

# EIN VORSCHLAG ZUR BERÜKSICHTIGUNG LÄRMSPEZIFISCHER LANDEENTGELTE IM FLUGZEUGVORENTWURF

M. Schmid, Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Marchstr. 12,  
10587 Berlin, Deutschland

## Zusammenfassung

Moderne Verkehrsflugzeuge werden vor allem nach Kostenaspekten optimiert. Dabei gewinnen der Fluglärm und die daraus resultierenden Kosten immer mehr an Bedeutung. Bisher gibt es noch keine geeignete Methodik, die diesen Aspekt abdeckt. Ein Ansatz ist die Internalisierung der durch Lärmemissionen verursachten Kosten, welche als externe Kosten dem Verursacher z.B. dem Luftverkehr zugerechnet werden müssen. Diese entstehen vor allem durch die Beeinträchtigung des physischen und psychischen Befindens der in den An- und Abflugsektoren von Flughäfen wohnenden und arbeitenden Menschen. Eine mögliche Bewertungsmethode bietet die Marktpreismethode (Hedonischer Preisansatz). Dabei wird angenommen, dass die Umweltqualität ein Faktor für Konsumentenentscheidungen und daher in der Nachfrage bzw. Preisentwicklung, insbesondere von Immobilienkosten, enthalten ist. Aus der Beobachtung der Marktpreisentwicklung (Marktpreisdivergenzanalyse) wird somit eine Wertschätzung für die Umweltqualität abgeleitet. Diese wird durch den Noise Sensitivity Depreciation Index (NSDI) abgebildet, welcher einen prozentualen Wertverlust pro Schallpegelinheit (dB) quantifiziert. Die in diesem Artikel beschriebene Methode geht von einem Preisszenario aus, dem ein durchschnittlicher Immobilienpreis zugrunde liegt. Über den Wertverlust pro dB unter Zuhilfenahme des NSDI und der Annuitätenmethode kann eine jährliche Wertminderung als so genannter „Willingness to Pay“ (WTP) ermittelt werden. Es wurden zahlreiche Lärmflächen eines generischen Flughafens mit dem FAA Integrated Noise Model (INM) ermittelt. Mit Hilfe des WTPs, den berechneten Lärmflächen sowie einer parametrisierten Bevölkerungsdichte lassen sich die lärmabhängigen Kosten bestimmen. Der verwendete Ansatz geht davon aus, dass eine zusätzliche Flugbewegung zu einer Vergrößerung der Lärmflächen führt, wodurch eine größere Anzahl an Personen vom Lärm beeinträchtigt wird und infolge dessen eine Erhöhung der lärmspezifischen Gesamtkosten resultiert. Die zusätzlichen Kosten können zudem als flugzeugspezifische Grenzkosten einem bestimmten Flugzeugmuster zugeordnet werden. Im weiteren Verlauf des Bewertungsprozesses werden diese flugzeugspezifischen Grenzkosten mit dem Zertifizierungspegel korreliert. Dabei wird bestätigt, dass Flugzeugmuster mit höheren Zertifizierungspegeln konsequenter Weise größere Lärmflächen und somit höhere Kosten verursachen. Über eine statistische Auswertung (Regression) mit verschiedenen Flugzeugmustern bei unterschiedlichen Flugbewegungszahlen lässt sich ein funktionaler Zusammenhang in Form einer Kostenformel herleiten. Diese einfache algebraische Gleichung lässt sich problemlos in eine kostenbasierte Zielfunktion im Flugzeugvorentwurf einbinden. Weiterhin wurden die Ergebnisse dieser Kostenformel mit veröffentlichten lärmabhängigen Start- und Landeentgelten des Flughafens Frankfurt/Main verglichen, wobei sich deren Verwendbarkeit im Flugzeugvorentwurf bestätigte.

## NOMENKLATUR

a	Faktor	-	PpH	Personen pro Haushalt	Personen
ANF	Annuitätenfaktor	-	R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß	-
b	Faktor	-	V <sub>total</sub>	totaler Wertverlust pro dB	€ / dB
BD	Bevölkerungsdichte	Einw./km <sup>2</sup>	V <sub>jährlich</sub>	jährlicher Wertverlust pro dB	€ / Jahr / dB
C <sub>1</sub>	Faktor	-	WTP	jährlicher Wertverlust pro Person	€ / Jahr / Person / dB
C <sub>2</sub>	Faktor	-			
IP	Immobilienpreis	€	z	Zinssatz	%
j	Abschreibungsdauer	Jahre			
F	Lärmfläche	km <sup>2</sup>			
GK	Grenzkosten	€			
K <sub>ges</sub>	Gesamtkosten	€			
L <sub>DN</sub>	äquivalenter Dauerschallpegel (Tag/Nacht gewichtet)	dB(A)	NSDI	Noise Sensitivity Depreciation Index	
L <sub>DN (55 dB)</sub>	medizinisch unbedenklicher Grenzpegel von 55 dB(L <sub>DN</sub> )	dB(A)	WTP	Willingness to Pay	
NF	Nachtfluganteil	%	INM	Integrated Noise Model	
n <sub>Personen</sub>	Personenanzahl	Personen	FAA	Federal Aviation Administration	
NSDI	prozentualer Wertverlust pro dB	% / dB	T/O	Take off (Start)	
			SL	Side line (Seitenlinie)	
			APP	Approach (Landeanflug)	

