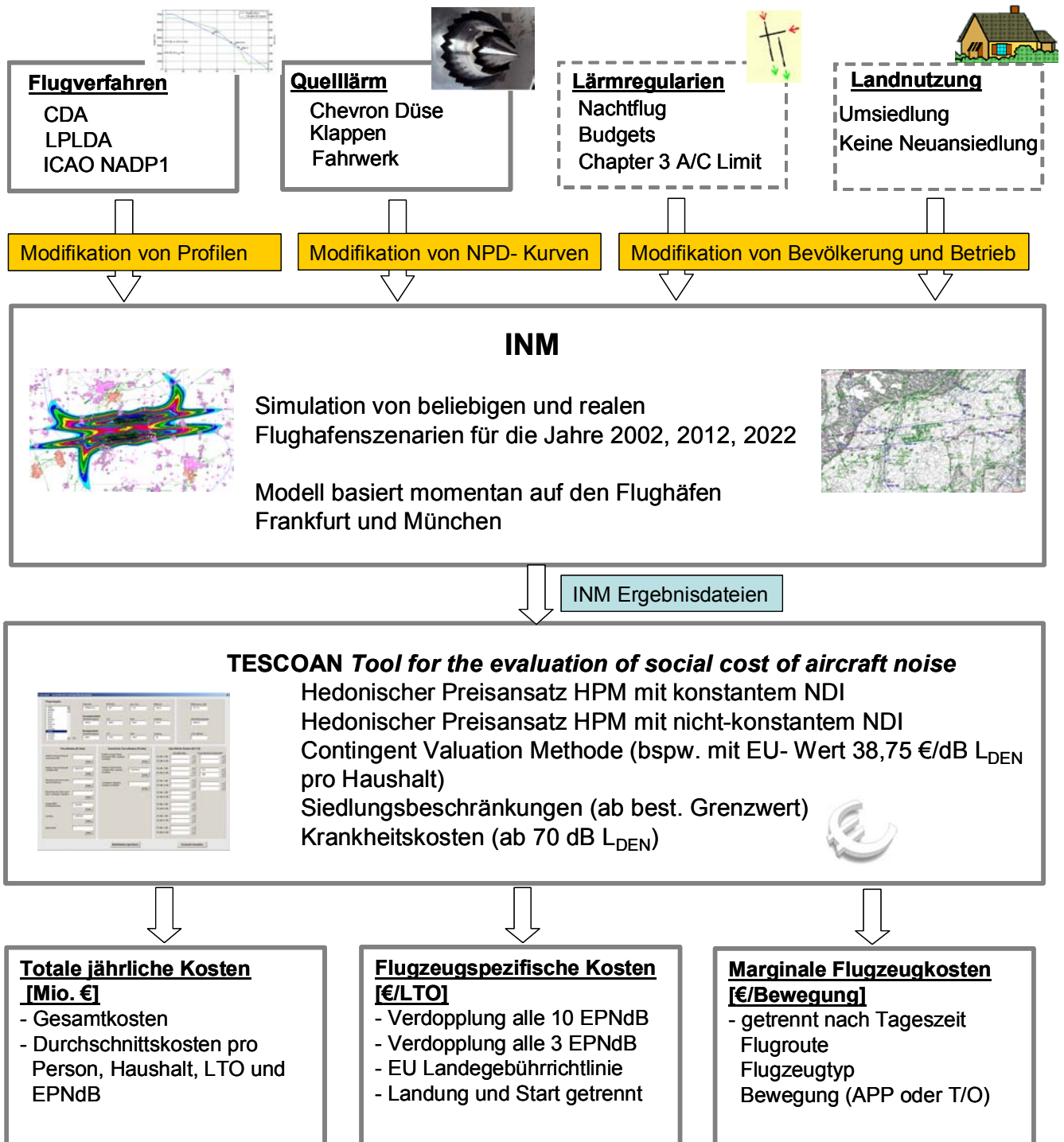


Tabelle 1: Tag- Abend- Nacht Verteilung der durchschnittlichen Flugbewegungen in 24h (nur GMF Flugzeuge)

Jahr	Bewegungen Tag	Bewegungen Abend	Bewegungen Nacht	Bewegungen total
2002	778,23	138,21	164,47	1080,91
2012	1150,74	231,43	317,93	1700,10
2022	1514,82	305,42	471,39	2291,63

Bild 2: INM Modell des Flughafens Frankfurts inklusive Bevölkerung und Höhenmodell