## GLOSSAR

## 1. EINLEITUNG

Bisher waren gesetzlich festgelegte und sich stetig verschärfende Lärmgrenzwerte für Flugzeuge der Treiber für Lärmreduzierungsmaßnahmen. In der heutigen Mobilitätsgesellschaft haben sich jedoch große Luftverkehrszentren (Hubs) gebildet, welche ein besonders hohes Verkehrsaukommen und damit eine enorme Lärmbelästigung für die im Nahbereich lebende Bevölkerung verursachen. Um weiteres Wachstum zu fördern, sollen daher vermehrt leise Flugzeugmuster gefördert und besonders laute bestraft werden. Aus diesem Grund wurden an nahezu allen großen Flughäfen lärmabhängige Gebühren eingeführt, welche jedoch nicht einheitlich sind. In diesem Artikel wird ein Ansatz zur Ermittlung von lärmabhängigen Landegebühren vorgestellt, welcher sich wegen seiner Einfachheit besonders für die Anwendung im Flugzeugvorentwurf als Bestandteil einer Zielfunktion eignet.

## 2. BEWERTUNGSMETHODE

Moderne Verkehrsflugzeuge werden vor allem nach Kostenaspekten optimiert. Dabei gewinnt der Lärmaspekt und die daraus resultierenden Kosten immer mehr an Bedeutung. Bisher gibt es jedoch noch keine eingeführte Methodik, die diesen Aspekt abdeckt. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der Internalisierung der durch Fluglärm verursachten Kosten. Demnach werden die Lärmkosten als externe Kosten dem Verursacher, hier dem Luftverkehr, zugerechnet. Diese Kosten entstehen vor allem durch die Beeinträchtigung des physischen und psychischen Befindens der im akustischen Einflussbereich eines Flughafens wohnenden und arbeitenden Menschen und drücken sich z.B. durch erhöhte Krankheitsraten aus. Der Betrieb eines Flughafens hat jedoch zugleich auch positive regionale Effekte wie z.B. ein gesteigertes Wirtschaftsaufkommen sowie eine größere Tourismusaktivität zur Folge. Die entwickelte Bewertungsmethode basiert auf einer Marktpreismethode, welche auch als Hedonischer Preisansatz bezeichnet wird. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Umweltqualität bzw. das gesteigerte Wirtschaftsaufkommen Faktoren für Konsumentenentscheidungen sind und daher in der Nachfrage bzw. Preisentwicklung, insbesondere von Immobilienkosten, enthalten sind. Aus der Beobachtung der Marktpreisentwicklung (Marktpreisdivergenzanalyse) wird somit eine Wertschätzung für die Umweltqualität abgeleitet. Diese lokal unterschiedliche Wertschätzung wird mit der lokalen kumulierten Lärmbeaufschlagung korrikt und in einen Noise Sensitivity Depreciation Index NSDI überführt, welcher einen prozentualen Wertverlust pro Schallpegeleinheit in dB quantifiziert. Schließlich wird der Anteil des zu bewertenden Musters in einem gegebenen Flottenmix und einem gegebenen Verkehrsszenario ermittelt und diesem ein entsprechender Landegebührenzuschlag zugeordnet, der Teil einer Methode zur Berechnung der direkten Betriebskosten (DOC) ist.

Die am Fachgebiet Luftfahrzeugbau und Leichtbau am Institut für Luft- und Raumfahrt der Technischen Universität Berlin entwickelte Methode geht von einem Preisszenario aus, dem ein durchschnittlicher Immobilienpreis zugrunde liegt. Über den totalen Wertverlust pro dB unter Zuhilfenahme des NSDI und der Annuitätenmethode kann

eine jährliche Wertminderung „Willingness to Pay“ WTP pro Person, Jahr und dB ermittelt werden. In (1) ist die Ermittlung des Totalen Wertverlust pro dB einer Immobilie als Produkt aus dem Immobilienpreis und dem NSDI beschrieben.

$$(1) \quad V_{\text{total}} = IP \cdot \text{NSDI} \left[ \frac{\epsilon}{dB} \right]$$

Mit Hilfe der Annuitätenmethode kann der jährliche Wertverlust pro dB unter Verwendung des Annuitätenfaktors ANF (2), welcher einen Zinssatz  $z$  und eine Abschreibungsdauer  $j$  berücksichtigt, bestimmt werden.

$$(2) \quad \text{ANF} = z \cdot \frac{(1+z)^j}{(1+z)^j - 1}$$

Der jährliche Wertverlust folgt aus dem totalen Wertverlust und der Multiplikation mit dem Annuitätenfaktor.

$$(3) \quad V_{\text{jährlich}} = V_{\text{total}} \cdot z \cdot \frac{(1+z)^j}{(1+z)^j - 1} \left[ \frac{\epsilon}{Jahr \cdot dB} \right]$$

Unter Einbeziehung der in einem Haushalt lebenden Personenanzahl  $PpH$ , wird die jährliche Abschreibung pro Person bestimmt, siehe (4).

$$(4) \quad \text{WTP} = \frac{V_{\text{jährlich}}}{PpH} \left[ \frac{\epsilon}{Jahr \cdot Person \cdot dB} \right]$$

Der WTP ist die Ausgangsbasis für die weitere Berechnung der Lärmkosten. Ebenso könnten z.B. auch Kosten aufgrund eines erhöhten Krankenstands und eventuell entstehende Therapiekosten herangezogen werden.

Ein vereinfachtes Betriebsszenario an einem Flughafen sieht einen fest definierten Flottenmix, einen fest definierten An- und Abflugsektor sowie eine konstante Bevölkerungsdichte in dessen Umgebung vor. Weiterhin müssen die Lärmflächen für einen definierten Zeitraum, meist 24 Stunden, bestimmt werden. Die zu internalisierenden Gesamtkosten ergeben sich nun aus der Anzahl der beeinträchtigten Personen  $n_{\text{personen}}$  und der Pegeldifferenz  $\Delta L$  bezogen auf einen als unbedenklich einzustufenden Grenzpegel  $L_{DN(55 \text{ dB})}$ , der in medizinischen Studien i.d.R. mit 55 dB( $L_{DN}$ ) angegeben wird, sowie dem WTP.

$$(5) \quad K_{\text{ges}} = \text{WTP} \cdot \sum \Delta L \cdot n_{\text{personen}}$$

Die mit einem bestimmten Lärmpegel beaufschlagte Personenanzahl ergibt sich nach dem vereinfachten Modell aus der Bevölkerungsdichte  $BD$  multipliziert mit der Lärmfläche  $F_i$  dieses Lärmpegels  $L_{DN(i)}$ . Die Pegeldifferenz wird aus dem Pegel der Lärmfläche und dem Grenzwert von 55 dB gebildet. Es ergibt sich somit folgende Gleichung zur Bestimmung der Gesamtkosten.

$$(6) \quad K_{\text{ges}} = \text{WTP} \cdot \sum_{i=56}^{85} \left[ (L_{DN(i)} - L_{DN(55 \text{ dB})}) \cdot \underbrace{BD \cdot F_i}_{\text{beeinträchtigte Pers.}} \right]$$

Der Ansatz der flugzeugspezifischen Grenzkosten GK geht davon aus, dass eine zusätzliche Flugbewegung zu einer Vergrößerung des Lärmteppichs bzw. der Lärmflächen führt, wobei eine größere Anzahl an Personen vom Lärm beeinträchtigt wird und was zu einer Erhöhung der lärmspezifischen Gesamtkosten führt. Die Differenz beider

Kosten ergibt die Grenzkosten, welche exakt einem Flugereignis bzw. einem Flugzeugmuster zugerechnet werden können.

$$(7) \quad GK = K_{\text{ges}+1\text{Flug}} - K_{\text{ges}}$$

Im weiteren Verlauf werden diese flugzeugspezifischen Grenzkosten mit dem Zertifizierungspegeln korreliert. Dabei wird ersichtlich, dass Flugzeugmuster mit höheren Zertifizierungspegeln konsequenter Weise größere Lärmflächen und somit höhere Kosten verursachen. Über eine statistische Auswertung (Regression) mit verschiedenen Flugzeugmustern bei verschiedenen Flugbewegungszahlen lässt sich ein funktionaler Zusammenhang in Form einer Kostenformel herleiten. Diese einfache algebraische Gleichung lässt sich problemlos in eine Kostenoptimierungsrechnung im Flugzeugentwurf einbinden. Die Herleitung dieser Formel ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3. LÄRMKOSTENFORMEL

Für die Herleitung einer Lärmkostenformel auf Basis der vorgestellten Methodik wird zunächst ein geeignetes Betrachtungsszenario definiert. Schipper et al. [1] ermittelten im Rahmen einer Metaanalyse für den Lärmeinfluss auf den WTP einen Medianwert des NSDI von 0,61 % pro dB. In Thießen und Schnorr [2] geht aus 29 vom Umweltbundesamt ausgewerteten Studien ein mittlerer NSDI von 0,87 hervor. In Navrud [3] werden eine Vielzahl von Studien angegeben, deren NSDI über das Jahr der Veröffentlichung in BILD 1 dargestellt sind.