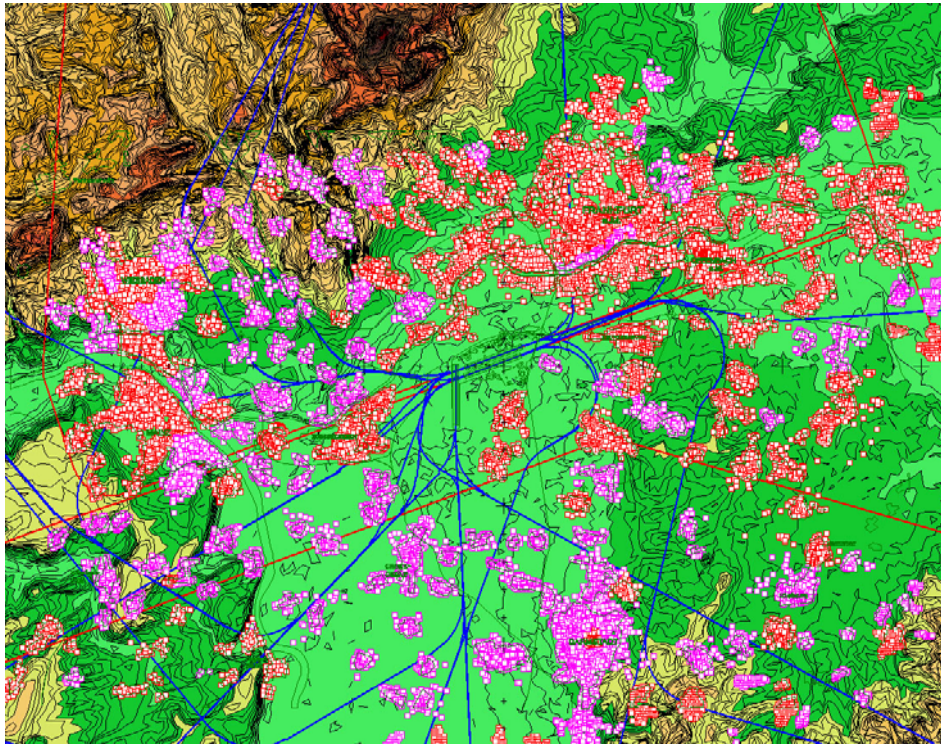
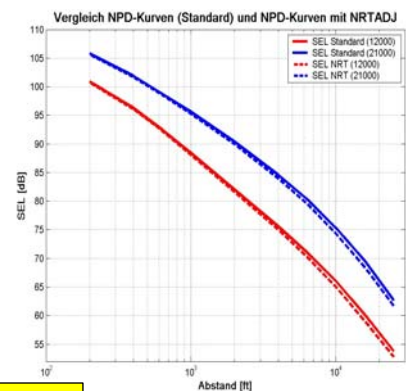
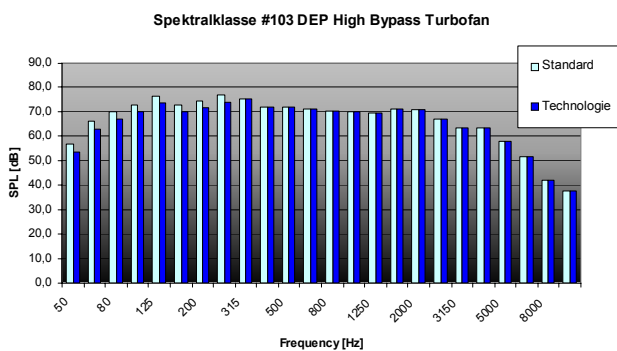


Bild 3: Implementierung von generischen Lärmreduktionstechnologien

Implementierung berücksichtigt Frequenzbereich und Amplitude der Reduktion

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Reduktion Technologie [dB]	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	0,0	0,0	0,0
Frequenz [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
Reduktion Technologie [dB]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



$$L_{NRT} = L_E + NRT_{ADJ}$$



Bild 4: Beispiel eines Höhen- und Geschwindigkeitsverlaufes für den Anflug eines A340 (CDA und Referenz)