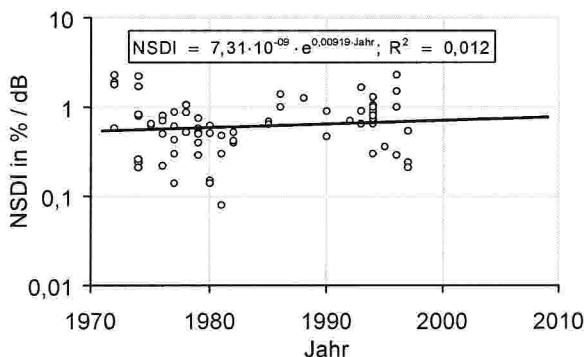


BILD 1. NSDI verschiedener Studien (Quelle: [3])

In den 70er und 90er Jahren sind zahlreiche Studien veröffentlicht worden, welche jedoch eine sehr hohe Streuung der Ergebnisse aufweisen. In (8) ist eine Regressionsgleichung angegeben, welche die zukünftige Entwicklung abbildet, jedoch ist das Bestimmtheitsmaß sehr gering.

$$(8) \quad NSDI = 7,31 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,00919 \cdot \text{Jahr}}; R^2 = 0,012$$

Mit Hilfe von (8) ergibt sich für das Jahr 2008 ein NSDI von 0,76 % pro dB, welcher für die nachfolgende Betrachtung verwendet wird. Der WTP kann mit Hilfe eines Preisszenarios berechnet werden. In TAB 1 sind die verwendeten Parameter aufgelistet. BILD 2 zeigt die Entwicklung der Personen pro Haushalt in Deutschland.

Immobilienpreis (IP)	150.000 €
Abschreibungszeitraum (j)	50 Jahre
Zinssatz (z)	4 %
Personen pro Haushalt (PpH)	2,1
NSDI	0,76 %/dB

TAB 1. Parameter für ein Preisszenario

$$(9) \quad PpH = 1,5762 \cdot 10^{35} \cdot e^{-0,04124 \cdot \text{Jahr}} + 1,92; R^2 = 0,994$$

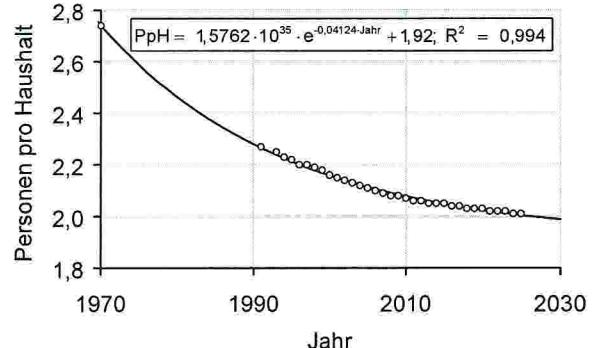


BILD 2. Entwicklung der Personen pro Haushalt (Quelle: Statistisches Bundesamt [4][5])

Mit Hilfe der in TAB 1 angenommenen Werte lässt sich der WTP wie folgt berechnen:

$$(10) \quad V_{\text{total}} = IP \cdot NSDI$$

$$V_{\text{total}} = 150000 \text{ €} \cdot 0,76 \% / \text{dB} = 1140 \text{ €} / \text{dB}$$

$$V_{\text{jährlich}} = V_{\text{total}} \cdot z \cdot \frac{(1+z)^j}{(1+z)^j - 1}$$

$$(11) \quad V_{\text{jährlich}} = 1140 \text{ €} / \text{dB} \cdot 0,04 \cdot \frac{(1+0,04)^{50}}{(1+0,04)^{50} - 1}$$

$$V_{\text{jährlich}} = 53,07 \text{ €} / \text{Jahr} / \text{dB}$$

$$(12) \quad WTP = \frac{V_{\text{jährlich}}}{PpH} = \frac{53,07 \text{ €} / \text{Jahr} / \text{dB}}{2,1 \text{ Personen}}$$

$$WTP = 25,27 \text{ €} / \text{dB} / \text{Jahr} / \text{Person}$$

Aus dem gewählten Preisszenario ergibt sich ein WTP von 25,27 € / dB / Jahr / Person. In [2] wird ein mittlerer NSDI von 0,87 % angegeben, was beim gleichen Preisszenario zu einem WTP von 28,93 € / dB / Person / Jahr führen würde. Würde wie in [3] ein mittlerer NSDI von 0,61 % / dB angenommen ergäbe sich ein WTP von 20,28 € / dB / Person / Jahr.

In [3] sind WTP-Werte für verschiedene europäische Länder in einem Bereich von 2 bis 99 € / dB / Jahr / Person angegeben, wobei der Medianwert 23,5 € / dB / Jahr / Person entspricht. In Bezug auf das Jahr 2001 wird für Europa ein Wert von 25 € / dB / Jahr / Person vorgeschlagen. Da die Lärmsensibilität der Bevölkerung weiter zunimmt ist jedoch für zukünftige Flugzeugentwürfe von einem höheren Wert auszugehen. Die weitere Ableitung der Lärmkostenformel erfolgt dennoch auf der für die vorliegende Anwendung konservativeren Basis von 25 € / dB / Jahr / Person.

Land	WTP
Norwegen	2 bis 72
Schweden	28
Finnland	7,5
Schweiz	65 bis 99
Frankreich	7
Spanien	2,5
Portugal	23,5
Median	23,5

TAB 1. WTP für europäische Länder (Quelle: [3])

Es wird ferner für das Flughafenszenario eine konstante Bevölkerungsdichte von 1200 Einwohner pro km<sup>2</sup> sowie ein geradliniger An- und Abflugpfad zugrunde gelegt und folgender Flottenmix als Verkehrsszenario angenommen:

Hersteller	Typ	Anteil in %
Airbus	A320	20
Airbus	A300	10
Boeing	B373	20
Boeing	B747	5
Embraer	EMB145	17,5
BAe-Systems	BAe146	17,5
McDonnell Douglas	MD81	10

TAB 2. Flottenmix eines typischen Großflughafens

Die Lärmflächenberechnung wurden mit dem FAA Integrated Noise Model 7.0 (INM) durchgeführt. In BILD 3 sind zur Veranschaulichung die Lärmflächen von 55 bis 75 dB(L<sub>DN</sub>) dargestellt. Das Programm gibt die Lärmflächen ebenfalls als Zahlenwert aus, welcher für die weitere Berechnung verwendet wurde. Mit diesem Werkzeug ist es zudem möglich, eine detaillierte Bevölkerungsstruktur in Form von „Population Points“ festzulegen, wobei das INM dann die genauen Bevölkerungszahlen ausgeben kann.

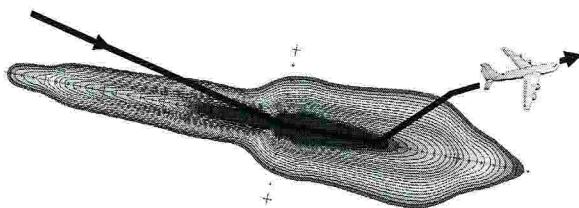


BILD 3. Lärmflächen bei 200 Flugbewegungen am Tag

Zum gewählten Verkehrsszenario kommt nun jeweils eine zusätzliche Flugbewegung des ausgewählten Flugzeugmusters hinzu, wobei diesem nun die entstehenden Grenzkosten zugeordnet werden. Für 200 Flugbewegungen pro Tag sind diese Zusatzkosten in BILD 4 beispielhaft über dem mittleren Zertifizierungspegel aus Startüberflug (T/O), Seitenline (SL) und Landeanflug (APP), siehe (13), aufgetragen.

$$(13) \bar{L} = \frac{L_{T/O} + L_{SL} + L_{APP}}{3}$$

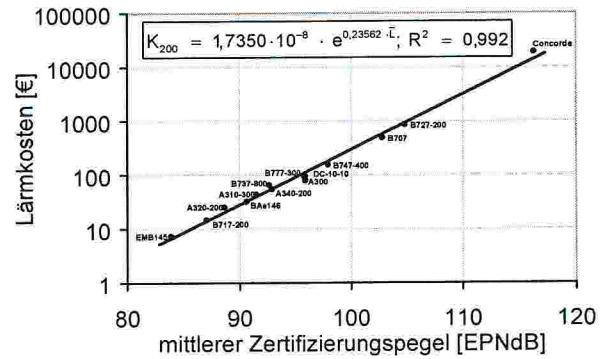


BILD 4. Lärmkosten ausgewählter Flugzeuge bei 200 Flugbewegungen pro Tag

Es zeigte sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem mittleren Zertifizierungspegel und den ermittelten Kosten, welche durch eine Regressionskurve mit exponentiellem Ansatz, wie allgemein in Gleichung (14), beschrieben werden kann.

$$(14) K = C_1 \cdot e^{C_2 \cdot \bar{L}}$$

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung wurden unterschiedliche Flugbewegszahlen pro Tag betrachtet, wobei sich ähnliche Verläufe zeigten. BILD 5 veranschaulicht dies.

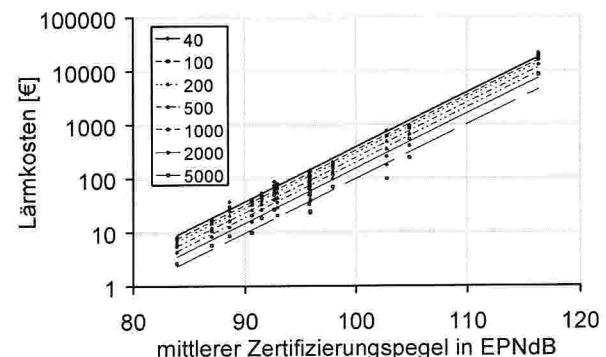


BILD 5. Lärmkosten bei unterschiedlichen Flugbewegszahlen

Die in BILD 5 gezeigten Kurven können mit folgenden Regressionsansätzen beschrieben werden:

$$(15) \begin{aligned} K_{40} &= 2,6640 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,23389 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,993 \\ K_{100} &= 2,1071 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,23486 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,993 \\ K_{200} &= 1,7350 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,23562 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,992 \\ K_{500} &= 1,3396 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,23617 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,987 \\ K_{1000} &= 1,0674 \cdot 10^{-8} \cdot e^{0,23640 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,981 \\ K_{2000} &= 8,5286 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,23611 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,976 \\ K_{5000} &= 6,6055 \cdot 10^{-9} \cdot e^{0,23416 \cdot \bar{L}} ; R^2 = 0,968 \end{aligned}$$