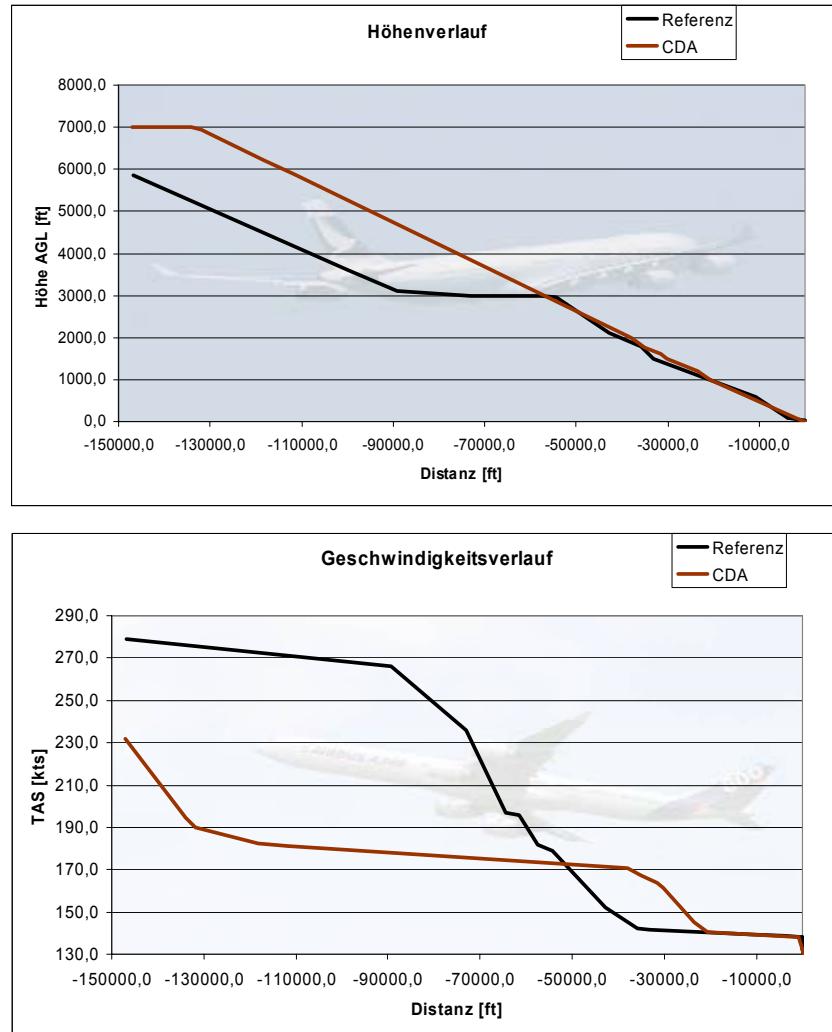


Bild 5: Lärmkonturen der Referenzszenarien für 2002 (links), 2012 (Mitte) und 2022 (rechts);  $L_{DEN} > 50$  dB in 5 dB Schritten

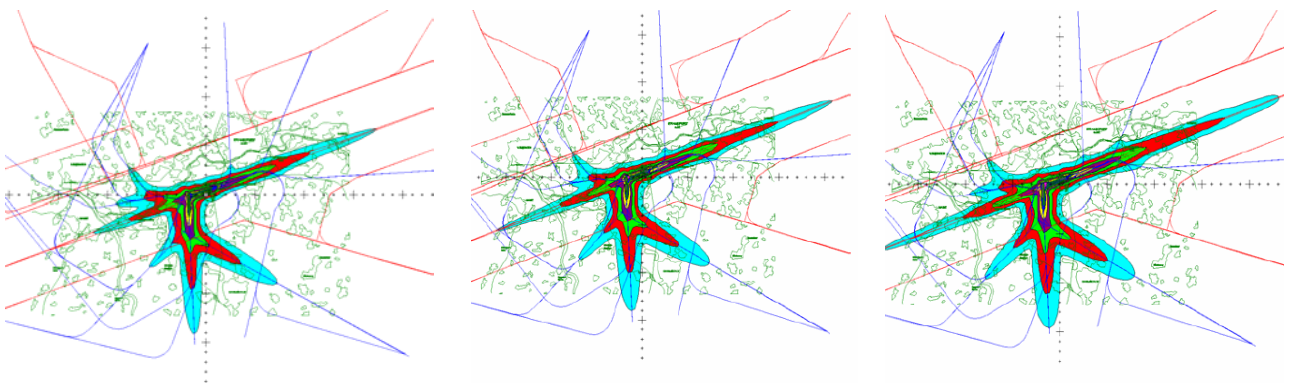


Tabelle 2: Ergebnisse der externen Kostenrechnung für die Referenzszenarien

<b>Jahr</b>	<b>Grenzwert [dB LDEN]</b>	<b>Totale Kosten [Mio.€] HPM</b>	<b>Totale Kosten [Mio.€] EU</b>
2002	50	46,423	20,550
2002	55	9,001	3,998
2012	50	70,669	31,269
2012	55	17,799	7,876
2022	50	96,009	42,481
2022	55	28,176	12,467

Tabelle 3: Ergebnisse der externen Kostenrechnung für die Integration von Lärmreduktionstechnologien A340

<b>Jahr</b>	<b>Grenzwert [dB LDEN]</b>	<b>Totale Kosten [Mio.€] HPM</b>	<b>Spezifische Kostenersparnis pro APP A340 (Ansatz 1) aus HPM [€]</b>	<b>Spezifische Kostenersparnis pro APP A340 (Ansatz 2 EU Landegebühr) aus HPM [€]</b>
2012	50	69,287	291,25	32,11
2012	55	17,221	121,81	10,20
2022	50	93,515	284,70	37,34
2022	55	27,014	132,65	12,12

Tabelle 4: Ergebnisse der externen Kostenrechnung für die Integration von lärmarmem Anflugprofil A340 CDA

<b>Jahr</b>	<b>Grenzwert [dB LDEN]</b>	<b>Totale Kosten [Mio.€] HPM</b>	<b>Spezifische Kostenersparnis pro APP A340 (Ansatz 1) aus HPM [€]</b>
2002	50	46,202	100,91
2002	55	8,897	47,50
2012	50	70,170	105,57
2012	55	17,554	51,38
2022	50	95,142	100,56
2022	55	27,684	57,07