Ersichtlich ist, dass die Steigung der Kurven, zu erkennen an fast gleich bleibenden Faktoren im Exponenten, konstant bleibt. Mit zunehmender Anzahl an Flugbewegungen sinken die Kosten, was sich in den Regressionsgleichungen in einem Abfall des Faktors vor der Basis äußert. Dieses bedeutet, dass mit steigenden Flugbewegszahlen das

einzelne Flugzeug weniger Kosten verursacht. Trägt man diese Faktoren über die Flugbewegungszahl auf, ergibt sich ein weiterer funktionaler Zusammenhang, welcher in BILD 6 dargestellt ist. Eine Regressionsanalyse ergab eine Regressionsgleichung, welche allgemein wie folgt beschrieben werden kann.

$$(16) C_1 = a \cdot (N_{\text{Flüge}})^b$$

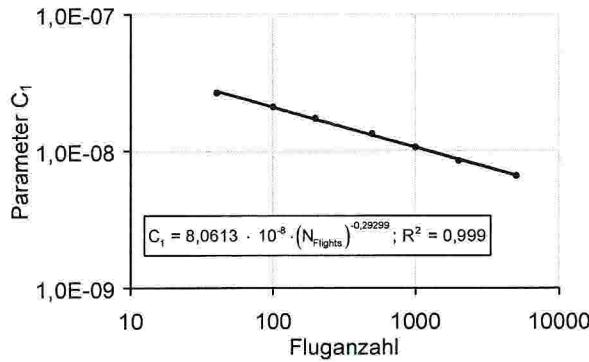


BILD 6. Parameter  $C_1$  bei verschiedenen Flugbewegungszahlen

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung wurden Lärmkosten für unterschiedliche Nachtfluganteile untersucht, wobei festgestellt werden konnte, dass sich die Faktoren  $a$  und  $b$  aus Gleichung (16) verändern. Die Veränderung dieser Parameter sind in BILD 7 und BILD 8 dargestellt.

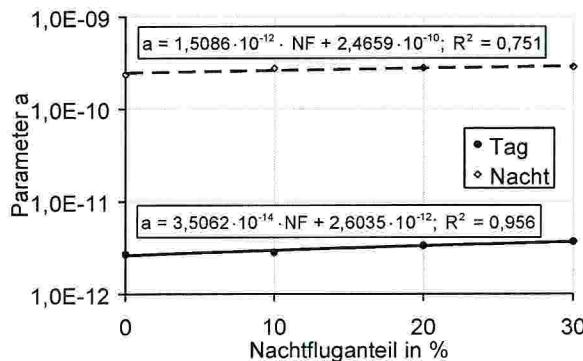


BILD 7. Parameter  $a$  bei unterschiedlichem Nachtfluganteil

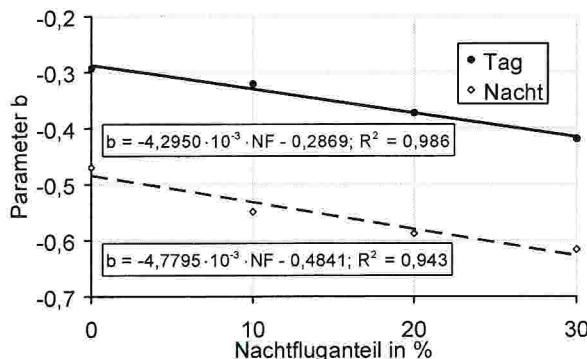


BILD 8. Parameter  $b$  bei unterschiedlichem Nachtfluganteil

Weiterhin konnte eine Abhängigkeit des Parameters  $C_2$  vom Nachtfluganteil festgestellt werden, welches in BILD 9 dargestellt ist. Für den Flugbetrieb am Tag kann der Faktor  $C_2$  jedoch annähernd als konstant angenommen werden.

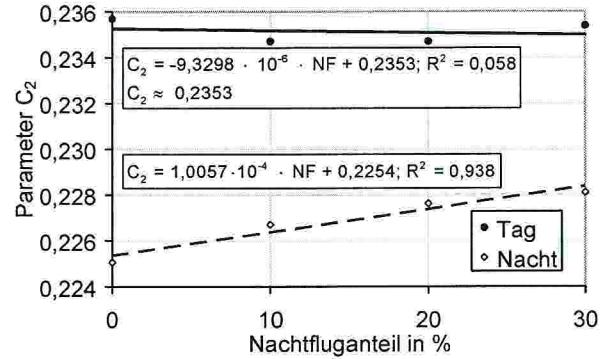


BILD 9. Parameter  $C_2$  bei unterschiedlichen Nachtfluganteilen

Betrachtet man Gleichung (6), ist zu erkennen, dass der WTP sowie die Bevölkerungsdichte ausgeklammert werden können und somit als vom Betriebsszenario unabhängige Parameter fungieren. Diese können aus der Konstante  $C_1$  herausgezogen werden und fließen so als eigenständige Parameter in den Kostenansatz ein.

Abschließend lässt sich also eine einfache algebraische Gleichung zur Bestimmung von lärmabhängigen Landentgelten herleiten. Diese ist eine Funktion des WTP, der Bevölkerungsdichte, der Flugbewegungszahl, des Nachtfluganteils sowie des mittleren Zertifizierungspegels und ist in (17) dargestellt.

$$(17) K_{\text{Lärm}} = f(\text{WTP}, \text{BD}, N_{\text{Flüge}}, \text{NF}, \bar{L})$$

$$K_{\text{Lärm}} = C_1 \cdot \text{WTP} \cdot \text{BD} \cdot e^{C_2 \cdot \bar{L}}$$

Dabei ist der Faktor  $C_1$  von der Anzahl der Flüge sowie vom Nachtfluganteil abhängig (18).

$$(18) C_1 = f(N_{\text{Flüge}}, \text{NF}) = a(\text{NF}) \cdot (N_{\text{Flüge}})^{b(\text{NF})}$$

Die Faktoren  $a$ ,  $b$  und  $C_2$  sind lediglich vom Nachtfluganteil abhängig und können separat für Tag und Nachtflüge wie folgt bestimmt werden:

Tagflug:

$$(19) a = 3,5062 \cdot 10^{-14} \cdot \text{NF} + 2,6035 \cdot 10^{-12}$$

$$b = -4,2950 \cdot 10^{-3} \cdot \text{NF} - 0,2869$$

$$C_2 = -9,3298 \cdot 10^{-6} \cdot \text{NF} + 0,2353 \approx 0,2353$$

Nachtflug:

$$(20) a = 1,5086 \cdot 10^{-12} \cdot \text{NF} + 2,4659 \cdot 10^{-10}$$

$$b = -4,7795 \cdot 10^{-3} \cdot \text{NF} - 0,4841$$

$$C_2 = 1,0057 \cdot 10^{-4} \cdot \text{NF} + 0,2254$$

Diese Methode in Form von einfachen algebraischen Gleichungen eignet sich hervorragend für die Entwurfsoptimierung im Flugzeugvorentwurf.

#### 4. VERGLEICH DER METHODE AM BEISPIEL DES FLUGHAFENS FRANKFURT/MAIN

Um die Verwendbarkeit der im Kapitel 3 vorgestellten Methode sicherzustellen, wird diese mit der Gebührenordnung für lärmabhängige Start- und Landeentgelte am Flughafen Frankfurt/Main verglichen. Dieser wies für das Jahr 2007 ca. 500.000 Flugbewegungen aus [6], was etwa 1350 Bewegungen pro Tag entspricht. Der Nachtfluganteil am Flughafen entspricht zurzeit ca. 11%. Aus [7] kann eine durchschnittliche Bevölkerungsdichte von ca. 1600 Einwohnern je Quadratkilometer in der Region um den Flughafen angenommen werden. Da dort eine hohe Sensibilität bezüglich Fluglärm besteht, kann ein WTP von 30 € / dB / Jahr / Person als realistisch angenommen werden. Die gewählten Modellparameter sind zusammengefasst in TAB 3 aufgelistet:

WTP	30 € / dB / Person / Jahr
Bevölkerungsdichte	1500 Einw. pro km <sup>2</sup>
Nachtfluganteil	11 %
Flüge pro 24h	1350

TAB 3. Modellparameter für den Flughafen Frankfurt/Main

Auf Grundlage der veröffentlichten Entgeltordnung [6] und den Zertifizierungspegeln dort aufgeführter Flugzeugmuster konnten die Lärmentgelte bestimmt werden. Diese sind in BILD 10 jeweils für den Tag- und Nachtbetrieb abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass in Frankfurt/Main eine Einteilung der Flugzeugmuster in Lärmklassen vorgenommen wird. Das bedeutet, dass alle Flugzeuge einer Klasse das gleiche Lärmentgelt zu entrichten haben. Die ebenfalls im Diagramm dargestellten Linien wurden durch das Kostenmodell unter Berücksichtigung der in TAB 3 gewählten Modellparameter ermittelt, wobei sich eine gute Übereinstimmung sowohl für den Tag- als auch Nachtbetrieb zeigt.

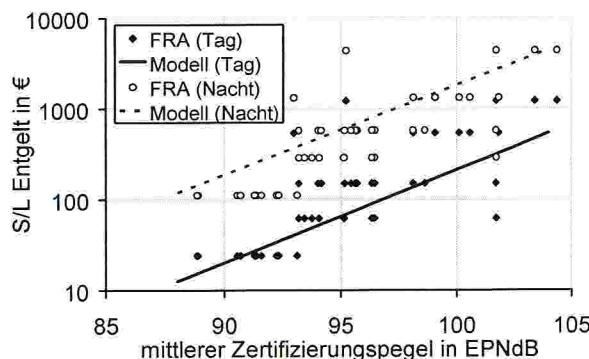


BILD 10. Lärmentgelte am Flughafen Frankfurt/Main

Für ausgewählte Flugzeugmuster sind die Zertifizierungspegel sowie die lärmspezifischen Entgelte nach Berechnung der in Kapitel 3 vorgestellten Kostenmethode in TAB 4 aufgelistet.

Flugzeug	Zertifizierungspegel in EPNdB			Kosten in €	
	T/O	SL	APP	Tag	Nacht
B717-200	82,8	88,2	90,1	9,36	89,94
B737-800	87,2	95,6	95,1	34,93	319,70
B747-400	93,8	99,3	100,6	120,51	1053,79
B727-200	105,4	103,9	105,2	615,35	5066,39
B707	99,7	101,3	107,4	381,47	3196,73
A320-200	81,9	91,5	92,5	13,63	129,21
A340-200	89,4	95,2	94,1	37,19	339,60
A300	90,1	97,4	100,1	74,71	664,91
EMB145	77,7	84	89,9	4,44	43,90
BAe146	88,5	90,4	92,9	21,65	201,72
DC-10-10	91,5	96,6	99,5	74,71	664,91
Concorde	115,1	120,3	113,6	9195,73	68518,65

TAB 4. Beispiele für lärmabhängige Landeentgelte

Es wird ersichtlich, dass moderne, leise Verkehrsflugzeuge wie der A320-200 oder die B737-800 nur geringe Lärmkosten aufweisen. Enorme Kosten würden hingegen bei der bereits außer Dienst gestellten, extrem lauten Concorde anfallen. Aber auch ältere noch operierende Muster wie z.B. die B727 weisen erhöhte Lärmkosten auf, was den Anreiz zur Modernisierung der Flotten deutlich macht.

#### 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Artikel wurde eine Methode zur Berechnung lärmabhängiger Start- und Landeentgelte vorgestellt. Wie in Kapitel 3 beschrieben, eignet sich der Ansatz zur Internalisierung der Lärmkosten mit Hilfe des Hedonischen Preisansatzes sehr gut zur Quantifizierung der durch Fluglärm verursachten Kosten. Es wurde ein Preisszenario mittels WTP sowie ein Flughafenszenario mit einem definierten Flottenmix festgelegt und zahlreiche Lärmflächen unter Verwendung des FAA INM 7.0 berechnet. Für jede zusätzliche Flugbewegung konnten die flugzeugspezifischen Grenzkosten bestimmt werden, welche stark mit den mittleren Zertifizierungspegeln des betrachteten Flugzeugs korrelierten. Aus einer Vielzahl von berechneten Kosten konnte unter Zuhilfenahme einer linearen Regression eine einfache Kostenformel hergeleitet werden. Dieser algebraische Ansatz ermöglicht eine sehr gute Einbindung der Lärmkosten in eine Flugzeugentwurfsoptimierung, bei der die Betriebskosten als Zielfunktion angewendet werden.

In Kapitel 4 wurde die Kostenmethode mit bereits eingeführten Lärmentgelten am Flughafen Frankfurt/Main verglichen, wobei sich eine gute Verwendbarkeit des Kostenansatzes sowohl für den Tag- als auch Nachtbetrieb herausstellte. Es wird ersichtlich, dass moderne, leise Flugzeugmuster im Vergleich zu älteren, lauten Flugzeugen nur sehr geringe Lärmkosten aufweisen.

Durch eine Anpassung des Preisszenarios in Form eines veränderten WTPs kann die zukünftige Kostenentwicklung

hinsichtlich des Fluglärms angepasst werden. Eine Veränderung des Betriebsszenarios kann jederzeit durch eine geeignete Modifikation der Faktoren berücksichtigt werden.

Abschließend sei erwähnt, dass die Lärmkosten in Form von bisher angewandten lärmabhängigen Start- und Landeentgelten keine ausreichende Motivation für eine Entwicklung leiserer Verkehrsflugzeuge darstellt, da diese im Vergleich zu den Gesamtbetriebskosten zu gering sind. Vielmehr würde jedoch eine Lockerung von bestehenden Nachtflugverboten für leise Maschinen einen enormen Kostenvorteil durch eine Steigerung der jährlichen Auslastung (Utilization) mit sich bringen. Dieses würde den Austausch alter Fluggeräte zugunsten einer modernen, leisen Flotte erheblich fördern.

## 6. REFERENZEN

- [1] Schipper, Y., Nijkamp, P., Rietveld, P.: Why Do Aircraft Noise Value Estimates Differ? A Meta-Analysis. Journal of Air Transport Management 4, 117-124, 1998.
- [2] Thießen, F., Schnorr, S.: Immobilienpreisminderung durch Fluglärm. In CWG-Dialog 01/06, Chemnitzer Wirtschaftswissenschaftliche Gesellschaft e.V., 2006.
- [3] Navrud, S.: The state-of-the-art on economic valuation of noise – Final report to European Commission DG Environment. Department of Economic and Social Sciences Agricultural University of Norway, 2002.
- [4] Bevölkerung, Statistisches Jahrbuch 2007, Statistisches Bundesamt 2007.
- [5] Entwicklung der Privathaushalte bis 2025, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2007.
- [6] <http://www.fraport.de>
- [7] <http://atlas.umwelt.hessen.de>